

Farklı Çimentolarla Üretilen Harçların Yüksek Sıcaklık ve Değişik Soğutma Koşulları
Altındaki Özellikleri

Celil Gülce

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Haziran 2009

The Properties of Mortars at Elevated Temperature and Different Cooling Conditions,
Produced with Different Type of Cements

Celil Gülce

MASTER OF SCIENCE THESIS

Department of Civil Engineering

June 2009

Farklı Çimentolarla Üretilen Harçların Yüksek Sıcaklık ve Değişik Soğutma Koşulları
Altındaki Özellikleri

Celil Gülce

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

Danışman: Yrd. Doç. Dr. Ö. Fatih Eser

Haziran 2009

ONAY

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı Yüksek Lisans öğrencisi Celil Gülce'nin YÜKSEK LİSANS tezi olarak hazırladığı “Farklı Çimentolarla Üretilen Harçların Yüksek Sıcaklık ve Değişik Soğutma Koşulları Altındaki Özellikleri” başlıklı bu çalışma, jürimizce lisansüstü yönetmeliğin ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek kabul edilmiştir.

Danışman : Yrd. Doç. Dr. Ö. Fatih Eser

Yüksek Lisans Tez Savunma Jürisi:

Üye : Yrd. Doç. Dr. Ö. Fatih Eser

Üye : Prof.Dr. Eşref Ünlüoğlu

Üye : Prof.Dr.İlker Bekir Topçu

Üye : Doç.Dr.Nevzat Kırac

Üye : Yrd.Doç.Dr.Mustafa Önder

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

Prof. Dr. Nimetullah BURNAK

Enstitü Müdürü

FARKLI ÇİMENTOLARLA ÜRETİLEN HARÇLARIN YÜKSEK SICAKLIK VE DEĞİŞİK SOĞUTMA KOŞULLARI ALTINDAKİ ÖZELİKLERİ

CELİL GÜLCE

ÖZET

Yangın veya yüksek sıcaklık etkisinde kalan beton ve bileşenlerinin yapılarında değişimler meydana gelmektedir. Performans açısından yüksek sıcaklık sonrası mekanik ve fiziksel özelliklerinde meydana gelebilecek değişimler oldukça önem taşımaktadır. Bu çalışmada yüksek sıcaklığın ve söndürme türünün harcın fiziksel ve mekanik özelliklerine etkileri deneysel olarak araştırılmıştır.

Deneysel çalışma, numune üretimi, kuru, yüksek sıcaklık etkisi, soğutma süreci, fiziksel ve mekanik deneyler olmak üzere beş aşamada gerçekleştirilmiştir. Üretimde dört farklı tip portland çimentosu kullanılmıştır. Yüksek sıcaklığın harcın fiziksel ve mekanik özelliklerine etkilerini araştırmak için harç numuneleri 28 günlük ve 56 günlük kür sürelerinin sonunda, 150, 300, 450, 600 ve 900 °C olmak üzere beş farklı sıcaklıkta ısıtılmış, soğutma işlemi havada ve suda olmak üzere iki farklı şekilde gerçekleştirilmiştir. Oda sıcaklığına kadar soğutulan numunelerde birim ağırlık, ultrases geçiş hızı, eğilme dayanımı ve basınç dayanımı değerleri belirlenmiştir.

Deney sonuçlarından harç numunelerinin yüksek sıcaklıklarda önemli dayanım kayıplarına uğradığı görülmüştür. Özellikle kayıpların 450 °C ile 900 °C arasında daha fazla olduğu dikkat çekmiştir.

Anahtar Kelimeler: Harç, Yüksek sıcaklık, Basınç dayanımı, Soğutma türü

THE PROPERTIES OF MORTARS AT ELEVATED TEMPERATURE AND DIFFERENT COOLING CONDITIONS, PRODUCED WITH DIFFERENT TYPES OF CEMENTS

CELİL GÜLCE

SUMMARY

There exist some changes in the forms of concretes and its ingredients exposed to fire or high temperature. As a result of high temperature mechanical and physical changes are very important for its performance. In this study the effects of high temperature and the sort of extinguishing to the physical and mechanical features of mortars have been empirically analyzed.

Experimental study comprises of five stages as specimen production, cure, high temperature process, cooling process, physical and mechanical tests. Four kinds of cement have been used in production. For investigating the effect of high temperature on physical and mechanical properties of mortars, concrete specimens after 28 days and 56 days curing periods, are exposed to 150, 300, 450, 600 and 900 °C and the process of cooling has been conducted in two conditions; aloft and afloat. Unit weight, ultrasonic pulse velocity, flexural strength and compressive strength are determined and recorded after cooling the specimens to the room temperatures.

The exposure of mortar to such temperatures resulted in a noticable reduction in its strength, especially in the range 450-900 °C.

Keywords: Mortar, High temperature, Compressive strength, Cooling conditions

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans çalışmalarında, gerek derslerimde ve gerekse tez çalışmalarında, beni yönlendiren ve her türlü olanağı sağlayan danışman hocam Sayın Yrd. Doç. Dr. Ö. Fatih Eser başta olmak üzere İnşaat Mühendisliği bölümünde çalışmakta olan tüm hocalarıma ve laboratuvar personeline, haziran 2008 döneminde bölümümüzde tamamlanan “Kiremit Kırıkları Betonlarda Yüksek Sıcaklık Etkisinin İncelenmesi” başlıklı araştırma projesini destekleyerek yüksek sıcaklık fırınımızın laboratuvarımıza alınmasını sağlayan Tübitak Mühendislik Araştırma Grubu’na ayrıca aldığım her kararda beni destekleyen babam Recep Gülce ve annem Yurdanur Gülce’ye teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	v
SUMMARY.....	vi
TEŞEKKÜR	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xii
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	xvi
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	xvii
1. GİRİŞ.....	1
2. KONU İLE İLGİLİ GENEL BİLGİLER	2
2.1. Yüksek Sıcaklık Kaynakları	2
2.1.1. Yangın.....	2
2.1.2. Endüstri fırın bacaları	4
2.1.3. Hava alanı pistleri	4
2.2. Yangın ve Yüksek Sıcaklık Etkisi	4
2.2.1. Yüksek sıcaklığın betona etkileri	6
2.2.1.1. Çimento hamuru.....	6
2.2.1.2. Agregası	10
2.2.2. Yüksek sıcaklığın betonun fiziksel özelliklerine etkileri	12
2.2.2.1. Isı yayılım katsayısı	14
2.2.2.2. Isı iletkenlik katsayısı	15
2.2.2.3. Genleşme katsayısı	15
2.2.2.4. Özgül ısı.....	16

İÇİNDEKİLER (devam)

	<u>Sayfa</u>
2.2.2.5. Kütle kaybı	16
2.2.2.6. Birim hacim ağırlığı	16
2.2.2.7. Boşluk oranı	18
2.2.2.8. Isı şoku parametresi	18
2.2.3. Yüksek sıcaklığın betonun mekanik özelliklerine etkileri	19
2.2.3.1. Basınç dayanımı	20
2.2.3.2. Nemin basınç dayanımındaki rolü	21
2.2.3.3. Suda soğutmanın basınç dayanımındaki rolü.....	22
2.2.3.4. Çekme dayanımı.....	22
3. DENEYSEL ÇALIŞMA	24
3.1. Numune Üretiminde Kullanılan Malzemeler	25
3.1.1. Çimentolar	25
3.1.2. Agregalar	26
3.1.3. Su	27
3.1.4. Kimyasal katkı	28
3.2. Numune Üretimi	28
3.3. Yüksek Sıcaklık Uygulaması	30
3.4. Soğutma Süreci.....	30
3.5. Kontrol Deneyleri	31
3.5.1. Ultrases geçiş hızlarının belirlenmesi	31
3.5.2. Eğilme dayanımı.....	32
3.5.3. Basınç dayanımı.....	33
3.5.4. Birim ağırlık	33

İÇİNDEKİLER (devam)

	<u>Sayfa</u>
4. DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ.....	34
4.1. Ultrases Geçiş Değerlerinin Değerlendirilmesi.....	34
4.2. Eğilme Dayanımının Değerlendirilmesi.....	36
4.3. Basınç Dayanımının Değerlendirilmesi	38
4.4. Birim Hacim Ağırlıkların Değerlendirilmesi	40
 5. DENEY SONUÇLARININ İSTATİSTİKSEL ANALİZİ	 42
5.1. Varyans Analizi	42
5.1.1. Tek yönlü varyans analizi	43
5.1.2. Çoklu değişirli varyans analizi	43
5.2. Bilimsel Çalışmalarda P Değerinin Rapor Edilmesi	43
5.3. Yirmi Sekiz Günlük Havada Soğutma Uygulanmış Numunelerin Basınç Dayanımları.....	44
5.4. Yirmi Sekiz Günlük Suda Soğutma Uygulanmış Numunelerin Basınç Dayanımları.....	49
5.5. Elli Altı Günlük Havada Soğutma Uygulanmış Numunelerin Basınç Dayanımları.....	54
5.6. Elli Altı Günlük Suda Soğutma Uygulanmış Numunelerin Basınç Dayanımları.....	59
 6. SONUÇLAR.....	 65
 7. KAYNAKLAR DİZİNİ.....	 69

İÇİNDEKİLER (devam)

EKLER

Ek 1. Çizelgeler

Ek 2. Yapılan Deneysel Çalışma Fotoğrafları

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
2.1. Standart sıcaklık-zaman eğrisi	3
2.2. Yangın ve deneysel sıcaklık artışı zaman ilişkisi	5
2.3. Çimento hamurunda dayanım ve sıcaklık ilişkisi.....	7
2.4. Çimento hamurunda ağırlık kaybı ve sıcaklık ilişkisi	7
2.5. Boşluk suyu transferi	8
2.6. Doygun buhar basıncı ile sıcaklık arasındaki ilişki.....	9
2.7. Çimento pastasındaki tobermoritin sıcaklığa bağlı olarak dönüşüm derece ve oranı.....	10
2.8. Betonun bağıl basınç dayanımının kullanılan agrega türüne göre sıcaklıkla değişimi.....	12
2.9. Yangın hasarı görmüş betonun izotermine bağlı özellikleri.....	13
2.10. Betonda sıcaklık deformasyon ilişkisi.....	14
2.11. Çeşitli betonlar için α ısı yayılım katsayısı.....	15
2.12. Ağırlık kaybının sıcaklıkla değişimi.....	17
2.13. Normal betonda basınç dayanımı-sıcaklık ilişkisi.....	20
2.14. Normal betonda çekme dayanımı-sıcaklık ilişkisi.....	23
2.15. Eğilme dayanımının sıcaklıkla değişimi.....	23
3.1. Harç mikseri.....	29
3.2. Numunelerin kalıplara yerleştirilmesi.....	29
3.3. Numunelerin kalıplarda bekletilmesi.....	29
3.4. Numunelerin kuru.....	29
3.5. Isıl işlem safhası.....	30
3.6. Suda soğutma.....	31
3.7. Havada soğutma	31

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
3.8. Harç numunelerinde eğilme dayanımı deneyi	32
3.9 Harç numunelerinde basınç deney	33
4.1. Yirmi sekiz günlük harç numunelerinin sıcaklık-ultrases geçiş hızı ilişkisi	35
4.2. Elli altı günlük harç numunelerinin sıcaklık-ultrases geçiş hızı ilişkisi	36
4.3. Yirmi sekiz günlük harç numunelerinin sıcaklık-eğilme dayanımı ilişkisi	36
4.4. Elli altı günlük harç numunelerinin sıcaklık-eğilme dayanımı ilişkisi	37
4.5. Yirmi sekiz günlük harç numunelerinin sıcaklık-basınç dayanımı ilişkisi	38
4.6. Elli altı günlük harç numunelerinin sıcaklık-basınç dayanımı ilişkisi	39
4.7. Yirmi sekiz günlük harç numunelerinin sıcaklık-birim hacim ağırlık ilişkisi	40
4.8. Elli altı günlük harç numunelerinin sıcaklık-birim hacim ağırlık ilişkisi	41
5.1. Yirmi sekiz günlük havada soğutulmuş numunelerin ana etki büyüklükleri grafiği	45
5.2. Yirmi sekiz günlük havada soğutulmuş numunelerin etkileşimler grafiği	46
5.3. Yirmi sekiz günlük havada soğutulmuş numuneler için basınç dayanımı sıcaklık ilişkisi	46
5.4. Yirmi sekiz günlük havada soğutulmuş numunelerin basınç dayanımı ve sıcaklık ilişkisi için tek yönlü Anova analizi grafiği	47
5.5. Yirmi sekiz günlük havada soğutulmuş numunelerin basınç dayanımı ve çimento tipi ilişkisi için tek yönlü Anova analizi grafiği	48
5.6. Yirmi sekiz günlük havada soğutulmuş numunelerin basınç dayanımı ve sıcaklık arasındaki aralık grafiği	48
5.7. Yirmi sekiz günlük havada soğutulmuş numunelerin basınç dayanımı ve çimento tipi arasındaki aralık grafiği	49
5.8. Yirmi sekiz günlük suda soğutulmuş numunelerin ana etki büyüklükleri grafiği	50
5.9. Yirmi sekiz günlük suda soğutulmuş numunelerin etkileşimler grafiği	51
5.10. Yirmi sekiz günlük suda soğutulmuş numuneler için basınç dayanımı sıcaklık ilişkisi	51

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
5.11. Yirmi sekiz günlük suda soğutulmuş numunelerin basınç dayanımı ve sıcaklık ilişkisi için tek yönlü Anova analizi grafiği.....	52
5.12. Yirmi sekiz günlük suda soğutulmuş numunelerin basınç dayanımı ve çimento tipi ilişkisi için tek yönlü Anova analizi grafiği.....	53
5.13. Yirmi sekiz günlük suda soğutulmuş numunelerin basınç dayanımı ve sıcaklık arasındaki aralık grafiği.....	53
5.14. Yirmi sekiz günlük suda soğutulmuş numunelerin basınç dayanımı ve çimento tipi arasındaki aralık grafiği	54
5.15. Elli altı günlük havada soğutulmuş numunelerin ana etki büyüklükleri grafiği....	55
5.16. Elli altı günlük havada soğutulmuş numunelerin etkileşimler grafiği.....	56
5.17. Elli altı günlük havada soğutulmuş numuneler için basınç dayanımı sıcaklık ilişkisi.....	57
5.18. Elli altı günlük havada soğutulmuş numunelerin basınç dayanımı ve sıcaklık ilişkisi için tek yönlü Anova analizi grafiği.....	57
5.19. Elli altı günlük havada soğutulmuş numunelerin basınç dayanımı ve çimento tipi ilişkisi için tek yönlü Anova analizi grafiği.....	58
5.20. Elli altı günlük havada soğutulmuş numunelerin basınç dayanımı ve sıcaklık arasındaki aralık grafiği.....	58
5.21. Elli altı günlük havada soğutulmuş numunelerin basınç dayanımı ve çimento tipi arasındaki aralık grafiği	59
5.22. Elli altı günlük suda soğutulmuş numunelerin ana etki büyüklükleri grafiği.....	60
5.23. Elli altı günlük suda soğutulmuş numunelerin etkileşimler grafiği	61
5.24. Elli altı günlük suda soğutulmuş numuneler için basınç dayanımı sıcaklık ilişkisi.....	61
5.25. Elli altı günlük suda soğutulmuş numunelerin basınç dayanımı ve sıcaklık ilişkisi için tek yönlü Anova analizi grafiği.....	62
5.26. Elli altı günlük suda soğutulmuş numunelerin basınç dayanımı ve çimento tipi ilişkisi için tek yönlü Anova analizi grafiği.....	63
5.27. Elli altı günlük suda soğutulmuş numunelerin basınç dayanımı ve sıcaklık arasındaki aralık grafiği.....	63

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
5.28. Elli altı günlük suda soğutulmuş numunelerin basınç dayanımı ve çimento tipi arasındaki aralık grafiği	64
Ek 2.1. Numune üretiminde kullanılan çimento tipleri.....	81
Ek 2.2. Harç üretiminde kullanılan standart kum	81
Ek 2.3. Harçların mikserde karıştırılması.....	81
Ek 2.4. Harç karışımlarının hazırlanması	82
Ek 2.5. Numunelerin kalıplara yerleştirilmesi.....	82
Ek 2.6. Kalıplara yerleştirilmiş harç numuneleri.....	82
Ek 2.7. Kür havuzunda bekleyen harç numuneleri	83
Ek 2.8. Yüksek sıcaklık öncesi numunelerin etüvde kurutulması.....	83
Ek 2.9. Numunelerin fırına yerleştirilmesi.....	83
Ek 2.10. Yüksek sıcaklık uygulaması	84
Ek 2.11. Harç numunelerinin havada ve suda soğutma süreci.....	84
Ek 2.12. 900 °C sonrası suda soğutma uygulanan harç numunelerinin suda dağılması	84
Ek 2.13. Ultrases geçiş süresi deneyi	85
Ek 2.14. Eğilme deneyi	85
Ek 2.15. Basınç deneyi.....	85

ÇİZELGELER DİZİNİ

<u>Çizelge</u>	<u>Sayfa</u>
3.1. Numune grupları.....	24
3.2. Kullanılan çimentoların kimyasal ve fiziksel özellikleri.....	25
3.3. Kullanılan çimentoların mekanik özellikleri	26
3.4. Standart Rilem kumu özellikleri.....	27
3.5. Kullanılan şebeke suyunun kimyasal analizi.....	28
3.6. Harç numunelerinin karışım oranları	29
5.1. Yirmi sekiz günlük havada soğutulmuş numunelerin Anova tablosu.....	45
5.2. Yirmi sekiz günlük suda soğutulmuş numunelerin Anova tablosu.....	49
5.3. Elli altı günlük havada soğutulmuş numunelerin Anova tablosu.....	55
5.4. Elli altı günlük suda soğutulmuş numunelerin Anova tablosu.....	59
Ek 1. Harç numunelerinin 28 günlük ultrases geçiş hızları	77
Ek 2. Harç numunelerinin 56 günlük ultrases geçiş hızları	77
Ek 3. Harç numunelerinin 28 günlük eğilme dayanımları.....	77
Ek 4. Harç numunelerinin 56 günlük eğilme dayanımları.....	78
Ek 5. Harç numunelerinin 28 günlük basınç dayanımları	78
Ek 6. Harç numunelerinin 56 günlük basınç dayanımları.....	78
Ek 7. Harç numunelerinin 28 günlük birim hacim ağırlıkları	79
Ek 8. Harç numunelerinin 56 günlük birim hacim ağırlıkları	79

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklama</u>
Δ	Birim ağırlık
λ	Isıl iletkenlik katsayısı
α	Genleşme katsayısı
$\sigma_{\text{ç}}$	Çekme dayanımı
a	Isı yayılım katsayısı
a_1	Kare kesitin kenar uzunluğu
f_e	Eğilme dayanımı
F	F sınaması
l	Numune boyu
l_1	Mesnetler arası uzaklık
P	Isı şoku parametresi
P_k	Kırılma yükü
t	Yangın süresi
t_1	Ses geçiş süresi
t_2	t sınaması
T	Ortalama yangın gazı sıcaklığı
T_0	Başlangıç sıcaklığı
V_s	Ultrases geçiş hızı

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam)

<u>Kısaltmalar</u>	<u>Açıklama</u>
ASTM	American Society for Testing and Materials
BS	İngiliz Standardı
CaO	Kalsiyum oksit
Ca(OH) ₂	Kalsiyum hidroksit
CSH	Kalsiyum silikat hidrate
EN	Avrupa Standardı
H ₂ O	Su
MgO	Magnezyum oksit
Rilem	International union of laboratories and experts in construction materials
TS	Türk Standardı

BÖLÜM 1

GİRİŞ

Yapılarda dayanıklılık problemine yol açan başlıca fiziksel etkilerden biri de yüksek sıcaklıktır. Bu etki yapılarda kalıcı hasarlar oluşturarak yapının servis dışı kalmasına, can ve mal kaybına neden olabilmektedir (Aydın vd., 2003). Yüksek sıcaklığın kaynaklarından biri olan yangının betona ve betonarme yapılara etkisi 1922'den günümüze kadar araştırılmaktadır. Yapılan araştırmalarda yangın sırasında ve sonrasında malzemenin karmaşık davranışı, yapısal güvenlik ve yapının bütünlüğü anlaşılmaya çalışılmıştır (Khoury, 2000).

Günümüzde birçok ülkenin yangından koruma yönetmelikleri bulunmaktadır. Bu yönetmelikler bir binada bütün eleman ve bileşenlerin fonksiyonlarına, konum ve taşıyıcı olup olmadıklarına bakılmaksızın belirli süre yangına ve onun etkilerine direnç göstermelerini zorunlu kılmaktadır (Baradan vd., 2002). Binalardaki yangınlarda 1200 °C'ye kadar çıkan sıcaklıklar ölçülmüştür. Yapı malzemeleri bu sıcaklığa kadar ısıtıldığında ahşabın yandığı, çeliğin yumuşayıp dayanım kaybettiği, beton veya taşların ise parçalanıp döküldüğü görülmektedir. Şu halde önemli yapı malzemelerinden hiçbirisi bu derece yüksek sıcaklıklara dayanamaz. Ancak bunlar arasında beton, diğerlerine kıyasla biraz daha dayanıklıdır ve biraz daha uzun sürede parçalanır (Kocataşkın, 2000).

Bu çalışmada farklı çimento tipleri kullanılarak üretilen harç numunelerinde yüksek sıcaklık sonrası meydana gelen fiziksel ve mekanik özelliklerindeki değişimler incelenmiştir. Harç numunelerinde kullanılan agreganın aynı olması nedeniyle ortaya çıkan farklılıklar farklı çimento hamurlarının yüksek sıcaklık sonrası değişimlerine bağlıdır. Amaç deneyler sonucu ortaya çıkan farklılıkları, çimento tipi, uygulanan yüksek sıcaklık ve soğutma şekli göz önünde bulundurularak ortaya koymak ve kendi aralarında bir değerlendirme sunmaktır.

BÖLÜM 2

KONU İLE İLGİLİ GENEL BİLGİLER

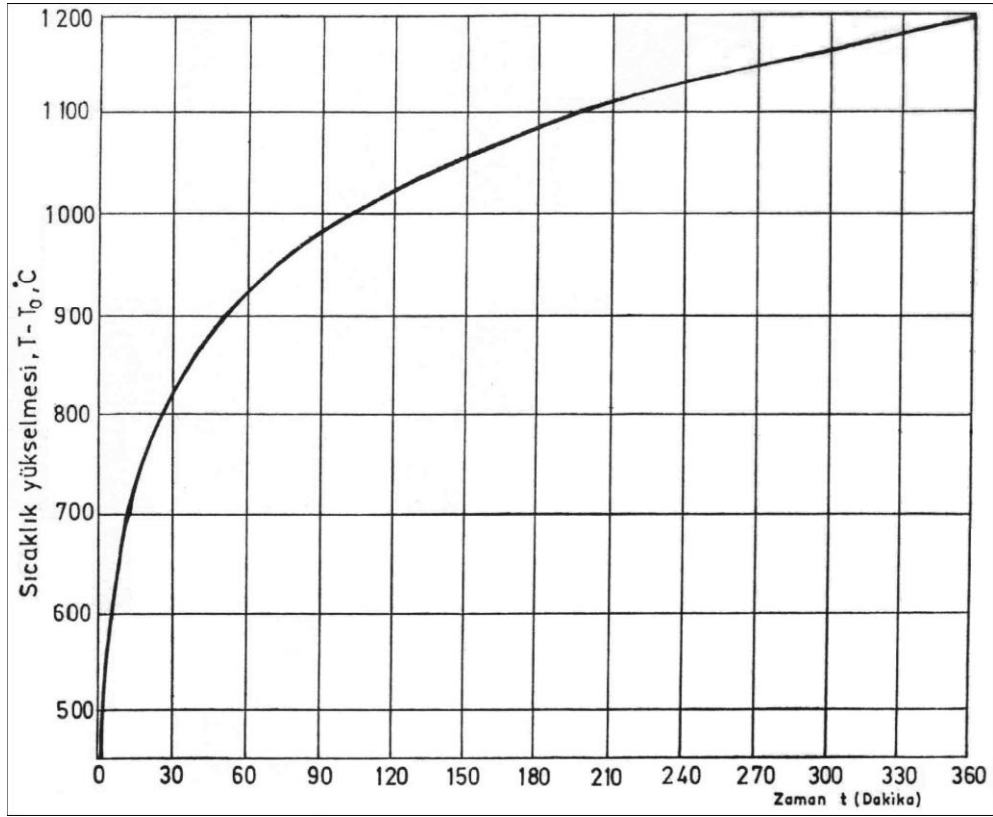
2.1. Yüksek Sıcaklık Kaynakları

Yapıya ve malzemeye zarar veren, hasara yol açan yüksek sıcaklık kaynakları, yangın, özel üretimlerden dolayı endüstri fırın bacalarında görülen sıcaklık ve hava alanı pistlerinde sürtünmenin neden olduğu ısınma ve nükleer reaktörler olarak gösterilebilir (Aköz ve Yüzer, 1994). Bu etkiler aşağıda sırası ile açıklanmıştır.

2.1.1. Yangın

Yanma, yakacakların oksijenle hızlı bir şekilde reaksiyona girerek, yakacak içinde depolanmış bulunan enerjinin, ısı enerjisi biçiminde açığa çıktığı kimyasal bir işlemdir. Bu işlem sırasında çıkan enerji, genellikle sıcak gazlar şeklinde olmasına rağmen, çok küçük miktarlarda elektromanyetik (ışık), elektrik (serbest iyonlar ve elektronlar) ve mekanik (ses) enerjiler şeklinde de ortaya çıkmaktadır. Yanma, yanıcı maddelerin oksijen ile kimyasal reaksiyon hızına, oksijen miktarına ve yanma bölgesindeki sıcaklığa bağlıdır (Ashre, 1997).

Yüksek sıcaklığa neden olan yangın ise katı, sıvı ve/veya gaz halindeki maddelerin kontrol dışı yanması olayıdır. Araştırmalar, tabii bir yangının genel olarak ateşleme, yavaş yanma, ısınma ve soğuma olmak üzere dört fazdan oluştuğunu göstermektedir. Ateşleme ve yanma fazları tüm parlama öncesi, ısınma ve soğuma fazları ise tüm parlama sonrası fazları olarak adlandırılmaktadır. Tüm parlama öncesi fazı gelişmekte olan yangın, tüm parlama sonrası fazı ise gelişmiş olan yangın durumunu göstermektedir (Aköz ve Yüzer, 1994).



Şekil 2.1. Standart sıcaklık-zaman eğrisi (TS 1263, 1983).

Şekil 2.1’de verilen standart sıcaklık-zaman eğrisinde, sıcaklığın 10 dakika gibi kısa bir zamanda yaklaşık 600 °C’ye hızla yükseldiği ve yangın süresince de 1200°C’ye ulaşabileceği görülmektedir, ISO-834 yangın eğrisi olarak tanımlanan bu eğri 2.1 bağıntısı ile ifade edilmektedir (TS 1263, 1983).

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

Denklemden, t yangın süresini (dakika), T₀ başlangıç sıcaklığını (20 °C), T yangın esnasında erişilen ortalama yangın gazı sıcaklığını (°C) göstermektedir (Haksever, 1991). Deneysel çalışmalarda kullanılacak fırının ısınma hızının bu bağıntıya uygunluğu şartı aranmaktadır (TS 1263, 1983).

2.1.2. Endüstri fırın bacaları

Endüstri fırın bacalarında sıcaklığın 1250-1300 °C'ye ulaştığı bilinmektedir. Günümüzde bacalardaki artık ısı enerjisinin geri kazanımı için ısı eşanjörleri, ısı reküperatörleri, döner tip ısıtıcılar, ısı boruları ve ısı pompaları gibi araçlar kullanılarak sıcaklık yaklaşık 200 °C'ye kadar düşürülebilmektedir (Avcı, 1984).

2.1.3. Hava alanı pistleri

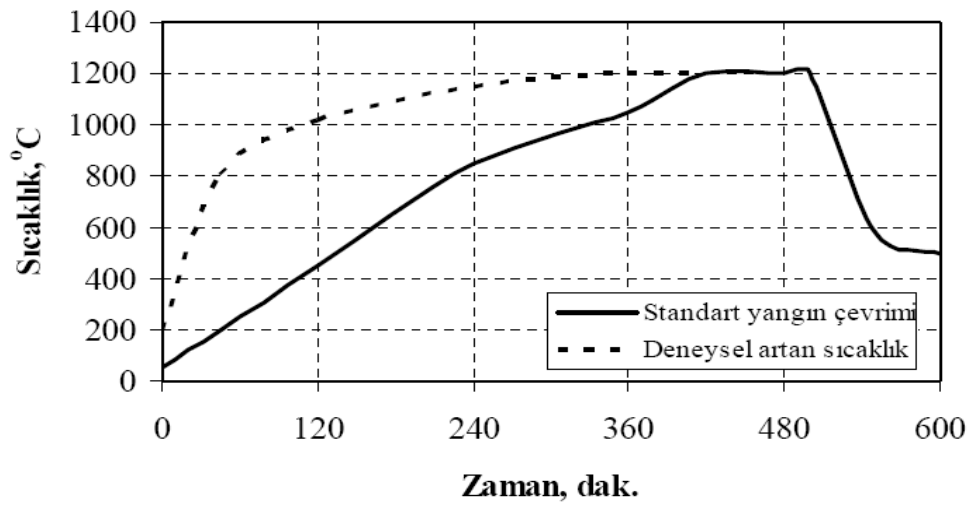
Uçakların kalkış ve inişlerindeki sürtünmeler ve jet motorlarından 260 km/saat hızla çıkan 196 °C'deki egzoz gazları, hava alanı pistlerinde sıcaklığın artmasına sebep olmaktadır. İniş ve kalkışlardaki tekrarlı ısınma ve soğuma etkisi ile pistlerde aşınma ve tozlanma görülmektedir. Pistler bu durumda yük alma kapasitelerini muhafaza etseler de hava alanının işlevleri kısıtlanır (Ramakrishnan vd., 1991).

2.2. Yangın ve Yüksek Sıcaklık Etkisi

Birçok yapı ve inşaatlarda potansiyel risklerden biride yangın kalıntılarıdır. Yapılarda beton oldukça fazla kullanılan bir yapı malzemesi olduğu için beraberinde betonda yangın etkisini araştırma talebini de doğurmuştur. Ancak yapı elemanlarında yangın etkisini benzetmek oldukça zordur. Çünkü betonlar yangın sırasında karmaşık, yüksek, geçici sıcaklık etkisinde kaldıklarından dolayı gerçek yangınların şiddetinin ve davranışının tahmin edilmesi güçtür. Yüksek sıcaklığa maruz kalan beton, belirli bir süre için önemli bir zarar görmez, zehirli gaz veya duman çıkarmaz. Ancak bu dayanıklılık, sınırlı süre ve belirli sıcaklıklar için geçerlidir (Baradan vd., 2002). Örneğin 600 °C'ye maruz kalan beton dayanımının %70'ini kaybetmektedir (Akman, 2000).

Yangının beton üzerindeki etkisi çok yönlü olup, yangının ısı derecesi 800 °C'ye çıktığı zaman çimento jeli hidrasyon suyunu bırakarak bağlayıcılık etkisini kaybeder. Etki, yangının süresi, donatı durumu, çimento veya agrega cinsi ve son olarak yapı elemanının yapı içindeki durumu gibi çeşitli faktörlere de bağlıdır. Yangın etkisine maruz kalmış bir beton yapı elemanının işe yarayıp yaramayacağı hakkında tam bir karara varmak için ancak çok köklü incelemeler ve laboratuvar deneyleri yapılması gerekir (Topçu, 2006).

Yangın koşullarının belirtildiği değişik ülke standartları vardır. Bunlardan birisi BS476: Kısım 20: 1987 betonda yangın etkisini araştıran çalışmalar için deney koşulları standardıdır (Peng et al., 2006). Standartta yer alan sıcaklık artışı ve zaman ilişkisi Şekil 2.2'de gösterilmiştir. Yangın, betonda artan yüksek sıcaklık deneylerindeki belli bir noktaya kadar benzerlik göstermektedir.



Şekil 2.2. Yangın ve deneysel sıcaklık artışı zaman ilişkisi (Peng et al., 2006).

Yapılan kaynak taraması deneysel çalışmaların artan sıcaklık koşullarında yapıldığını göstermektedir. Her ne kadar bu koşullar standart yangın koşullarından farklı da olsa, bu araştırmalar betonda ve harçlarda yangın etkisinin önemli bir kısmının anlaşılmasını sağlayabilmiştir. Bu nedenle harçlarda yangın etkisinden daha çok yüksek sıcaklık etkisi çalışmaları yapılmış ve sonuçları yorumlanmıştır.

2.2.1. Yüksek sıcaklığın betona etkileri

Genellikle betonda yüksek sıcaklık etkisi çalışmaları, yüksek sıcaklık altındaki betonun yapısında meydana gelen gerilme ve şekil değiştirmeleri belirlemek, betonun yangın dayanımını geliştirmek ve yüksek sıcaklık altında kalan beton malzemelerin (elemanların) özelliklerindeki azalmaları araştırmak amacıyla yapılmaktadır. Yapılan çalışmalarda yangın veya yüksek sıcaklık etkisinde kalan betonların gerçek davranışları, çevresel ve malzeme faktörlerinin ikisini de içeren aynı zamanda birbirlerini etkileyen bu faktörlerin sonuçlarına bağlı olduğunu göstermektedir (Demir, 2008).

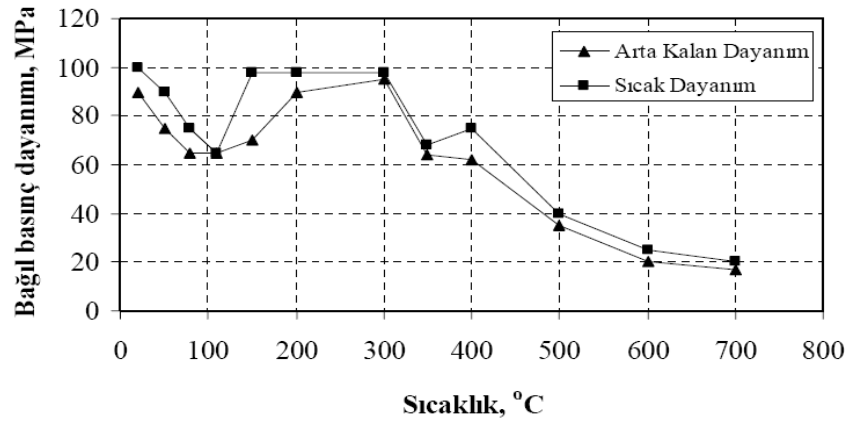
Yüksek sıcaklığın betona etkisi, betonun maruz kaldığı sıcaklık ve sürenin yanı sıra çimento hamuru fazı ve agrega türüne bağlı olarak ta değişir ve bu etki betonun basınç dayanımının belirgin bir şekilde azalması ile sonuçlanır (Akman, 2000; Riley, 1991). Arta kalan dayanımlara 1-3 saat uygulanan yüksek sıcaklığın önemli etkisinin olduğu, uygulama süresinin artmasıyla etkinin azaldığı, bu nedenle meydana gelen dayanım azalmalarının ilk iki saat içerisinde gerçekleştiği sonucu ortaya çıkmıştır (Topçu ve Demir, 2007).

Çalışmanın konusu çimento hamuru olması nedeniyle yüksek sıcaklık etkisindeki davranış çimento hamuru ve agregalar için ayrı ayrı ele alınmıştır.

2.2.1.1. Çimento hamuru

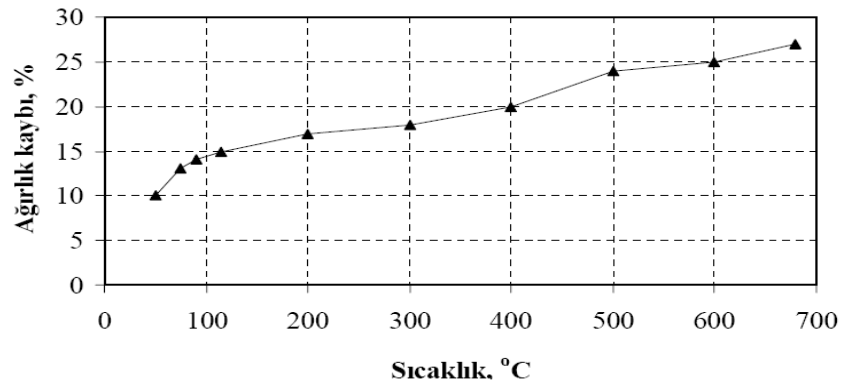
Çimento hamuru, ilk ısıtma esnasında çok istikrarsız olan bir bileşendir. Çünkü önemli fiziksel ve kimyasal dönüşümler geçirir. Yapısındaki serbest su yaklaşık 100-200 °C civarındaki düşük sıcaklıklarda buharlaşır. Yaklaşık 300 °C ve üzerinde yapısındaki bağlı su kaybı ve kimyasal çözülme önemlidir. Isıl etkiler yaklaşık 600 °C'nin üstünde erimeyle sonuçlanarak önem kazanır (Khoury, 1992).

Yüksek sıcaklık etkisi altında kalmış sertleşmiş çimento hamurunun mekanik özelliklerine ilişkin bir araştırma da Dias et al. (1990) tarafından yapılmıştır. Şekil 2.3’de görüldüğü gibi yaklaşık 120 °C’de çimento hamurunun sıcak ve bağıl dayanımları en küçük değerlerdir.



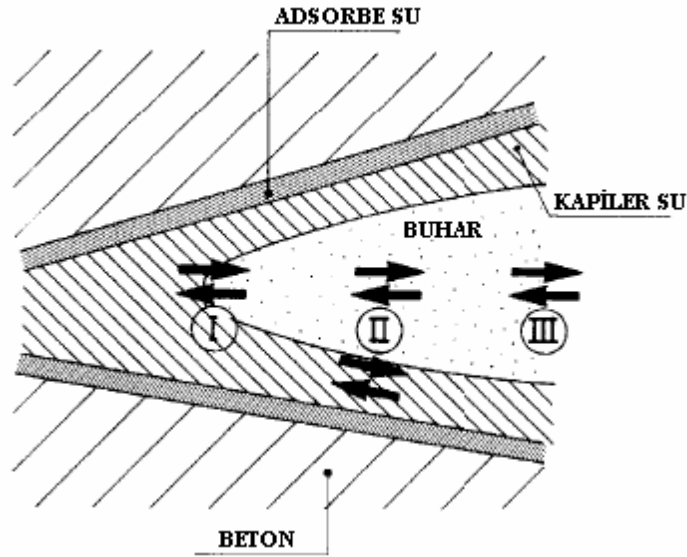
Şekil 2.3. Çimento hamurunda dayanım ve sıcaklık ilişkisi (Dias et al., 1990).

Dayanımın 50-120 °C aralığında en küçük düzeyde olmasının nedeni bünyesindeki suyun buharlaşma eğilimi ile hamurun şişerek aderans kaybına yol açtığı düşünülmektedir. Bundan sonra çimento hamurunun 300 °C’ye kadar olan sıcaklığa kadar dayanımın iyileştiği görülmektedir. Yapılan çalışmalarda artan sıcaklıkla beraber sertleşmiş çimento hamurunda ağırlık kaybı artar (Şekil 2.4).



Şekil 2.4. Çimento hamurunda ağırlık kaybı ve sıcaklık ilişkisi (Dias et al., 1990).

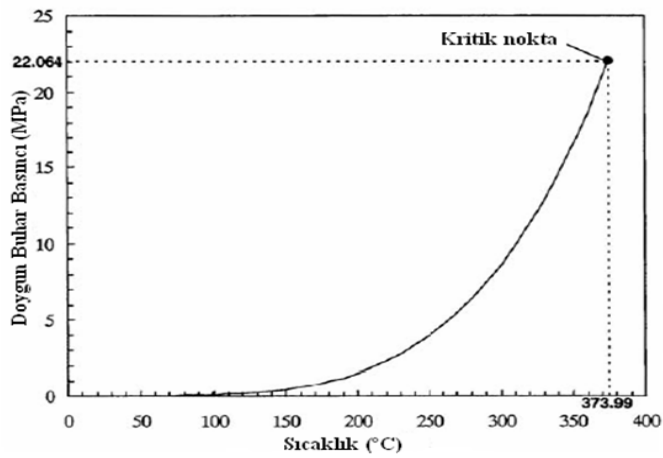
Şekil 2.5'te basitleştirilmiş boşluk suyu transferi görülmektedir. I suyun buharlaşması veya yoğuşması, II betonun içine suyun transferi, III ise suyun dış çevreye transferini temsil etmektedir (Andrade vd., 2003b).



Şekil 2.5. Boşluk suyu transferi (Andrade vd., 2003b).

Yüksek termal gerilmelere maruz kalmış betonlarda çatlak oluşumunun birçok nedeni vardır. Çimento hamurundaki başlangıç mikro çatlakların mevcudiyeti, sertleşirken oluşan rötrein sonucudur. Bu çatlaklar yüksek sıcaklıklarda kolaylıkla ilerlerler. Bunların bazıları 200 °C'nin altındaki sıcaklıklarda yok olurlar, sonuçta az miktarda ama daha büyük çatlaklar oluşur. Anhidrit tanelerinin etrafındaki mikro çatlaklarda bu sıcaklıkta gelişir. 300 °C civarında çimento fazını geçerler ve agregaları çevrelerler. Sıcaklık 500 °C'nin üzerindeyken, çatlaklar çimento hamurunda gelişir, boyutları 0.01 mm'den büyüktür. Ayrıca agregaları çatlatırlar, bunların boyutları ise 0.05 mm'den büyüktür ve artık çatlaklar gözle görülebilir (Alonso vd., 2003a). Beton bünyesinde su üç farklı şekilde bulunmaktadır. Bunlar, jel yapıları çimento hamurundaki kalsiyum silikat hidratinin (CSH) katı öğelerini birbirine bağlayan adsorpsiyon suyu, hidratlardaki kimyasal bağlı su ve kılcal boşluklarda serbest sudur. Çimento türüne ve üretim sırasındaki su/çimento oranına bağlı olarak, betonda hacminin %4'ü kadar bulunabilen serbest su 100 °C'de, kimyasal bağlı su ise 300 °C'de buharlaşmaktadır. Sıcaklık etkisi ile bu mertebedeki suyun kaybı ile oluşacak büzülme ve beton içinde

oluşan buhar basıncı, donatı beton örtüsünün çatlamasına ve parçalanarak kopmasına neden olur. Beton örtünün tahrip olması sonucu donatı daha yangının başlangıcında sıcak gazla temasa geçer (Akman, 2000). Şekil 2.6’da boşluk suyu basıncı ile sıcaklık arasındaki ilişki görülmektedir. 373.99 °C’de 22.64 MPa kritik su basıncı oluşmaktadır. Kritik noktanın üstünde su buhar halinde, altında ise sıvı halinde kabul edilir (Khoury vd., 2003).



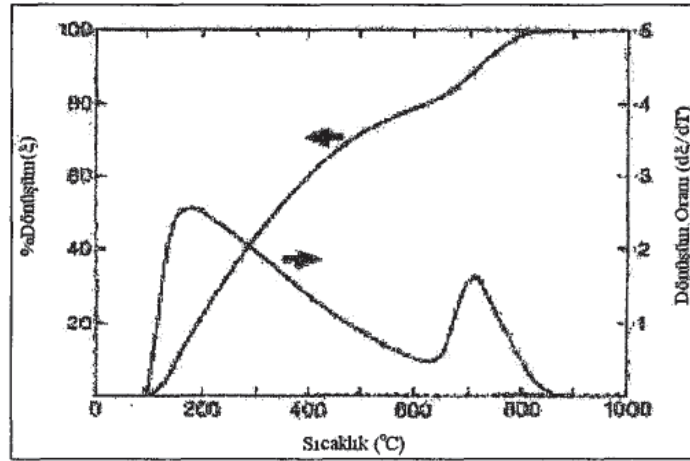
Şekil 2.6. Doygun buhar basıncı ile sıcaklık arasındaki ilişki (Khoury vd., 2003).

Bazı araştırmacılar 100 °C civarında permeabilitede azalma bulmuşlardır. Bu diğer araştırmalarda aynı bölgede düşük basınç dayanımı bulunmasıyla çelişir. Olası tek açıklama artan basınçtan dolayı suyun yoğunlaşmasıdır çünkü nemli betonun düşük dayanım gösterdiği bilinir. Benzer sıcaklık aralıklarında etrenjitin yok olmasıyla da ilişkili olabilir. Bu olay çok miktarda suyun serbest kalmasını sağlar ve taşıyıcı fazların azaldığı farz edilir (Andrade vd., 2003b).

Çimento hamuru %70-80 tabakalı CSH jeli, %20 Ca(OH)_2 ve diğer kimyasal bileşenlerden oluşur. Ca(OH)_2 , 530 °C civarında sönmemiş kirece dönüşür. Bu dönüşümde %33’e varan bir büzülme oluşur. Yangın sırasında sıkılan su ile CaO tekrar Ca(OH)_2 ’ye dönüşür, bu olay %44 mertebesinde bir hacim artışına neden olur. Bu hacim değişimleri sonucu bünyede çatlaklar oluşur, beton ufalanır, boşluklu bir yapıya dönüşür. Ca(OH)_2 ’nin boşluklardan süzülmesi yangın sonrasında yüzeyde beyaz

lekeler oluşturur. Bu lekelerin varlığı yangında sıcaklığın 530 °C'nin üzerine çıktığının kanıtıdır. Yüksek fırın cürufu ve alüminli çimentolarla üretilen betonlarda Ca(OH)_2 'nin az olması nedeni ile bu lekeler daha az olabilir (Akman, 2000).

Ca(OH)_2 'in CaO ve H_2O 'ya dönüşümü 500 °C civarında olurken, Şekil 2.7'de görüldüğü gibi CSH'nin dehidratasyonu 110 °C'den itibaren başlamaktadır (Scherefle, 2003). Her iki olay da çimento pastasındaki katı madde miktarının azalmasına neden olur.



Şekil 2.7. Çimento pastasındaki tobermoritin (CSH) sıcaklığa bağlı olarak dönüşüm (dehidratasyon) derecesi ve oranı (Scherefle vd., 2003).

2.2.1.2. Agrega

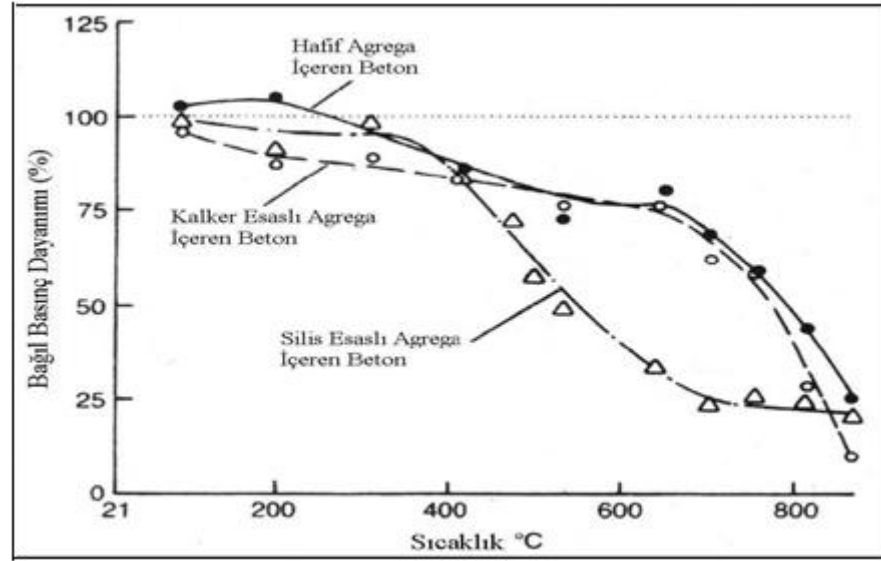
Agregalar betonda %60-80 arasında bir hacmi doldururlar. Özelliklerindeki farklılıklar ısıtma sırasında betonun termal genleşme katsayısı ve termal iletkenliğini ve performansını önemli derecede etkiler (Alonso vd., 2003b). Agregaların yüksek sıcaklıkta betona etkisi mineral yapılarına bağlıdır ve yüksek sıcaklığa dayanıklı oldukları söylenebilir. Silis esaslı agregalar için kritik sıcaklıklar 250 °C ile 575 °C'ler arasındadır (Perkins, 1986).

Yüksek sıcaklıklarda karbon bileşimi ayrışır ve 1200 °C’de erir (Haddad vd., 2004). Kumların büyük çoğunluğunu teşkil eden kuvarz, 575 °C’de yaklaşık %5.7’lik bir hacim artışı ve endotermik bir reaksiyonla α kuvarzdan β kuvarza dönüşür (Alonso vd., 2003b). Kalker ve dolomitten oluşan agregalar 700 °C’ye kadar kararlıdırlar (Alonso vd., 2003b).

800-900 °C’lerde CaO ve MgO’ya dönüşüm söz konusudur (Akman, 2000). Kalkerin ve dolomitin kalsinasyonu endotermik bir olaydır ve sıcaklığın etkisi ile CO₂’nin ayrışması, MgO ve CaO’nun oluşması büzölmeye neden olur (Khoury, 1992). Gerek soğuma esnasında ortamdaki nemin absorplanması gerekse söndürme anında sıkılan suyun etkisiyle Ca(OH)₂ tekrar oluşur. Bu büzölme ve genleşmeler dayanımda ciddi azalmalar meydana getirir (Perkins, 1986).

Nükleer reaktörlerde kullanılan ağır betonlar 400-800 °C arasında sıcaklığa maruz kalırlar. Sakr vd. (2005) tarafından yapılan deneysel çalışmada çakıl (kum), barit ve ilmenite agregaları kullanılarak üretilen betonlar 250, 500, 750 ve 950 °C’ye maruz bırakılmıştır. Kontrol deneyleri sonunda ilmenite kullanılarak üretilen ağır betonlar fiziksel ve mekanik açıdan en yüksek performansı göstermiştir.

Khoury’nin (1992) yapmış olduğu bir derlemede Abrams’ın çalışmasına yer verilmiş ve bu çalışmada üç farklı tür agreganın kullanıldığı beton numunelere yüksek sıcaklık etkisi araştırılmıştır. Çalışmada 600 °C’ye kadar ısıtılan kalker esaslı ve hafif agregalı betonların basınç dayanımlarının silis esaslı agregalara göre daha yüksek olduğunun gözlendiği belirtilmiştir (Şekil 2.8).



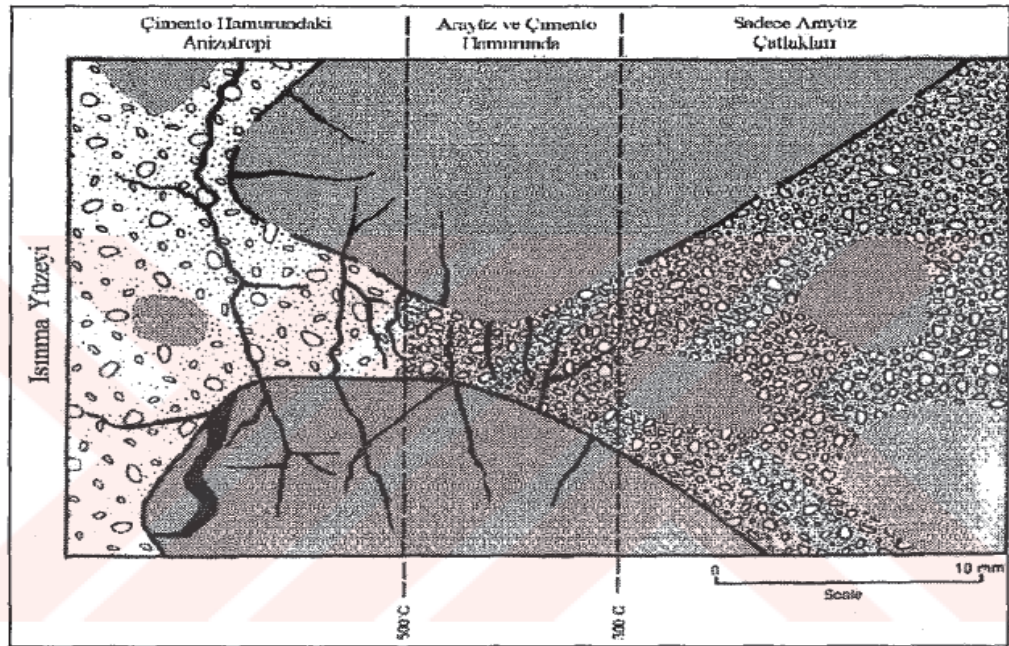
Şekil 2.8. Betonun bağıl basınç dayanımının kullanılan agrega türüne göre sıcaklıkla değişimi (Khouri, 1992).

Granit ve bazalt gibi volkanik kayalar ise 1000 °C'ye kadar kararlı yapıda kalabilmektedir. Ancak sıcaklığın aniden artması ve azalması parçalanmalara neden olabilir (Perkins, 1986). Pomza, köpük cüruf ve genleştirilmiş kil ürünleri gibi hafif agregaların yangın dirençleri yüksektir. Hafif agregalardan üretilmiş betonların ısı iletkenliği düşüktür (Shoaib vd., 2001). Allen ve Desai (1967) tarafından yapılan deneysel bir çalışmada farklı tip agregaların kullanıldığı betonlar 300 °C sıcaklığa maruz bırakılmış, agrega olarak killi ateş tuğlasının kullanıldığı betonlar, en iyi mekanik özelliği göstermiştir. Genellikle silis içermeyen agregalar, örneğin kalker ve volkanik kökenli agregalar ile üretilen betonlar yüksek sıcaklık etkisine karşı daha dayanıklıdır (Postacıoğlu, 1987).

2.2.2. Yüksek sıcaklığın betonun fiziksel özelliklerine etkileri

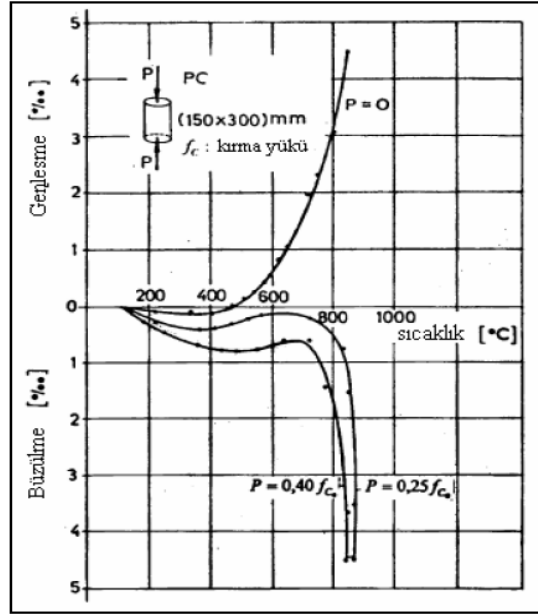
Yüksek sıcaklık, betonun ısı yayımına, ısı iletkenliğine, ısıl genleşmesine, özgül ısısına, birim ağırlığına ve rengine etki eder. Bu fiziksel değişimler sırasında betonun mekanik özelliklerinde de değişiklikler meydana gelir. Beton yüksek sıcaklık etkisinde kalırsa, düşük ısı iletkenliğine sahip yüzey tabakasının oluşması ile ısı

yayınımı azalır. Bunun sonucu olarak yüksek sıcaklığa maruz yüzey ile betonun iç kısımları arasında sıcaklık farkları oluşur. Riley (1991) bir deneysel çalışmada, 30 mm çapında 60 mm yüksekliğinde silindir harç numuneleri yüzeyden itibaren ısıtmış ve sıcaklıkları 5 adet termokupul ile ölçerek izotermi çizmiş ve bu noktalardan aldığı ince kesitlerin analizi ile betonun fiziksel özelliklerinin bu izotermilere benzer değişimler gösterdiğini belirtmiştir. Şekil 2.9'da görüldüğü gibi çatlak kısım bütün numunelerde, yüksek sıcaklığa maruz kalan yüzeyinden itibaren 25-30 mm içeriye girmiştir. 300 °C'den daha düşük sıcaklığa maruz kalan bölgelerde yerel ara yüz çatlakları, 300-500 °C arasında ara yüz ve çimento pastasında, 500 °C'nin üzerindeki sıcaklıklarda ise çimento pastasında ve agrega tanelerinde ciddi çatlaklar meydana gelmiştir. Bu da betonun anizotropik özelliğinin başlangıcıdır. Yüksek sıcaklığa maruz kalmış bir betonda anizotropik özellikler gözleniyorsa, sıcaklık 500 °C'yi aşmış demektir (Riley, 1991).



Şekil 2.9. Yangın hasarı görmüş betonun izotermine bağlı özellikleri
(Riley, 1991).

Papayianni vd. (2005) tarafından Şekil 2.10’da görüldüğü üzere 150 mm çapında 300 mm yüksekliğindeki silindirik beton numunelerinde yüksek sıcaklık etkisi esnasında yapılan ölçümlerde yüksüz durumda 400 °C’ye kadar büzülme daha sonra genleşme gözlenmiştir.

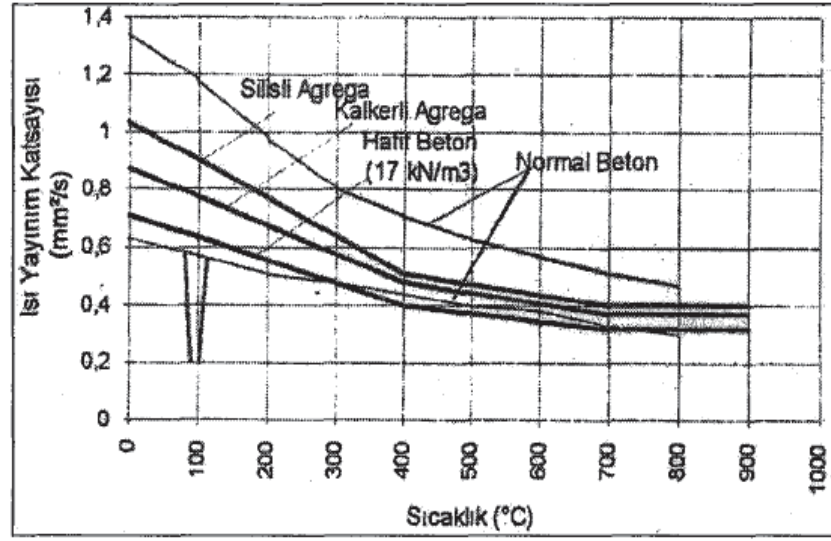


Şekil 2.10. Betonda sıcaklık deformasyon ilişkisi (Papayianni vd., 2005).

2.2.2.1. Isı yayılım katsayısı

Yüksek sıcaklık etkisinin nedenlerinden biri olan yangından, ısı enerjisinin bir kısmı emilir. Emilen ısı sıcaklığın yükselmesine neden olur. Bu olayda ısı yayılım katsayısı (α , mm^2/sn) etkili olur.

Isı yayılım katsayısı, Şekil 2.11’den de görüldüğü gibi, sıcaklık arttıkça azalmaktadır. Bu azalma özellikle 100 °C civarında bünyedeki suyun buharlaşması nedeniyle daha belirgindir.



Şekil 2.11. Çeşitli betonlar için a ısı yayılım katsayısı (CEB, 1991).

2.2.2.2. Isı iletkenlik katsayısı

Yapılan araştırmalar, betonun ısı iletimine etki eden temel unsurun agregası türü olduğunu göstermektedir. Betonun kalker ve dolomit esaslı agregalarla üretilmesi durumunda λ büyük değerler almaz. Buna karşın silis esaslı agreganın kullanıldığı betonda λ 'nın %15-20 daha büyük olduğu kabul edilir. Isı iletim katsayısına etki eden diğer iki önemli unsur, boşluk oranı ve boşluk yapısı ile su içeriğidir. Suyun ısıyı havaya göre daha fazla iletmesinden dolayı kuru haldeki bir cisimde gözeneklerin fazla olması λ 'nın düşmesine yol açar. Yüksek sıcaklık etkisinde kalan betonun, gözeneklerinden su kaybettiği, çimentonun dehidratasyonu ile boşluklu bir yapıya dönüştüğü ve ısı iletim katsayısının azaldığı bilinir (Aköz ve Yüzer, 1994).

2.2.2.3. Genleşme katsayısı

Malzemelerin şekil değiştirmesini de etkileyen ısıya ilişkin bir diğer özelliği de ısı genleşmesidir. Betonun genleşme katsayısı (α , $1/^\circ\text{C}$), üretimde kullanılan agregaların genleşmesine bağlıdır. Çimento hamurunun α 'sı ($11 \cdot 10^{-6}$ - $20 \cdot 10^{-6}$ $1/^\circ\text{C}$) agregalarınkinden büyüktür. Genleşme katsayısı en düşük olan doğal taş kalkerdir.

Sıcaklık arttıkça α artmaktadır. Yüksek sıcaklıklarda termik genleşmelerdeki farklılıklardan dolayı oluşan gerilmeler çimento hamuru ile agrega ara yüzünde çatlamalara neden olur (CEB, 1991; Postacıoğlu, 1987).

2.2.2.4. Özgül ısı

Betonun özgül ısısı, diğer bir deyişle bir gramının sıcaklığını 1 °C arttırmak için gerekli olan ısı enerjisi, sıcaklıkla çok az değişir. Bu büyüklüğe agreganın önemli etkisi yoktur (Aköz ve Yüzer, 1994; Aköz vd., 1995).

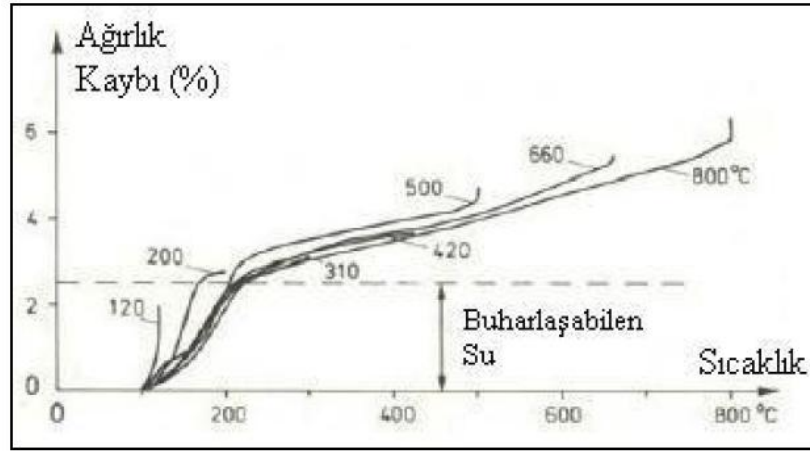
2.2.2.5. Kütle kaybı

Yerleştirme sırasında beton ıslak, boşluklu bir malzemedir. Normal ve yüksek dayanımlı betonlar 70 °C'de ilk kütlelerinin % 99'a kadarını korumaktadırlar. Betonda bulunan serbest su 70 ile 120 °C arasında buharlaşmaktadır. Normal ve yüksek dayanımlı betonlar 120 °C'de aynı miktarda su kaybetmektedirler. Kütlelerindeki kayıplar sadece % 1.4 civarındadır. En yüksek kütle kaybı 120 ile 300 °C arasında % 7 civarındadır. Bunun nedeni sertleşmiş betonda bulunan bağlı suyun kurumasıdır. Kütle kaybı 300 ile 600 °C arasında kısmi olarak daha az önem taşımaktadır. Artan sıcaklıklarda yüksek dayanımlı betonlarda kayıp daha azdır. Bunun nedeni büyük olasılıkla yüksek dayanımlı betonun daha az kalsiyum hidroksit içermesidir, bu durum mineral katkıların puzolonik etkisinin sonucudur (Cülfik, 2001).

2.2.2.6. Birim hacim ağırlığı

Sıcaklığın artması ile boşluklardaki suyun buharlaşması sonucu ağırlık azalır, genleşme nedeniyle hacim artar (Aköz vd., 1995). Porozite ve su içeriği betonun yangından sonraki hasar kontrol parametreleridir (Andrade vd., 2003a). Isıtma sırasında

betondaki ağırlık kaybı genellikle porozitenin artmasıyla sonuçlanır. Bu artış normal ve yüksek dayanımlı betonlar için yaklaşık lineer bir artıştır. Buna karşın ultra yüksek dayanımlı betonlar için bu geçerli değildir. Anhidrit çimento tanelerinin çokluğu ve kılcal boşlukların neredeyse olmaması buharın salıverilmesini zorlaştıran nedenlerdir, fakat ağırlık kaybının derecesi arttıkça porozite etkili bir şekilde artar (Alonso vd., 2003a). Ağırlık ve hacimdeki bu değişimler sonucu birim hacim ağırlığı azalır. Ancak bu azalma ihmal edilebilir düzeydedir (Aköz vd., 1995).



Şekil 2.12. Ağırlık kaybının sıcaklıkla değişimi (Anderberg, 2003).

Anderberg sıcaklığın etkisi ile birim ağırlığın azalmasına sebep olan ağırlık kaybını silis esaslı agrega ile üretilen betonda araştırmış, bu çalışma sonucunda ağırlık kaybının sıcaklıkla değişimi Şekil 2.12’de verilmiştir (Anderberg, 2003). Schneider yaptığı çalışmada 1000 °C’ye kadar yoğunluğun %11-13 arasında azaldığını belirtmiştir (Schneider, 1976).

Silis dumanı ve uçucu kül mineral katkıları kullanılarak yapılan başka bir çalışmada suda soğutma etkisi havada soğutmaya nazaran daha az boşluk kalmasını sağlamıştır. Suda soğutma, mikro yapının yoğunluğunun artmasına yardımcı olur. Bunu yüksek sıcaklık etkisinden sonra dehidrate olmuş çimento hamuru bileşenlerinin tekrar hidrate olmasını sağlayarak yapar (Alonso vd., 2003a).

2.2.2.7. Boşluk oranı

Gözeneklilik ölçümleri 120 °C'nin altındaki sıcaklıklarda beton boşluk oranının çok az değişiklik gösterdiğini sergilemektedir. Toplam boşluklar ve dağılım eğrisinin şekli, 25 ile 20 °C arasında boşluklu beton yapısının (normal ve yüksek dayanımlı) kayda değer ölçüde değişime uğramadığını göstermektedir. Yüksek dayanımlı betonların 25, 70 ve 120 °C sıcaklıklarda sabit bir mevcut toplam boşluk oranına sahiptir. Katı mikro yapısı çok fazla değişime uğramamıştır (Cülfik, 2001). Hem yüksek dayanımlı hem de normal dayanımlı betonlar için boşluk dağılımları artan sıcaklıkla birlikte daha büyük boşluk boyutlarına ulaşarak artmaktadır. Betonun sertleşmiş çimento hamurundaki toplam boşluk oranı 300 °C'den 600 °C'ye kadar normal beton için yaklaşık % 148 ve yüksek dayanımlı beton için % 86 oranında önemli bir şekilde artmaktadır (Cülfik, 2001).

2.2.2.8. Isı şoku parametresi

Gevrek malzemelerde sıcaklık değişimleri hızlı ve sıcaklık gradyanı yüksek ise büyük ısıl gerilmeler ve dolayısıyla çatlamlar oluşabilir. Isıl şoku denilen bu olay ısı iletimine ve ısıl genleşmeye büyük ölçüde bağlıdır. Isı iletimi yüksek ve ısıl genleşmesi küçük malzemelerde ısıl enerji hızla çevreye yayılır bu nedenle sıcaklık gradyanı düşük, boyut değişimleri az, dolayısıyla gerilmeler küçük olur. Malzemelerin ısı sokuna dayanıklılığını belirtmek için ısı şoku parametresi (P) kullanılır. Isıl şoka dayanıklılık yüksek ısı iletimli ve yüksek çekme dayanımlılarda büyük, ısı genleşmesi ve elastisitesi büyük olanlarda ise küçük olur. Bu etkenlere bağlı olarak ısı şoku parametresi λ ısı iletim katsayısına, α ısıl genleşme katsayısına, σ_c malzemenin çekme dayanımına ve E elastisite modülüne bağlı olarak 2.2 bağıntısı ile hesaplanır (Onaran, 2000).

$$P = \frac{\lambda \cdot \sigma_c}{E \cdot \alpha} \quad (2.2)$$

2.2.3. Yüksek sıcaklığın betonun mekanik özelliklerine etkileri

Beton numuneleri yüksek sıcaklık etkisi altında kaldıklarında, mekanik özellikleri olumsuz yönde etkilenir. Bu durum hem yapısal güvenliğe hem de dayanıklılığa zarar verir. Beton, betonarme yapıların ana yük taşıyıcı parçalarından biri olduğundan yüksek sıcaklıklarda betonun mekanik özelliklerinde meydana gelen değişiklikleri bilmek çok önemlidir. Daha da önemlisi betonun yüksek sıcaklık sonrası arta kalan dayanım değerlerinde meydana gelen değişimleri saptamak önemlidir. Nükleer reaktörlerin ikincil engelleme duvarları ve kömür gazlaştırma tankları gibi özel yapılarda bu değişimler çok önemlidir (Cülfik, 2001).

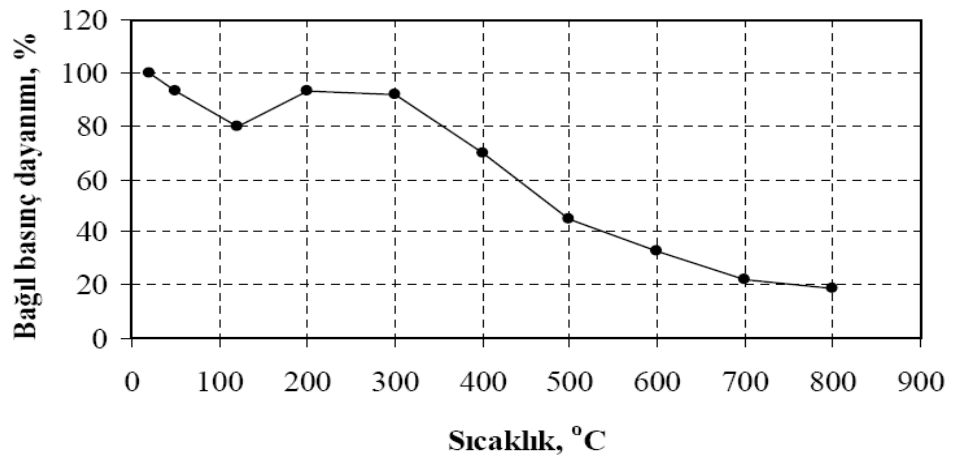
Genel olarak, betonda patlayarak kabuk atma yangın veya yüksek sıcaklığın neden olduğu mekanik özelliklerinde kayıpların artmasına neden olmaktadır. Deneysel sonuçlar 20 °C ile 400 °C arasında değişen sıcaklıklarda basınç dayanımının korunabileceğini veya artabileceğini belirtmiştir (Chan et al., 1999a,b; Luo et al., 2000). Basınç dayanımındaki önemli kayıplar 400 ile 600 °C arasında meydana gelmektedir. Orijinal basınç dayanımının çoğu 600 ile 800 °C arası kaybedilmektedir.

Yüksek sıcaklık etkisinde kalan betonların arta kalan dayanımların araştırıldığı birçok veri doğal soğutma koşulları altında elde edilmiştir. Ancak su sıkılması, suya daldırma veya su ile söndürme gibi işlemlerin kullanıldığı soğutma şekillerinde bu dayanım kayıpları farklılık göstermektedir. Betonun mekanik özelliklerine soğutma şeklinin etkisi büyüktür. Suyla soğutmayla havada soğutma karşılaştırıldığında, suyla soğutulan beton numunelerin dayanımlarında havada soğutulan numunelerin dayanımlarına göre çok ciddi dayanım azalmaları meydana gelmektedir (Demir, 2008). Yüksek sıcaklığın betona etkileri aşağıda ayrı ayrı incelenecektir.

2.2.3.1. Basınç dayanımı

Yüksek sıcaklığa maruz kalan betonun basınç dayanımına, çimento tipi, agrega türü, su/çimento oranı gibi kullanılan malzeme özellikleri ve sıcaklığa maruz kalınan süre, nem durumu, ısınma ve soğuma hızı, yükleme durumu gibi çevresel faktörler etken olmaktadır (Neville, 2000).

Normal dayanımlı betonun yüksek sıcaklıkta tek eksenli basınç dayanımı Şekil 2.13'te gösterilmiştir. İlk etapta artan sıcaklıkla beraber (120 °C sıcaklığa kadar) meydana gelen düşüşlerden sonra betonun tek eksenli basınç dayanımı artar. Dayanım 200 °C ve üstü sıcaklıklarda tekrar düşmeye başlar. Basınç dayanımı 700 °C'de başlangıç değerine göre % 80 değer kaybeder (Cülfik, 2001). Normal betonun basınç dayanımı kür koşullarına bağlı olarak değişmezken, yüksek sıcaklıklarda beton dayanımındaki düşüşün nedeni olarak aderans bozulması ve çimento hamurunda kalsiyum silika hidrat jellerinin yapısının bozulması ve agregadaki ısıl genleşme farklılıkları olarak değerlendirilmektedir (Yamazaki et al, 1995; Cülfik, 2001).



Şekil 2.13. Normal betonda basınç dayanımı-sıcaklık ilişkisi
(Yamazaki et al, 1995; Cülfik, 2001)

Soğutma türünün de yüksek sıcaklığa maruz betonun basınç dayanımına etkisi vardır. Su ile soğutulan numunelerin basınç dayanımlarındaki azalma (Şekil 2.14) havada soğutulan numunelere nazaran daha fazladır (Neville, 2000; Yüzer vd., 2004).

Çimento tipleri olarak Cem I ve Cem III'ün kıyaslandığı çalışmada Cem III ile üretilen betonların, basınç dayanımlarının, CEM I ile üretilen betonların basınç dayanımlarına göre daha yüksek olduğu görülmektedir. Her iki çimento tipinde de 56 günlük kür uygulanan numunelerin basınç dayanımları, 28 günlük numunelere göre daha yüksektir. Her iki kür süresi dikkate alındığında ise; basınç dayanımlarındaki düşüşün 300 °C'den sonra belirginleştiği görülmüştür. Her iki çimento tipi ile üretilen betonların basınç dayanımlarındaki kayıplar 600 °C'de % 50'leri aşmıştır (Özbey, 2009).

Savva betonda 300 °C'ye kadar olan dayanım artışına dikkat çekmiştir. Dayanımdaki artış silis esaslı agregası ile üretilen betonlarda daha fazladır ve bunun nedeni çimento ile agregası arasındaki aderansın silisli agregalarda daha yüksek olmasıdır (Savva vd., 2005).

2.2.3.2. Nemin basınç dayanımındaki rolü

Genel olarak, ilk bakışta nemli ve su yalıtımsız betonun basınç dayanımı sıcaklık artışıyla beraber düşer. Dayanım 80-100 °C arasında önemli bir düşüş gösterir. Nem içeriği 20 ile 450 °C arasındaki sıcaklıklarda betonun dayanımında önemli bir rol oynar. Betondaki emilmiş suyun çimento jelini yumuşattığı, veya jel partikülleri arasındaki yüzey güçlerini (Van der Waals güçleri) zayıflattığı, böylece dayanımı azalttığına inanılır (Lankard and Birkimer, 1971; Cülfik, 2001). Betonun basınç dayanımının 100 °C ile 300 °C arasındaki sıcaklıklarda azalması, çimento hamuru boşluklarının suyla dolması sonucu oluşan gerilmelerden kaynaklanmaktadır (Shneider, 1976; Davis, 1967; Cülfik, 2001). Yaklaşık 80-100 °C üzerindeki sıcaklıklarda emilmiş su ve ara katmanlardaki su kaçırmaya başlar (Feldman and Ramachandran, 1971; Cülfik, 2001). Bunun etkisi yukarıda anlatılan etkinin tersine çevrilmesi şeklinde dayanımın

artırılmasıdır. Sıcaklıktaki artışa bağlı olarak dayanımın artması çimento jelinin genel rijitleşmesine ya da emilmiş nemin çıkması nedeniyle parçacıklar arasındaki yüzey güçlerinin artmasına bağlanır. Emilmiş suyun çıktığı ve dayanımın artmaya başladığı sıcaklık, betonun gözenekliliğine bağlı olmaktadır.

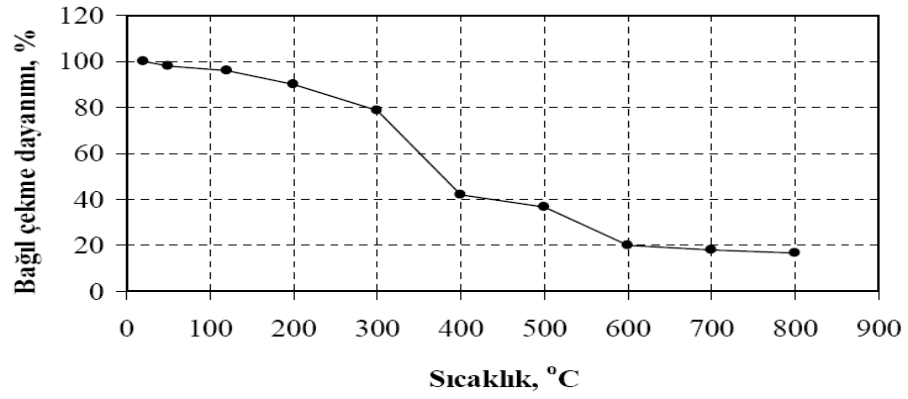
2.2.3.3. Suda soğutmanın basınç dayanımındaki rolü

Yangını söndürmek için sıkılan su, oluşan CaO 'ın tekrar Ca(OH)_2 'e dönüşmesini hızlandırarak zararın mertebesini arttırmaktadır. Ca(OH)_2 'in ortaya koyduğu bu zararlı etki uçucu kül veya yüksek fırın cürufu gibi mineral katkıları kullanılarak ortadan kaldırılabilir. Çünkü, bu katkılar Ca(OH)_2 ile puzolanik reaksiyona girerek, ek CSH yapı oluşturmakta ve Ca(OH)_2 'in tüketilmesini sağlamaktadır (Sarshar and Khoury, 1993; Topçu ve Demir, 2005).

Yüksek sıcaklık nedeniyle basınç dayanımında meydana gelen kayıplara ek olarak suda soğutma (hızlı soğutma) nedeniyle de basınç dayanımında kayıplar meydana gelmektedir (Aydın, 2008).

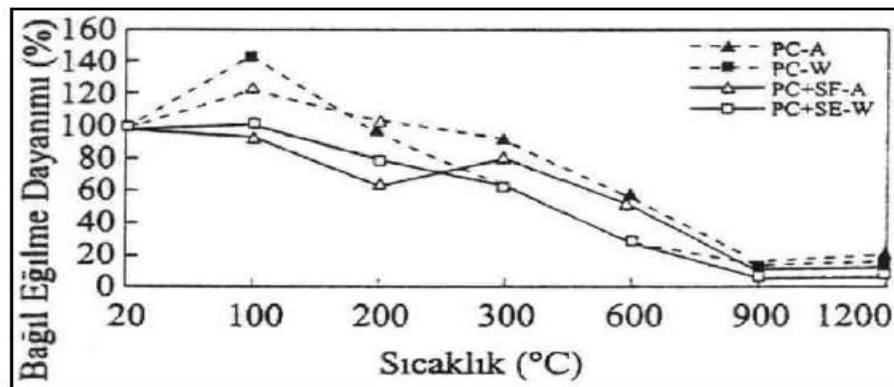
2.2.3.4. Çekme dayanımı

Betonun çekme dayanımı, eğilmede çekme ve yarma deneyi sonuçları ile araştırılır. Yüksek sıcaklıklarda normal dayanımlı betonun çekme dayanımı Şekil 2.15'te gösterilmiştir. Normal betonun çekme dayanımı artan sıcaklıkla birlikte hızla düşer. Çekme dayanımı $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'de ilk çekme dayanımına göre yaklaşık % 80 azalır. Normal betonun çekme dayanımı kür şartlarına bağlı olarak değişmez. Yüksek sıcaklıklarda beton çekme dayanımında meydana gelen azalmaların nedenleri arasında aderans bozulması, çimento hamurundaki CSH jellerinin yapısının bozulması ve agregadaki ısı genleşme farklılıkları sayılmaktadır (Yamazaki et al, 1995; Cülfik, 2001).



Şekil 2.14. Normal betonda çekme dayanımı-sıcaklık ilişkisi (Yamazaki et al, 1995; Cülfik 2001).

Yüksek sıcaklık etkisinin araştırıldığı silis dumanı katkılı ve katkısız harçlar üzerinde yapılan diğer bir deneysel çalışmada, harçların eğilme dayanımı (Şekil 2.16) 100 °C'den itibaren bütün gruplarda azalmaya başlamış, suda soğutulanlardaki kayıp, 300 °C'de yaklaşık %40'a varmıştır (Aköz vd., 1995).



Şekil 2.15. Eğilme dayanımının sıcaklıkla değişimi (Aköz vd., 1995).

BÖLÜM 3

DENEYSEL ÇALIŞMA

Bu çalışma kapsamında farklı çimento türleri kullanılarak üretilen ve yüksek sıcaklık etkisine maruz bırakılan harç numunelerin fiziksel ve mekanik özelliklerinde meydana gelen değişimler incelenmiştir. Deneysel çalışma, numune üretimi, kuru, sıcaklık etkisi, soğutma süreci, fiziksel ve mekanik deneyler olmak üzere beş aşamada gerçekleştirilmiştir.

Numune üretiminde CEM I 42.5 R, CEM II/A-M (P-L) 42.5 R, CEM III/A 32.5 N, CEM IV/B (P-V) 32.5 R olmak üzere dört farklı tip çimento kullanılmıştır. Yüksek sıcaklık etkisi 150, 300, 450, 600 ve 900 °C olmak üzere beş farklı sıcaklıkta ve 20 °C olarak kabul ettiğimiz oda sıcaklığındaki kontrol numunelerinde değerlendirilmiştir. Dört farklı tip çimentonun kullanıldığı, havada ve suda soğutma etkilerinin de incelendiği bu çalışmada, kür süreleri de 28 ve 56 gün olarak ayrı ayrı incelenmiştir. Bu nedenle kontrol numuneleri de dahil toplam 288 adet 40x40x160 mm boyutlu harç numunesi üretilmiştir. Numuneler kür sürelerine göre (28 veya 56 günlük) ayrı ayrı değerlendirmeye tabi tutulmuş bunun yanı sıra kullanılan çimento ve soğutma türüne göre Çizelge 3.1’de gösterildiği gibi kodlanmıştır.

Çizelge 3.1. Numune gruplarının kodlanması.

Çimento Tipi	Soğutma Türü	
	Havada (H)	Suda (S)
CEM I 42.5 R	CEM I H	CEM I S
CEM II/A-M (P-L) 42.5 R	CEM II H	CEM II S
CEM III/A 32.5 N	CEM III H	CEM III S
CEM IV/B (P-V) 32.5 R	CEM IV H	CEM IV S

3.1. Numune Üretiminde Kullanılan Malzemeler

Harç üretiminde özellikleri aşağıda verilen çimentolar, agrega, su ve hiper akışkanlaştırıcı (kimyasal) katkı maddesi kullanılmıştır.

3.1.1. Çimentolar

Harç üretiminde Bursa Çimento fabrikasından temin edilen CEM I 42.5 R, CEM II/A-M (P-L) 42.5 R, CEM IV/B (P-V) 32.5 ile Lafarge Çimento Ereğli fabrikasından temin edilen CEM III/A 32.5 N tipi çimentolar kullanılmıştır. Kullanılan çimentoların kimyasal, fiziksel ve mekanik özellikleri Çizelge 3.2 ve Çizelge 3.3'te verilmiştir. Kullanılan çimento tipleri Şekil Ek 2.1'de verilmiştir.

Çizelge 3.2. Kullanılan çimentoların kimyasal özellikleri.

ÇİMENTO TİPİ	CEM I 42.5 R	CEM II/A-M (P-L) 42.5 R	CEM III/A 32.5 N	CEM IV/B (P-V) 32.5 R
SiO ₂	18.60	24.66	27.88	34.33
Al ₂ O ₃	5.71	6.61	8.88	9.04
Fe ₂ O ₃	3.06	3.39	2.40	4.86
CaO	63.06	55.31	51.83	40.85
MgO	0.89	0.97	3.83	1.68
SO ₃	2.53	2.51	1.92	2.75
Na ₂ O	0.26	0.40	-	0.40
K ₂ O	0.53	0.78	-	1.020
Cl ⁻	0.012	0.013	0.010	0.01
Kız. Kaybı	3.22	4.08	3.90	4.62
SCaO	1.18	0.86	0.44	0.62
Katkı	-	20.15	-	44.0
Çöz. Kalıntı	0.29	-	0.43	-

Çizelge 3.3. Kullanılan çimentoların mekanik özellikleri.

MEKANİK ÖZELLİKLER (%)				
ÇİMENTONUN TİPİ	BASINÇ DAYANIMLARI (N/mm ²)			
	1. Gün	2. Gün	7. Gün	28. Gün
CEM I 42.5 R	12.7	23.5	41.3	52.2
CEM II/A-M (P-L) 42.5 R	13.0	22.8	40.7	51.6
CEM III/A 32.5 N	6.0	11.1	20.3	37.0
CEM IV/B (P-V) 32.5 R	6.6	13.5	25.5	41.9

3.1.2. Agrega

Çalışmada, TS EN-196-1'e uygun standart Rilem kumu kullanılmıştır. Kullanılan kum silis kumudur, kumun gradasyonu ve kimyasal kompozisyonu Çizelge 3.4'te verilmiştir. Kullanılan standart kum ayrıca Şekil Ek 2.2'de verilmiştir.

Çizelge 3.4. Standart Rilem kumu (CEN Standard kumu) özellikleri.

	Kimyasal Kompozisyon (%)	Elek Göz Açıklığı (mm)	Kalan (mm)
SiO ₂	93.05	2	-
Al ₂ O ₃	3.11	1.6	5.23
Fe ₂ O ₃	0.37	1	33.02
CaO	0.17	0.5	65.74
MgO	0.03	0.16	86.21
SO ₃	0.07	0.08	99.12
K ₂ O	1.50	Nem	0.11
Na ₂ O	1.10	Kızdırma Kaybı	0.57

3.1.3. Su

Karma suyu olarak laboratuvarımızda bulunan Eskişehir bölge suyu kullanılmıştır. Üretimde kullanılan şebeke suyunun kimyasal analizi Çizelge 3.5’te gösterilmiştir. Şebeke suyunun TS 1247’ deki karma suyu niteliklerine uygun olduğu görülmüştür.

Çizelge 3.5. Kullanılan şebeke suyunun kimyasal analizi.

Parametre	Bulunan Değerler
pH	6.85
Kalsiyum (Ca) ⁺⁺	58 mg/l
Magnezyum (Mg) ⁺⁺	83 mg/l
Klorür (Cl) ⁻	46 mg/l
Sülfat (SO ₄) ⁻	45 mg/l
Buharlaşma Bakiyesi	434 mg/l

3.1.4. Kimyasal katkı

Yayılma miktarlarının eşitlenmesi amacı ile katkı oranı %0.4-1.00 arasında değişen oranlarda, ligno+naftalin sülfanat içerikli Grace Daracem 556 hiper akışkanlaştırıcı kimyasal katkı maddesi kullanılmıştır.

3.2. Numune Üretimi

TS 196-1'e uygun olarak 288 adet 40x40x160 mm boyutlu harç numunesi üretilmiştir. Harç üretiminde kullanılan malzeme miktarları Çizelge 3.6'da verilmiştir. Üretimler Ek 2'de görülen laboratuvarımızda yapılmıştır. Şekil 3.1'de görülen harç mikseri ile harç karışımları karıştırılmış, masa vibratörü üzerinde kalıplara yerleştirilmiştir (Şekil 3.2). Üretilen numuneler Şekil 3.3'te görüldüğü gibi 24 saat boyunca kalıplarda bekletilmiş sonrasında kalıptan çıkartılan numuneler 28. ve 56. günlere kadar TS EN 12390-3'e uygun olarak 20±2 °C sıcaklıktaki kirece doymun suda bekletilmişlerdir (Şekil 3.4). Ayrıca numune üretimi esnasında çekilen fotoğraflar Şekil Ek 2.3-2.4-2.5-2.6 ve 2.7'de verilmiştir.

Çizelge 3.6. Harç numunelerinin karışım oranları.

ÇİMENTONUN TİPİ	Çimento (gr)	Kum (gr)	Su (gr)	Katkı (%)
CEM I 42.5 R	450	1350	225	1
CEM II/A-M (P-L) 42.5 R	450	1350	225	1
CEM III/A 32.5 N	450	1350	225	0.4
CEM IV/B (P-V) 32.5 R	450	1350	225	0.6



Şekil 3.1. Harç mikseri.



Şekil 3.2. Numunelerin kalıplara yerleştirilmesi.



Şekil 3.3. Numunelerin kalıplarda bekletilmesi.



Şekil 3.4. Numunelerin kuru.

3.3. Yüksek Sıcaklık Uygulaması

Uygulanan 28 ve 56 günlük kür sürelerinin sonunda, ısıtım işlem aşamasında önce tüm harç numuneleri etüvde (100 ± 5 °C) 48 saat bekletilmiştir (Şekil Ek 2.8). Etüvde kuru duruma getirilen harç numuneleri ısıtım işlem safhasında TS EN 1363-1'e göre ısınma hızı 6 °C/dak. olan fırında 150, 300, 450, 600 ve 900 °C sıcaklıklarda 3 saat süreyle yüksek sıcaklık etkisi altında bırakılmıştır (Şekil 3.5). Numunelerin patlayıp fırına zarar verme ihtimaline karşı her sıcaklık uygulamasında üzerlerine çelik tellerle sarılı kafes yerleştirilmiştir. Şekil Ek 2.9 ve 2.10'da yüksek sıcaklık uygulamasının diğer fotoğrafları verilmiştir.



Şekil 3.5. Isıtım işlem safhası.

3.4. Soğutma Süreci

Yüksek sıcaklık uygulaması tamamlandığında fırından çıkarılan numunelere havada soğutma ve suda soğutma olmak üzere 2 çeşit soğutma türü uygulanmıştır. Her sıcaklık sonrası fırının arabalı olan rafı fırın dışına alınarak sıcaklık sonrası numunelerin bir grubu havada soğumaya bırakılmıştır. Şekil 3.6'da görüldüğü üzere havada soğumaya bırakılan harç numuneleri deneyleri yapmak için oda sıcaklığına kadar normal oda koşullarında bekletilmiştir. Diğer grup olan suda soğutma uygulanan grup

ise, oda sıcaklığında durgun su bulunan deney kaplarına konulmuş, su değiştirmek suretiyle oda sıcaklığına kadar soğutulmuştur (Şekil 3.7). Ayrıca havada ve suda soğutma süreci Şekil Ek 2.11’de verilmiştir.



Şekil 3.6. Suda soğutma.



Şekil 3.7. Havada soğutma.

3.5. Kontrol Deneyleri

Harçların ultrases geçiş hızları ölçülmüş, eğilme ve basınç dayanımı deneyleri yapılmış, birim ağırlık değerleri belirlenmiştir. Aşağıda fiziksel ve mekanik özelliklerin araştırıldığı deneyler açıklanmıştır. Her dört çimento tipi içinde 900 °C’ye maruz kalan numunelerin suda soğutulan gruplarında, soğutma esnasında su içerisinde dağıldığından, bu numunelerde kontrol deneyleri yapılamamıştır (Şekil Ek 2.12).

3.5.1. Ultrases geçiş hızlarının belirlenmesi

Harç numunelerde, ASTM C 597-02 (2002) ve BS 1881 Part 203 (1986)’ya uygun ultrases aleti ile ses geçiş süreleri ölçülmüştür. Ses geçiş sürelerinin ölçülmesinde mala yüzeyindeki pürüzlerin oluşturduğu boşlukları doldurmak amacı ile numunelerin alt ve üst yüzeylerine vazelin sürülmüş 55 kHz’lik ses dalgaları gönderen gönderici ve

alan alıcı Şekil 3.8’de görüldüğü gibi numunenin düzgün yüzeylerine yerleştirilmiş, direkt iletim yöntemi uygulanarak ses geçiş süresi (t_1 , μs) okunmuştur. Problar yer değiştirilerek ikinci okuma alınmış, her numune için bu iki okumanın ortalaması alınarak 3.1 bağıntısından faydalanarak ses geçiş hızı (V_s , km/sn) hesaplanmış, sonuçlar Şekil 4.1-4.2 ve Çizelge Ek 1-2’de verilmiştir. Ayrıca ultrases geçiş süresi deneyi Şekil Ek 2.13’te verilmiştir.

$$V_s = \frac{1}{t_1} \quad (3.1)$$

3.5.2. Eğilme dayanımı

Eğilme deneyi 40x40x160 mm boyutlu toplam 228 adet numuneye TS EN 196-1’e uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Bunun için numuneler eğilme aletinin altına mesnet açıklığı 100 mm olan 10 mm çaplı iki silindir çubuk üzerine yerleştirilmiş ve aynı özelliklere sahip yükleme silindiri kullanılmıştır (Şekil 3.9). Açıklık ortasından uygulanan 5 ± 1 kgf/sn yükleme hızı ile numunelerin eğilme dayanımları belirlenmiştir. Eğilme dayanımları 3.2 bağıntısından hesaplanmıştır.

$$f_e = 1,5 \frac{P_k \cdot l_1}{a_1^3} \quad (3.2)$$

Hesaplanan sonuçlar Şekil 4.4-4.5 ve Çizelge Ek 3-4’te verilmiştir. Ayrıca eğilme deneyi Şekil Ek 2.14’te verilmiştir.



Şekil 3.8. Harç numunelerinde eğilme dayanımı deneyi.

3.5.3. Basınç dayanımı

Eğilme deneyinde iki parçaya bölünmüş olan yarım prizmalar, yan yüzeyleri 40x40 mm'lik iki adet çelik kırma başlığı arasına konmak suretiyle TS 196-1'e uygun olarak tek eksenli basınç deneyine tabi tutulmuştur. Deney 10-20 kgf/cm².sn yükleme hızı ile gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.10). Sonuçlar Şekil 4.6-4.7 ve Çizelge Ek 5-6'da verilmiştir. Basınç deneyine ait fotoğraflar Şekil Ek 2.15'te verilmiştir.



Şekil 3.9. Harç numunelerinde basınç deneyi.

3.5.4. Birim ağırlık

Birim ağırlığı (TS EN 12390-7) belirlemek amacıyla tüm numuneler 30 kg kapasiteli terazide tartılmıştır. Daha sonra tüm numunelerin en, boy ve yükseklikleri hassas olarak ölçülmüştür. Boyutları belirlenen numunelerin geometrik hacimleri hesaplanmıştır. Ağırlığın hacme oranı ile tüm numunelerin birim ağırlıkları belirlenmiştir. Deney sonuçları Şekil 4.8-4.9 ve Çizelge Ek 7-8'de verilmiştir.

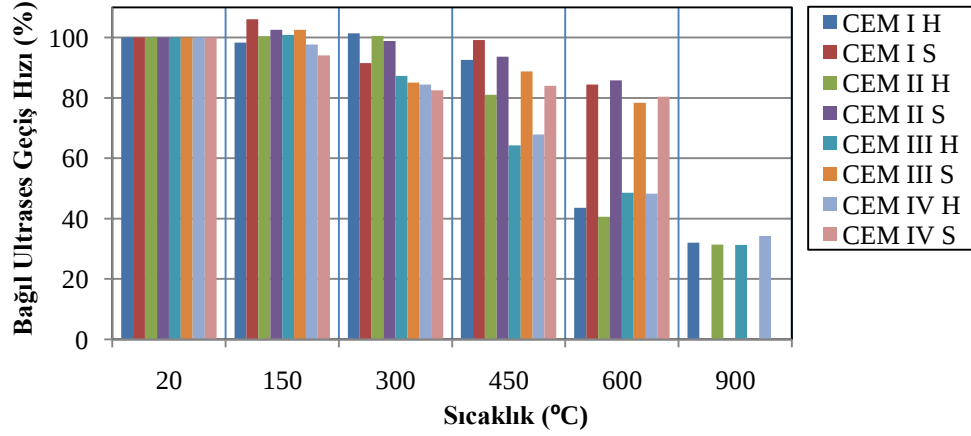
BÖLÜM 4

DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

Farklı çimento tipleri ile üretilen harçların yüksek sıcaklık etkisine karşı göstereceği dayanıklılığın araştırıldığı bu çalışmada elde edilen deney sonuçları Ek Çizelgeler’de verilmiştir. Deneylerden alınan veriler ile ilgili hesaplamalar yapılmış, bulunan değerler sıcaklık artışına bağlı olarak değerlendirilmiş ve irdelenmiştir. Her dört çimento tipi içinde 900 °C’ye maruz kalan numunelerin suda soğutulan gruplarında, soğutma esnasında su içerisinde dağıldığından, bu numunelerde kontrol deneyleri yapılamamış, sonuçlar değerlendirilememiştir.

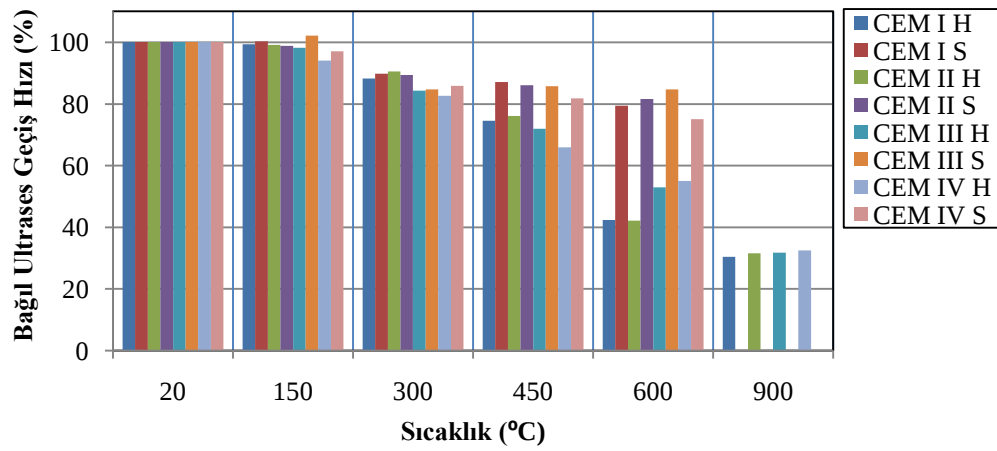
4.1. Ultrases Geçiş Değerlerinin Değerlendirilmesi

Boyuna ses geçiş dalgalarının değerlendirilmesi esasına dayanan ultrases metodu, basit ve ucuz olması nedeni ile betonun tahribatsız deneyleri için çok kabul gören yöntemlerden biridir. Betonun ses geçiş hızına göre nitelendirildiği bu metot için, bazı ülkelerde standartlarda geliştirilmiştir (Neville, 2000). Ultrasonik dalgaının bir ortamda yayılma hızı o ortamın boşluk yapısına, dolayısı ile yoğunluğuna ve elastik özelliklerine bağlıdır. Bu bölümde yapılan ultrases ölçümleri ile, yüksek sıcaklığın harcın boşluk yapısına etkileri değerlendirilmiş, sonuçlar Çizelge Ek 1 ve 2’de verilmiştir.



Şekil 4.1. Yirmi sekiz günlük harç numunelerinin sıcaklık-ultrases geçiş hızı ilişkisi.

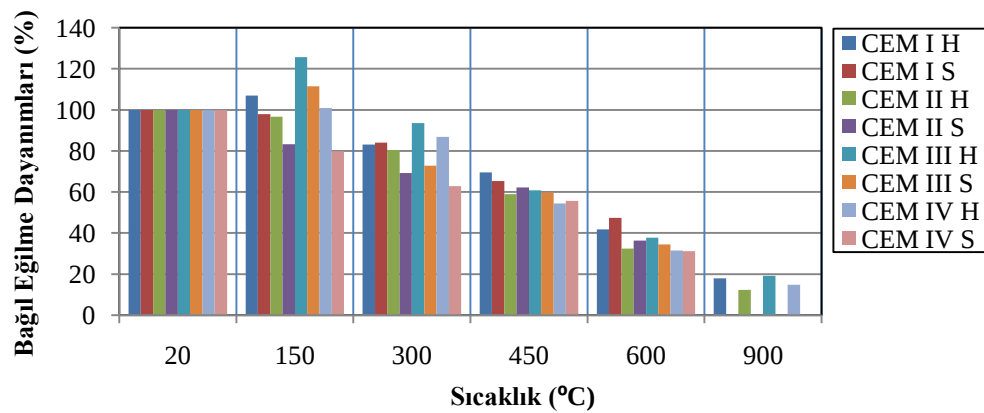
Şekil 4.1’de 28 günlük numuneler için bağıl ses geçiş hızının sıcaklıkla değişimi verilmiştir. Yirmi sekiz günlük kontrol numunelerinden en düşük ses geçiş hızı 3.59 km/sn ile Cem I grubunda; en büyük değer ise 3.94 km/sn ile Cem IV grubunda elde edilmiştir. Ultrases deneyi sonuçlarına göre 300 °C’ye kadar önemli bir değişiklik olmamış, 300 °C’den sonra her dört tip çimentonun kullanıldığı gruplarda da belirgin azalmalar meydana gelmiştir. Kullanılan çimento türünün ve soğutma şeklinin 450 °C’ye kadar ultrases geçiş hızına önemli bir etkisi olmamıştır. Öte yandan 450 °C ve 600 °C’de çimento tipinden çok suda soğutma şeklinin ultrases geçiş değerlerinde daha az düşümlere neden olduğu görülmüştür. Sıcaklık artışı ile ultrases geçiş hızı değerlerinin düşüş göstermesinin nedeni, beton numunelerinin artan sıcaklıkla gözenekli yapılarının büyümesi ve yapılarındaki suların buharlaşarak meydana gelen kütle kaybı ile ilave boşluk yapıların oluşmasıdır.



Şekil 4.2. Elli altı günlük harç numunelerinin sıcaklık-ultrases geçiş hızı ilişkisi.

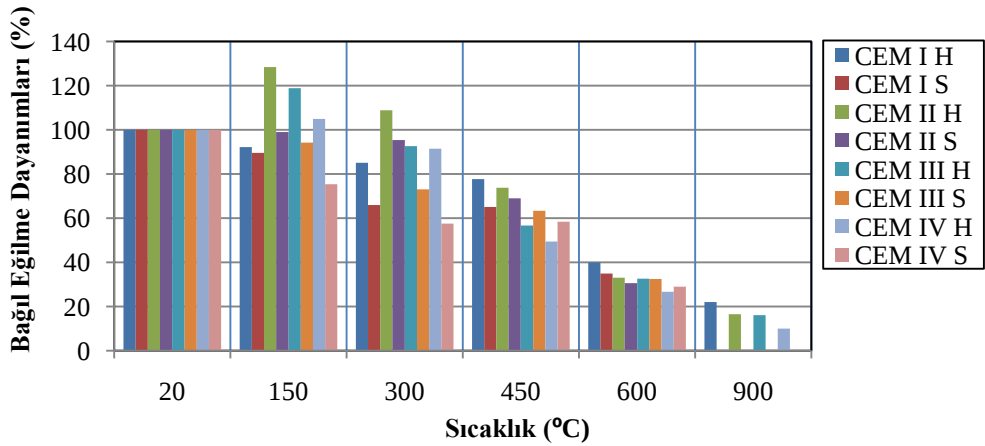
Şekil 4.2’de 56 günlük numuneler için bağıl ses geçiş hızının sıcaklıkla değişimi verilmiştir. Elli altı günlük kontrol numunelerinden en düşük ses geçiş hızı 3.78 km/sn ile Cem I ve Cem III gruplarında; en büyük değer ise 4.00 km/sn ile Cem IV grubunda elde edilmiştir. Elli altı gün kür uygulanan numunelerin 28 günlük numunelere göre ultrases geçiş hızı değerleri belirli bir oranda yüksek olmasına rağmen grafikler birebir paralellik göstermektedir. Buna bağlı olarak bu numunelerde 28 günlük numunelerle aynı şekilde yorumlanabilir.

4.2. Eğilme Dayanımının Değerlendirilmesi



Şekil 4.3. Yirmi sekiz günlük harç numunelerinin sıcaklık-eğilme dayanımı ilişkisi.

Harç numuneleri üzerinde yapılan üç nokta eğilme deneyi sonuçları Çizelge Ek 3 ve 4'te verilmiştir. Elde edilen bağıl eğilme dayanımları Şekil 4.4'te görüldüğü gibi artan sıcaklıkla azalma göstermiştir. 150 °C'de bazı grupların eğilme dayanımlarında iyileşmeler görülmüştür. Özellikle Cem III tipi çimento ile üretilen ve havada soğutma uygulanan grubun 150 °C'deki eğilme dayanımı kontrol numunesine nazaran %25 daha fazla olmuştur. Tüm gruplar için 300 °C'de eğilme dayanımında meydana gelen azalma ortalama %25 civarında iken Cem III H grubunda %8 azalma olmuştur. Tüm numuneler için suda soğutma uygulamasının zararlı etkisi havada soğutmaya nazaran daha fazladır.

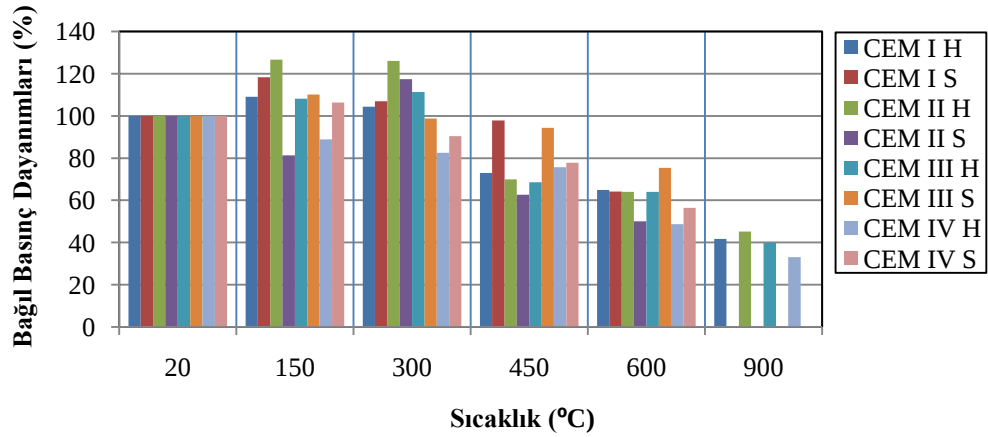


Şekil 4.4. Elli altı günlük harç numunelerinin sıcaklık-eğilme dayanımı ilişkisi.

Yirmi sekiz günlük numuneler ile elli altı günlük numuneler kıyaslandığında eğilme dayanımları arasında çok büyük farklılıklar olmadığı görülmüştür. 56 günlük numunelerde de en iyi sonuçlar Cem III H grubunda elde edilmiştir (Şekil 4.5). Bunun yanı sıra Cem II tipi çimento ile üretilen numunelerin 28. gün ile 56. gün arasında kazandığı dayanımın daha fazla olduğu belirlenmiştir. Havada soğutulan grupların eğilme dayanımlarının tüm sıcaklıklarda suda soğutulan gruplara nazaran daha yüksek olduğu sonucuna 56 günlük numunelerden de ulaşılmıştır.

4.3. Basınç Dayanımının Değerlendirilmesi

Basınç deneyi eğilme deneyinde ikiye ayrılan numunelerde yapılmış sonuçlar Çizelge Ek 5 ve 6'da verilmiştir. Şekil 4.6'da farklı sıcaklar sonrası elde edilen basınç dayanımları verilmiştir. Basınç dayanımı değerleri tüm gruplar ve tüm sıcaklıklar göz önüne alındığında 28 günlük numuneler için 41.88 MPa ile 13 MPa arasında değişmektedir. Fırında 900 °C sıcaklık uygulanan ve suda soğutulan numuneler, suda soğutma esnasında dağıldığından bu numuneler için hiçbir kontrol deneyi yapılamamıştır.

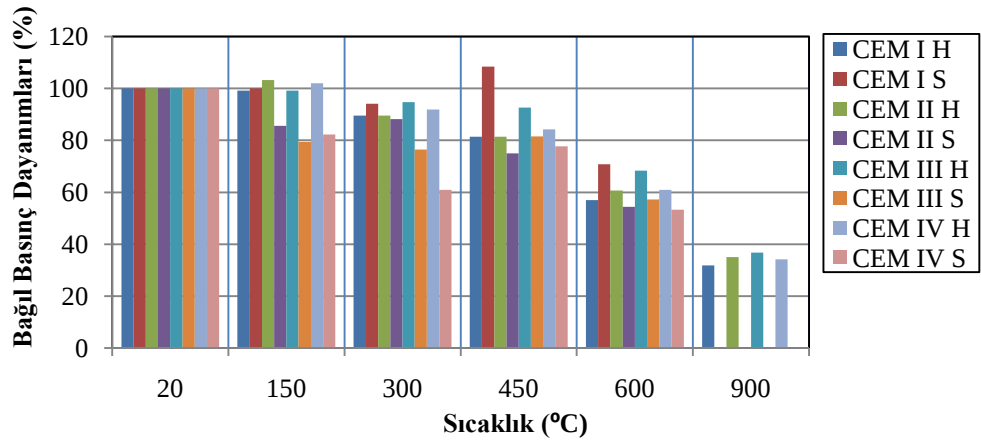


Şekil 4.5. Yirmi sekiz günlük harç numunelerinin sıcaklık-basınç dayanımı ilişkisi.

Basınç dayanımları kontrol gruplarıyla karşılaştırıldığında 600 °C'ye kadar meydana gelen kayıp %20 oranındadır. Yüksek sıcaklık etkisi basınç dayanımını olumsuz yönde etkilemiş, sıcaklık arttıkça basınç dayanımı azalmış, 900 °C'de dayanım kaybı %50'ye ulaşmıştır.

Yirmi sekiz günlük numuneler 150 °C ve 300 °C sıcaklıklara maruz kaldığında Cem I S, Cem II H, Cem III H ve Cem III S gruplarına ait basınç dayanımlarının arttığı görülmüştür. Fakat sıcaklık 450 °C'ye ulaştığında Cem I S ve Cem III S dışındaki

grupların dayanımlarının %30 unu kaybettiği görülmüştür. Cem III S grubu ise 900 °C’de suda dağılmasına rağmen 600 °C’de dahi %75 dayanımını korumuştur.



Şekil 4.6. Elli altı günlük harç numunelerinin sıcaklık-basınç dayanımı ilişkisi.

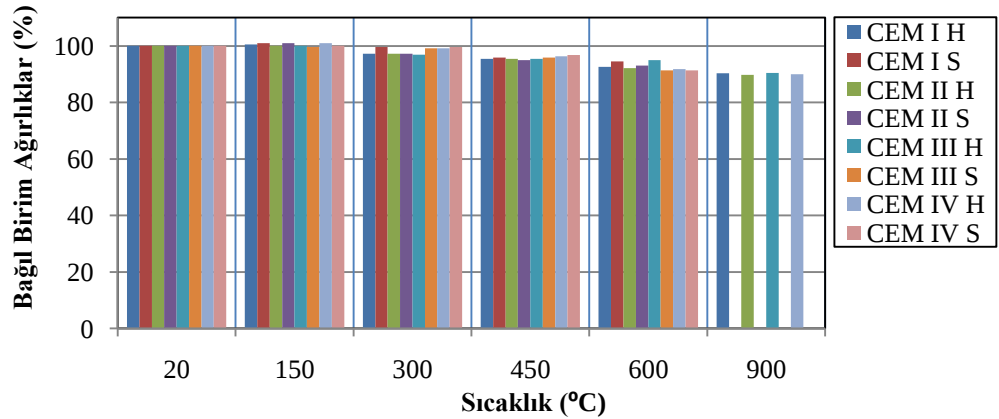
Elli altı günlük numunelerde ilk gözlenen havada soğutulan grupların basınç dayanımlarının tüm çimento tipi ve tüm sıcaklıklar için suda soğutulan gruplara nazaran daha yüksek olduğudur. Cem I S grubu 28 günlük numunelerde olduğu gibi 56 günlük numunelerde de 450 °C’de en yüksek dayanımı vermiştir. Fakat 450 °C’den 600 °C’ye ulaşıldığında bir anda %38 dayanım kaybetmiştir. Şekil 4.7’de görüldüğü gibi 28. günde iyi bir performans sergileyen Cem III S grubunun dayanımlarının 56. günde de aynı olduğu fakat Cem III H grubunun dayanımlarının 28. günden itibaren fark edilebilir şekilde arttığı görülmüştür. Elli altı günlük Cem III H numunelerinin 600 °C’de dayanımları kontrol numunesine nazaran %30 azalmıştır. 900 °C’de de dayanımının %35’ini koruyan Cem III H grubu en yüksek dayanımı vermiştir.

Sıcaklık etkisinden dolayı çimento pastasında ve agregada, termal uyumsuzluk nedeni ile betonun bu iki bileşenin ara yüzünde meydana gelen çatlaklar, boşluk oranının artması, su ile soğutma esnasında dehidrate olan ürünlerin rehidratasyonu ve bunun sonucunda meydana gelen büzülme ve genleşmeler betonun mekanik özelliklerini

olumsuz yönde etkilemektedir (Akman, 2000; Andrade vd., 2003). Xu vd. (2001) tarafından yapılan, yüksek sıcaklığın uçucu kül katkılı betonlara etkisinin araştırıldığı çalışmada, 250 °C’de betonun durabilitesi zarar görse de basınç dayanımının arttığı belirtilmiştir. Aynı çalışmada basınç dayanımının, 450 °C’de %4-15 arasında azaldığı, 650 °C’de dayanımın yaklaşık yarısına düştüğü, 800 °C’de de geriye başlangıçtaki dayanımın %20-30’unun kaldığına işaret edilmiştir. Xiao ve König’in (2004) araştırmasında, soğutma şeklinin basınç dayanımının değişiminde etkin bir rolünün olduğu sonucuna varılmıştır.

4.4. Birim Hacim Ağırlıkların Değerlendirilmesi

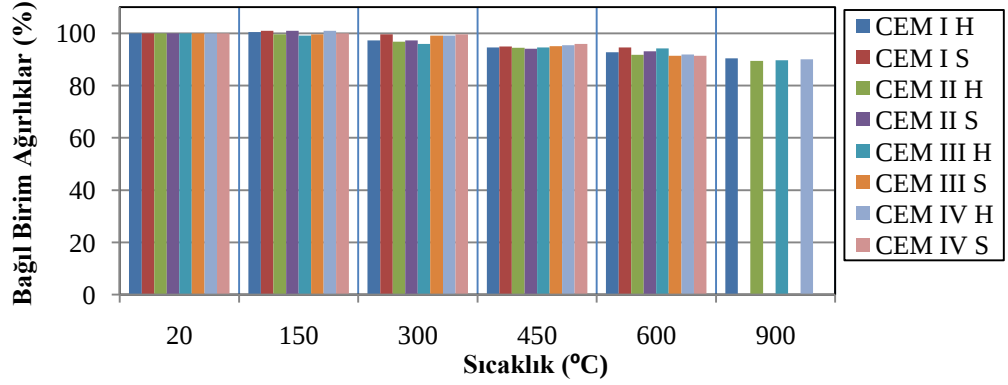
Birim ağırlığın sıcaklıkla değişimi incelenmiş, deney sonuçları Çizelge Ek 7 ve 8’de verilmiştir. Kontrol numunelerinin birim ağırlık değerleri 2.14 gr/cm^3 ile 2.18 gr/cm^3 arasında değişmektedir.



Şekil 4.7. Yirmi sekiz günlük harç numunelerinin sıcaklık-birim hacim ağırlık ilişkisi.

Deney sonuçlarına göre, birim ağırlıklarda önemli bir değişiklik olmamasına karşın tüm gruplarda sıcaklık arttıkça azalmaktadır. Azalmalar özellikle 300 °C’den sonra gözlenmiştir. Genel olarak suda soğutulan numunelerin birim ağırlıklarındaki

azalma havada soğutulanlara nazaran daha düşüktür. Her dört tip çimentonun kullanıldığı numunelerde de birbirine yakın değişimler görülmüştür.



Şekil 4.8. Elli altı günlük harç numunelerinin sıcaklık-birim hacim ağırlık ilişkisi.

Yirmi sekiz ve elli altı günlük harç numunelerinden elde edilen sonuçlar Şekil 4.8 ve Şekil 4.9’da verilmiştir. Birim ağırlık değerleri 600 °C’de %7 , 900 °C’de ise %10 düşmüştür. Bununla beraber birim ağırlık kayıpları açısından 28 ve 56 günlük numuneler büyük benzerlik göstermektedir. Hem 28, hem de 56 günlük numuneler için 450 °C’ye kadar her dört çimento tipi içinde suda soğutulan gruplarda meydana gelen birim ağırlık kaybı havada soğutulanlara göre daha düşük olmuştur.

Sıcaklığın etkisi ile serbest ve kimyasal bağlı suyun buharlaşması, malzemenin genişerek hacminin artması birim ağırlığın azalmasına sebep olmaktadır (Aköz vd., 1995; Anderberg, 2003).

BÖLÜM 5

DENEY SONUÇLARININ İSTATİSTİKSEL ANALİZİ

Minitab, temel ve ileri istatistiksel yöntemleri içeren bir veri analizi paketidir. Varyansın analizi (Anova) iki ya da daha fazla örneklem ortalamalarının aynı gerçek ortalamaya sahip bir yığından elde edilip edilemeyeceğini belirlemek için yapılır. Çalışmamız kapsamında bulunan sonuçlar Minitab analiz paketi ile değerlendirilmiş ayrıca Excel doğrusal eğilim çizgisi grafikleri ile de desteklenmiştir. Aşağıda Minitab varyans analizi ile ilgili genel bilgiler verilmiştir.

5.1. Varyans Analizi

İstatistik bilim dalında varyans analizi (veya Anova), gözlenen varyansı çeşitli kısımlara ayırma yöntemiyle bazı değişkenlerin başka bir değişken üzerindeki etkisini incelemeye yarayan bir grup modelleme türü ve bu modellerle ilişkili işlemlere verilen genel isimdir. Bu tür modeller gözlenen varyansın çeşitli açıklayıcı değişkenlerin etki parçalarına bölünmelerini incelerler. Daha doğrusu Anova, ana kütle ortalamaları arasında farkın olup olmamasını sınar.

Bu yöntem ilk defa İngiliz istatistikçi ve genetikçi Ronald Fisher tarafından 1920'li ve 1930'lu yıllarda geliştirilmiştir. Genel olarak istatistiksel anlamlılık sınamaları içinde F-dağılımını kullanmaları ile karakterize edildikleri için bazen Fisher'in varyans analizi adı da verilmektedir.

5.1.1. Tek yönlü varyans analizi

Popülasyon ortalamalarındaki farklılığın sadece tek bir faktöre bağlı olduğu durumlarda kullanılır. Bu tür analiz iki veya daha çok sayıda bağımsız gruplar arasındaki farklılıkların sınanması istenildiği hallerde uygulanır. Tipik olarak tek yönlü varyans analizi en aşağı üç değişik grup olduğu zaman uygulanmaktadır. İki grup halinde daha kolay olarak t-sınaması aynı sonuçları vermektedir; çünkü bu halde t-sınaması ve F-sınaması birbirine çok yakından ilişkilidir. Bu yakın ilişki şöyle ifade edilir:

$$F = (t_2)^2 \quad (5,1)$$

5.1.2. Çoklu değişirli varyans analizi

Popülasyon ortalamalarındaki farklılığın iki farklı faktöre bağlı olduğu durumlarda kullanılır. Birden çok bağımlı değişken bulunduğu zaman bu tür varyans analizi kullanılır.

5.2. Bilimsel Çalışmalarda P Değerinin Rapor Edilmesi

Yapılan analizlerin sonucunda elde ettiğimiz p değerlerinin yorumlanmasıyla ilgili olarak (Mendes, 2008) şöyle demektedir:

“P’nin gerçek değerinin rapor edilmesi araştırmacılara, örnek hacminin H_0 hipotezinin ret veya kabul edilmesini ne kadar desteklediği ile ilgili oldukça önemli bilgiler verir. Bu değerlendirmelerden hareketle, yapılan bir çalışmanın sonuçları rapor edilirken:

- Eğer üzerinde durulan özellik bakımından gruplar arasında istatistik olarak önemli bir fark var ise “üzerinde durulan özellik bakımından gruplar arasındaki farkların istatistik olarak önemli olduğu görülmüştür ($P<0.01$ ya da $P<0.05$) ” yerine, örneğin “üzerinde durulan özellik bakımından gruplar arasındaki farkların istatistiksel olarak önemli olduğu görülmüştür ($P=0.046$)” şeklinde rapor edilmesi,
- Eğer üzerinde durulan özellik bakımından gruplar arasında istatistik olarak önemli bir farkın olmadığı görülmüşse bu durumda da “üzerinde durulan özellik bakımından gruplar arasındaki farkların istatistiksel olarak önemli olmadığı görülmüştür” ifadesi yerine örneğin “üzerinde durulan özellik bakımından gruplar arasındaki farkların istatistiksel olarak önemli olmadığı görülmüştür ($P=0.182$)” ifadesinin kullanılması daha doğru ve açıklayıcı olacaktır. ”

Yukarıda verilen bilgiler ışığında analiz sonuçlarının yorumlanması yalnızca şekillere bakılarak görsel yorum yapılmamış ayrıca elde edilen Anova tablosu değerlerine göre de yorumlar eklenmiş gerekli değerler parantez içinde verilmiştir.

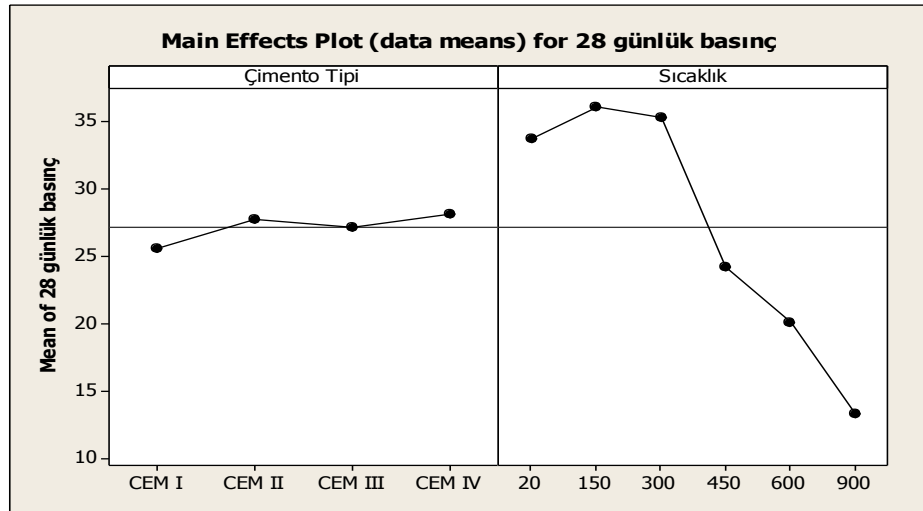
5.3. Yirmi Sekiz Günlük Havada Soğutma Uygulanmış Numunelerin Basınç Dayanımları

Yapılan iki yönlü Anova analizi sonucunda elde edilen 28 gün kür uygulanan ve havada soğutulan numunelerin basınç dayanımlarının ayrı ayrı sıcaklık ve çimento tiplerine karşı değerlendirilmesi sonucu elde edilen Anova tablosu Çizelge 5.1’de verilmiştir.

Çizelge 5.1. Yirmi sekiz günlük havada soğutulmuş numunelerin Anova tablosu.

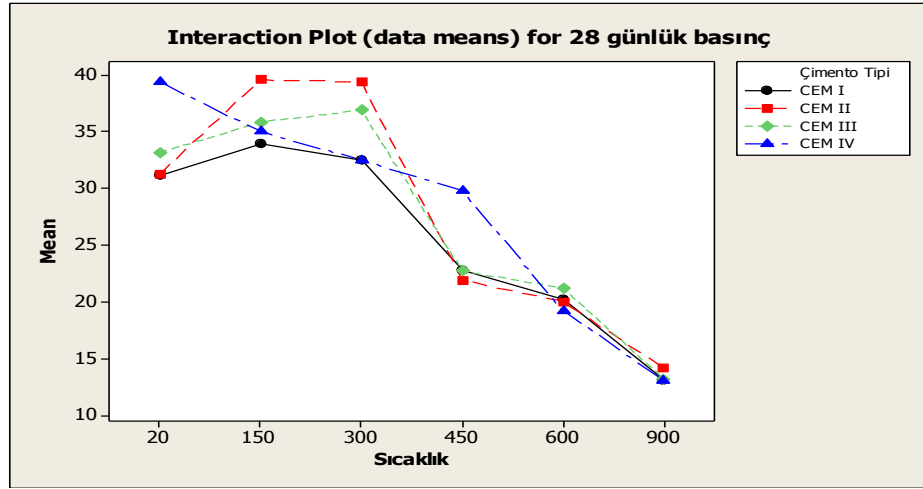
Kaynak	DF	SS	MS	F	P
Sıcaklık	5	1752.27	350.455	44.01	0.000
Çimento Tipi	3	22.43	7.478	0.94	0.446
Hata	15	119.44	7.963		
Toplam	23	1894.15			

Çizelge 5.1’de görülen Anova tablosuna göre çimento tiplerine göre ortalamalar arasındaki farklılıklar kıyaslandığında ($P=0,446>0,05$) ortalamalar arasında fark olmadığı kabul edilir. Sıcaklığa göre ortalamalar arasındaki farklılıklar kıyaslandığında ise ($P=0,000<0,05$) önemli farklılıklar olduğu görülmektedir.



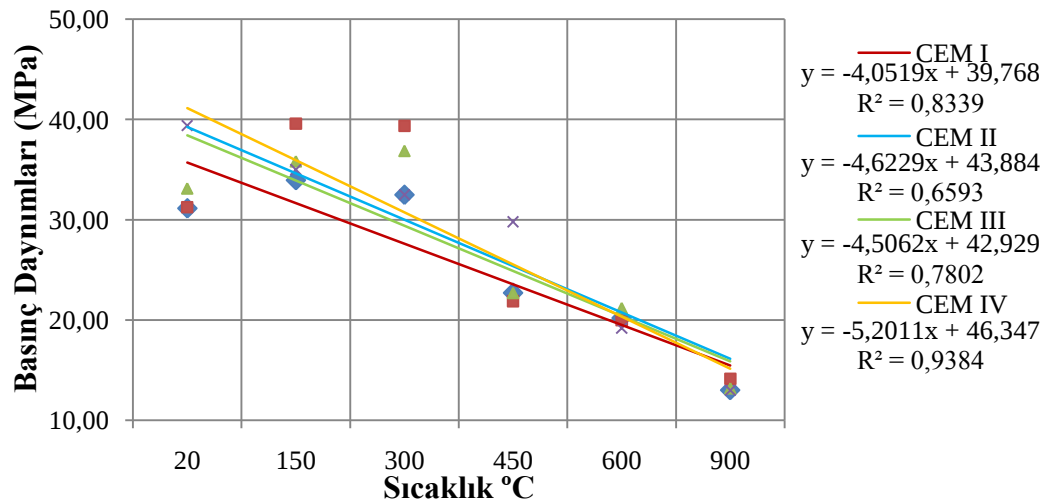
Şekil 5.1. Yirmi sekiz günlük havada soğutulmuş numunelerin ana etki büyüklükleri grafiği.

Ana etki büyüklüklerinin karşılaştırıldığı grafiğe göre 28 günlük havada soğutma uygulanmış numuneler için en yüksek basınç dayanımları 150 °C ve 300 °C sıcaklıklarda elde edilmiştir. Harç numunelerinin dayanımlarında ani düşüşlerin meydana geldiği aralık ise 300 °C ile 450 °C aralığıdır. Dört yüz elli derece ve üzeri sıcaklıklar harç numuneleri için dayanımın büyük oranda kaybedildiği yüksek sıcaklıklar olarak nitelendirilebilir (Şekil 5.1).



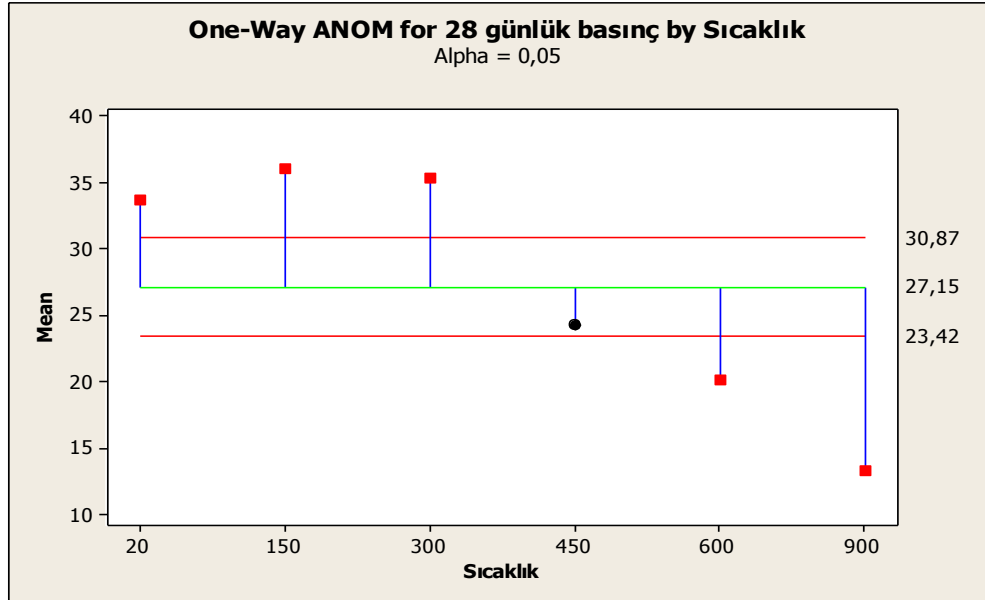
Şekil 5.2. Yirmi sekiz günlük havada soğutulmuş numunelerin etkileşimler grafiği.

Dördüncü bölümde yaptığımız bağıl değerlendirmede 28 günlük havada soğutulmuş numunelerden Cem II H ve Cem III H ön plana çıkmıştı. Şekil 5.2'den de görüldüğü üzere çimento tiplerinin basınç dayanımları sıcaklıklara bağlı olarak değişmektedir. Katkılı çimento tipleri olan Cem II, Cem III ve Cem IV ile üretilen numuneler Cem I'e nazaran daha iyi sonuçlar vermişlerdir. 600 °C'de ise en iyi dayanımı veren Cem III tipi çimentodur.



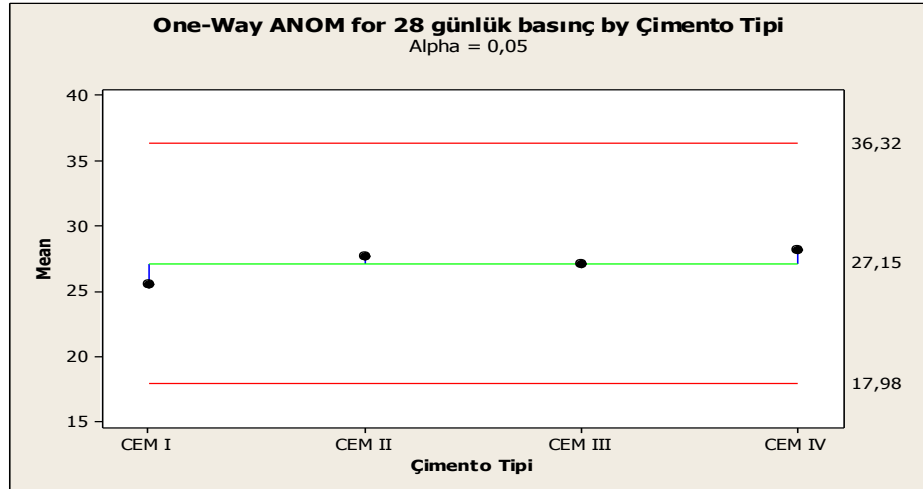
Şekil 5.3. Yirmi sekiz günlük havada soğutulmuş numuneler için basınç dayanımı-sıcaklık ilişkisi.

Şekil 5.3'te 28 gün kür uygulanmış ve havada soğutulmuş numuneler için basınç dayanımı-sıcaklık ilişkisi incelenmiştir. Her dört çimento tipi içinde doğrusal eğilim çizgileri görülmektedir. Farklı çimento tipleri için başlangıç dayanımları farklı olmasına rağmen tüm eğilim çizgileri birbirine paralellik göstermektedir. Yani tüm çimento tiplerinin yüksek sıcaklık karşısındaki dayanım kayıpları birbirine yakındır. Her dört çimento tipi için de basınç dayanımları 30 MPa'nın altına yaklaşık olarak 300 °C'de, 20 MPa'nın altına da 600 °C'de düşmüştür. Şekil 4.5'te yaptığımız bağıl değerlendirmede ve Şekil 5.2'deki etkileşimler grafiğinde olduğu gibi Şekil 5.3'ten de katkılı çimentoların ön plana çıktığı görülmektedir.



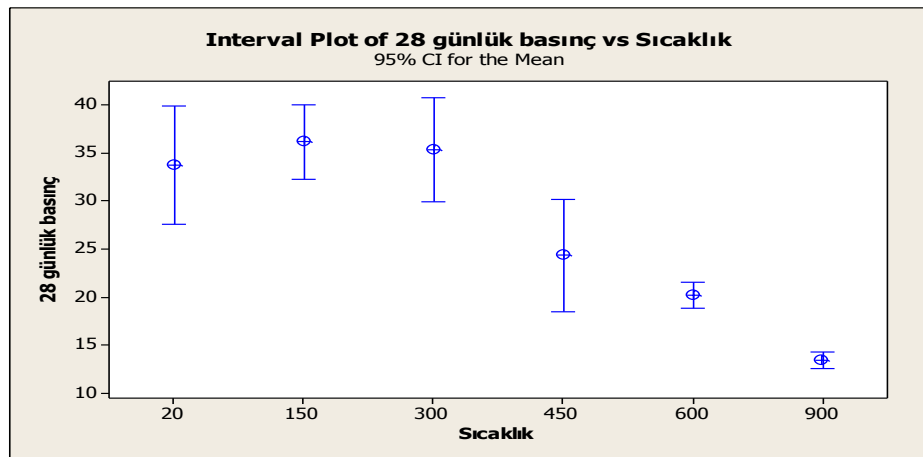
Şekil 5.4. Yirmi sekiz günlük havada soğutulmuş numunelerin basınç dayanımı ve sıcaklık ilişkisi için tek yönlü Anova analizi grafiği.

Yirmi sekiz günlük havada soğutulmuş numuneler için basınç dayanımıyla sıcaklık ilişkisinin tek yönlü olarak incelendiği ortalamanın analizi grafiğinden de görüldüğü üzere (Şekil 5.4) 300-450 °C aralığı kırılma noktası olmuştur. Üst karar limitinin üzerinde dayanımlar 20, 150 ve 300 °C'de elde edilirken 450 °C sonrasında dayanımlar alt karar limitinin altına düşmüştür.



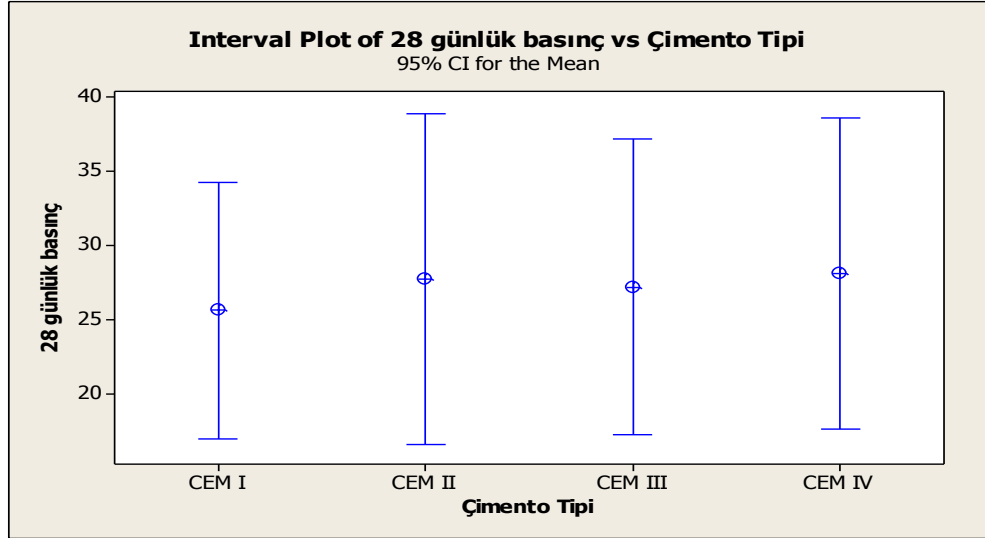
Şekil 5.5. Yirmi sekiz günlük havada soğutulmuş numunelerin basınç dayanımı ve çimento tipi ilişkisi için tek yönlü Anova analizi grafiği.

Tek yönlü Anova analizi ile 28 günlük havada soğutulan numunelerin basınç dayanımları ile çimento tipleri arasında analiz yaptırdığımızda her dört çimento tipi içinde 28 günlük basınç dayanımlarının birbirine çok yakın olduğu görülür. Tüm değerler karar limitleri arasında yer almıştır (Şekil 5.5).



Şekil 5.6. Yirmi sekiz günlük havada soğutulmuş numunelerin basınç dayanımı ve sıcaklık arasındaki aralık grafiği.

Sıcaklılara göre çizilen 28 günlük basınç dayanımlarının aralık grafiğinden de 20, 150 ve 300 °C için aralıkların bir grup oluşturduğu görülmektedir (Şekil 5.6).



Şekil 5.7. Yirmi sekiz günlük havada soğutulmuş numunelerin basınç dayanımı ve çimento tipi arasındaki aralık grafiği.

Şekil 5.7’den görüldüğü üzere çimento tiplerinin aralık gruplarının birbirlerinden çok az farklılık gösterdiği görülmektedir.

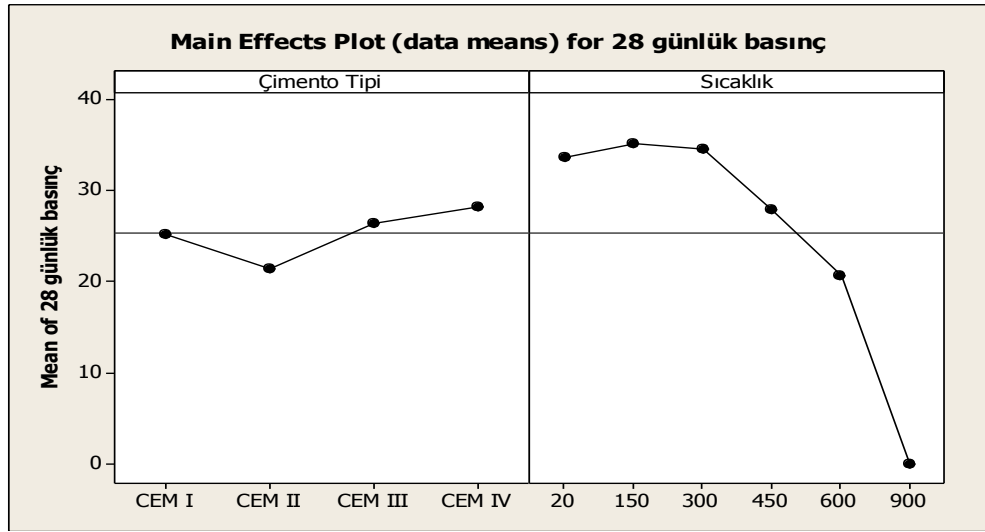
5.4. Yirmi Sekiz Günlük Suda Soğutma Uygulanmış Numunelerin Basınç Dayanımları

Yapılan iki yönlü Anova analizi sonucunda elde edilen 28 gün kür uygulanan ve suda soğutulan numunelerin basınç dayanımlarının ayrı ayrı sıcaklık ve çimento tiplerine karşı değerlendirilmesi sonucu elde edilen Anova tablosu Çizelge 5.2’de verilmiştir.

Çizelge 5.2. Yirmi sekiz günlük suda soğutulmuş numunelerin Anova tablosu.

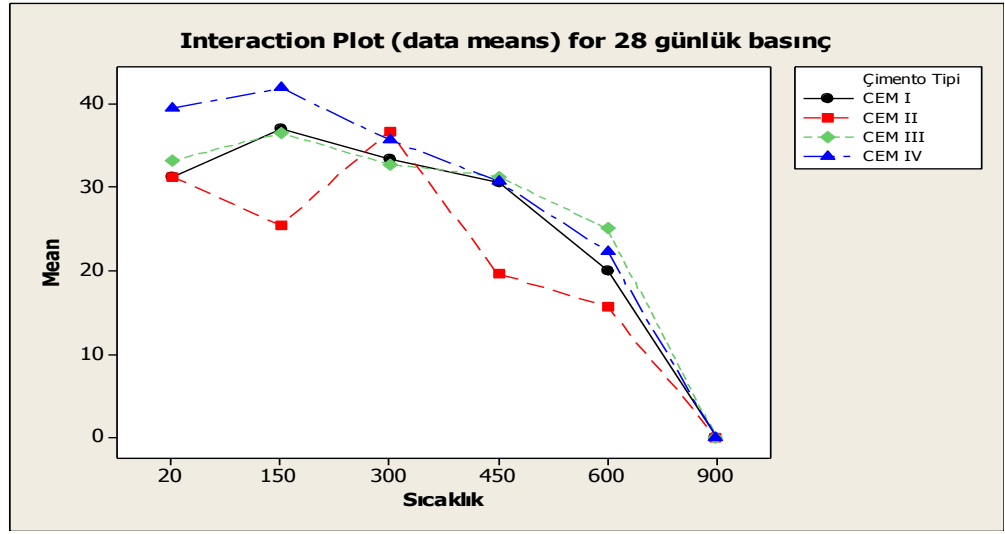
Kaynak	DF	SS	MS	F	P
Sıcaklık	5	3691.09	738.218	58.13	0.000
Çimento Tipi	3	151.18	50.394	3.97	0.029
Hata	15	190.50	12.700		
Toplam	23	4032.77			

Çizelge 5.2'deki Anova tablosundan da görüldüğü üzere 28 günlük suda soğutulmuş numunelerin çimento tiplerinin değişimiyle bulunan basınç dayanımları ortalamaları arasında fark vardır ($P=0,029<0,05$). Yirmi sekiz günlük suda soğutulmuş numunelerin basınç dayanımları sıcaklığa göre karşılaştırıldığında da ortalamalar arasında önemli farklılıklar olduğu görülür ($P=0,000<0,005$).



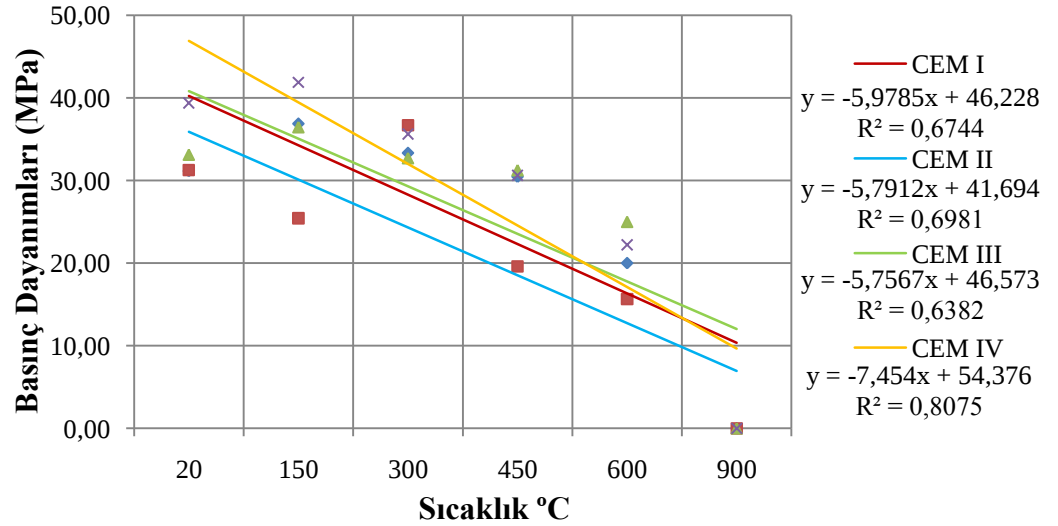
Şekil 5.8. Yirmi sekiz günlük suda soğutulmuş numunelerin ana etki büyüklükleri grafiği.

Ana etki büyüklükleri grafiğinden görüldüğü üzere suda soğumanın etkisiyle Cem II ile üretilen harçlarda dayanımlar düşmüş, Cem IV ile üretilenlerde ise artmıştır. Basınç dayanımlarının sıcaklığa karşı değerlendirildiğinde 28 günlük havada soğutulan numunelerden farklı olarak burada 450 °C'deki dayanımlar ortalaması genel ortalamanın üzerinde yer almıştır (Şekil 5.8).



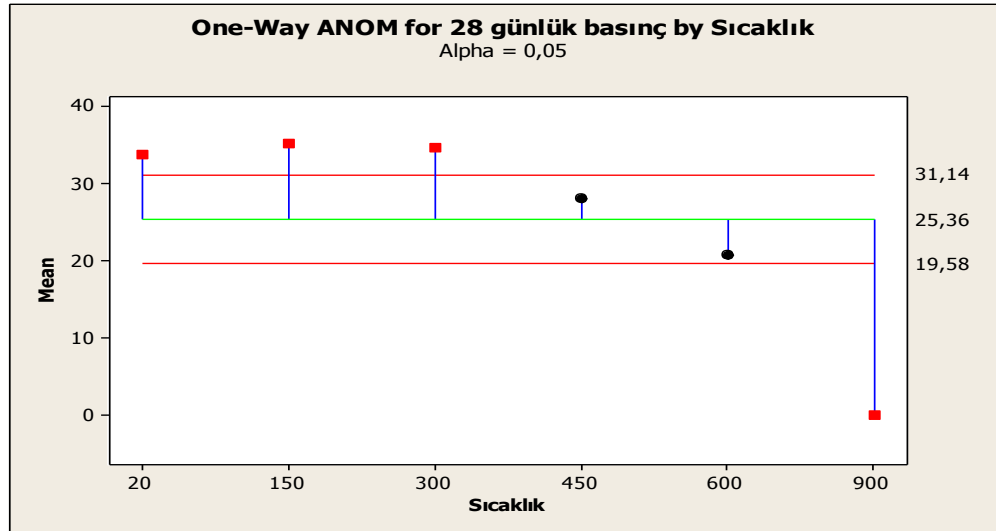
Şekil 5.9. Yirmi sekiz günlük suda soğutulmuş numunelerin etkileşimler grafiği.

Suda soğutulan gruplarda daha 300 °C'ye dahi ulaşılmadan dayanımlarda iniş çıkışlar gözlenmiştir. Fakat yüksek sıcaklıkların başlangıcı olarak kabul edebileceğimiz 450 °C ve 600 °C'de en iyi sonuçları Cem III tipi çimento vermiştir (Şekil 5.9).



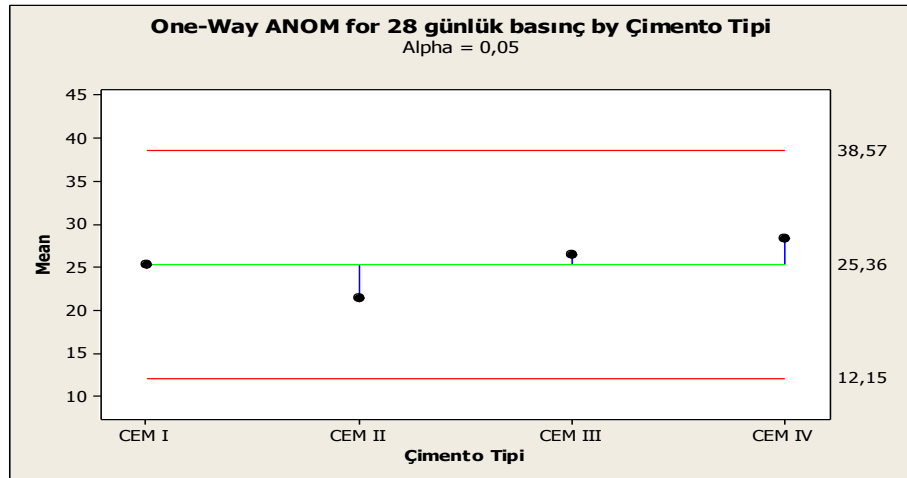
Şekil 5.10. Yirmi sekiz günlük suda soğutulmuş numuneler için basınç dayanımı-sıcaklık ilişkisi.

Şekil 5.10’da 28 gün kür uygulanmış ve suda soğutulmuş harç numuneleri için basınç dayanımı-sıcaklık ilişkisi incelenmiştir. Sıcaklık arttıkça, dayanımlarda ani iniş çıkışlar gözlenmiştir, bu iniş çıkışları göz önüne almaksızın doğrusal eğilim çizgilerine göre değerlendirirsek; her dört çimento tipi içinde dayanımların 20 MPa’nın altına düştüğü sıcaklık 450-600 °C arasındadır. Ayrıca suda soğutulan harç numunelerini havada soğutulanlar ile kıyaslırsak (Şekil 5.3), suda soğutma etkisiyle Cem II tipi çimentonun dayanımındaki belirgin düşüş dikkat çekmektedir.



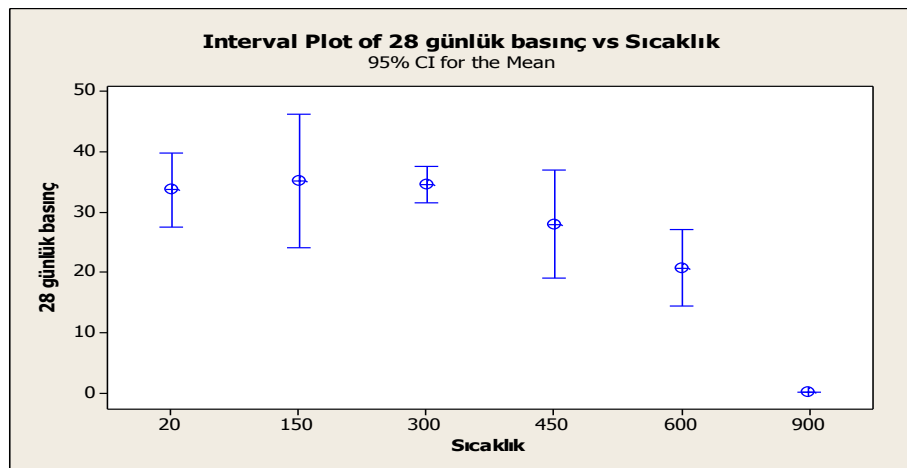
Şekil 5.11. Yirmi sekiz günlük suda soğutulmuş numunelerin basınç dayanımı ve sıcaklık ilişkisi için tek yönlü Anova analizi grafiği.

Yirmi sekiz günlük suda soğutma uygulanmış numuneler için basınç ve sıcaklık arasında tek yönlü Anova analizi yaptığımızda 20, 150 ve 300 °C sıcaklıklar için basınç dayanımı değerlerinin üst karar limiti çizgisinin üzerinde yer aldığı görülmektedir. 450 °C’de de bu kez basınç dayanımları ortalamasının genel ortalamasının üzerinde çıktığı saptanmıştır (Şekil 5.11).



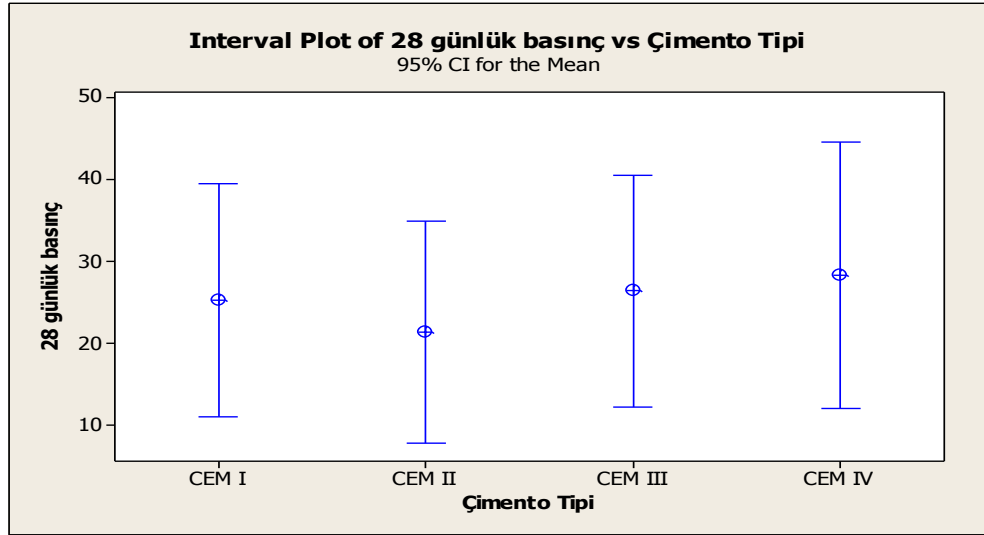
Şekil 5.12. Yirmi sekiz günlük suda soğutulmuş numunelerin basınç dayanımı ve çimento tipi ilişkisi için tek yönlü Anova analizi grafiği.

Yirmi sekiz günlük suda soğutulan numunelerin basınç dayanımları ile çimento tipleri arasında tek yönlü Anova analizi yapıldığında değerlerin karar limitleri arasında kaldığı görülmüştür (Şekil 5.12).



Şekil 5.13. Yirmi sekiz günlük suda soğutulmuş numunelerin basınç dayanımı ve sıcaklık arasındaki aralık grafiği.

Yirmi sekiz günlük suda soğutulmuş numunelerin basınç dayanımları ve sıcaklıklar arasında aralık grafiği çizdirdiğimizde (Şekil 5.13) en geniş değişim aralıklarına 150 °C ve 450 °C’de ulaşıldığı görülmüştür.



Şekil 5.14. Yirmi sekiz günlük suda soğutulmuş numunelerin basınç dayanımı ve çimento tipi arasındaki aralık grafiği.

Çimento tiplerinin aralık gruplarının birbirlerinden çok az farklılık gösterdiği görülmektedir (Şekil 5.14)

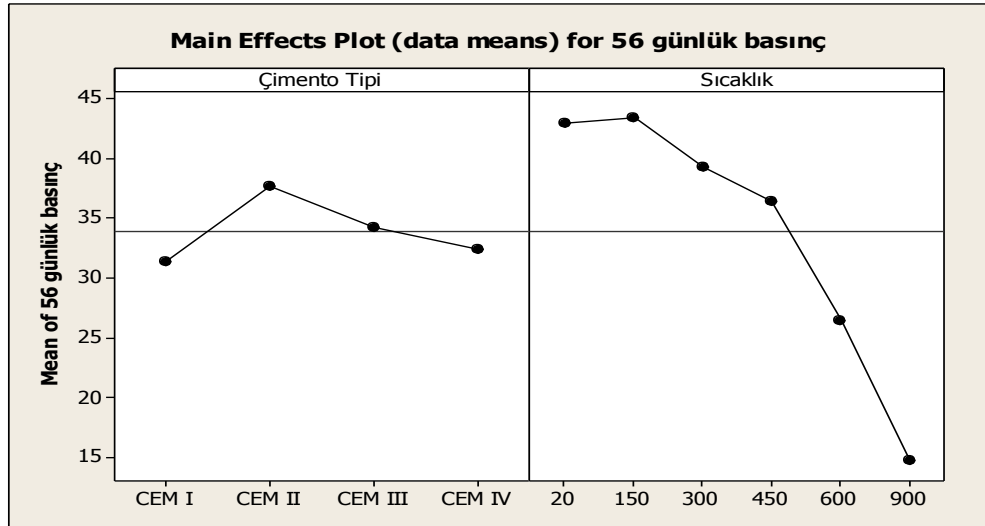
5.5. Elli Altı Günlük Havada Soğutma Uygulanmış Numunelerin Basınç Dayanımları

Yapılan iki yönlü Anova analizi sonucunda elde edilen 56 gün kür uygulanan ve havada soğutulan numunelerin basınç dayanımlarının ayrı ayrı sıcaklık ve çimento tiplerine karşı değerlendirilmesi sonucu elde edilen Anova tablosu Çizelge 5.3’te verilmiştir.

Çizelge 5.3. Elli altı günlük havada soğutulmuş numunelerin anova tablosu.

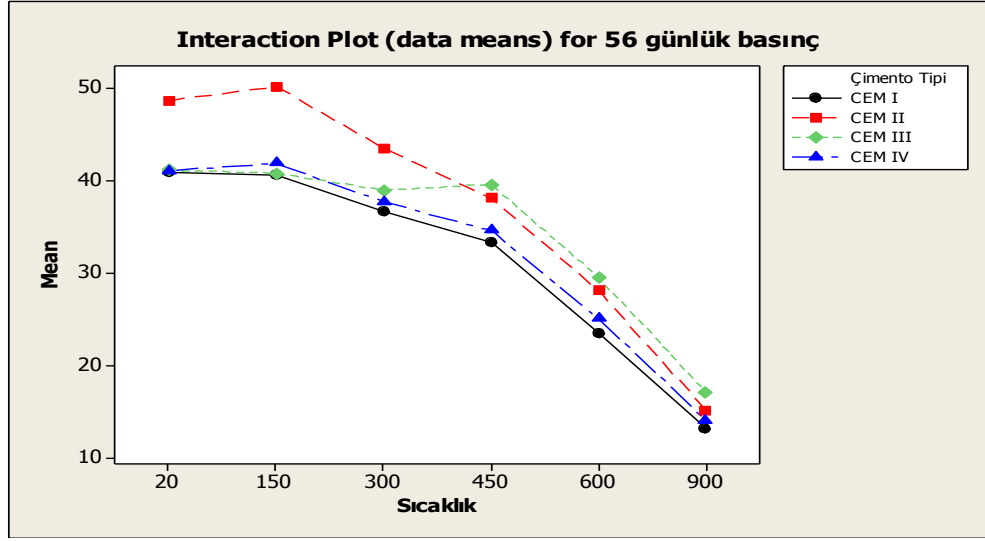
Kaynak	DF	SS	MS	F	P
Sıcaklık	5	2502.02	500.403	134.42	0.000
Çimento Tipi	3	137.30	45.768	12.29	0.000
Hata	15	55.84	3.723		
Toplam	23	2695.16			

Çizelge 5.3'te verilen Anova tablosundaki değerler göstermektedir ki çimento tiplerine göre, 56 günlük basınç dayanımı ortalamaları arasında farklılıklar gözlenmiştir ($P=0,000<0,05$). Sıcaklıklar ve 56 günlük basınç dayanımlarının ortalamalarını kıyasladığımızda ($P=0,000<0,05$) ortalamalar arasında büyük farklılıklar olduğu görülmüştür.



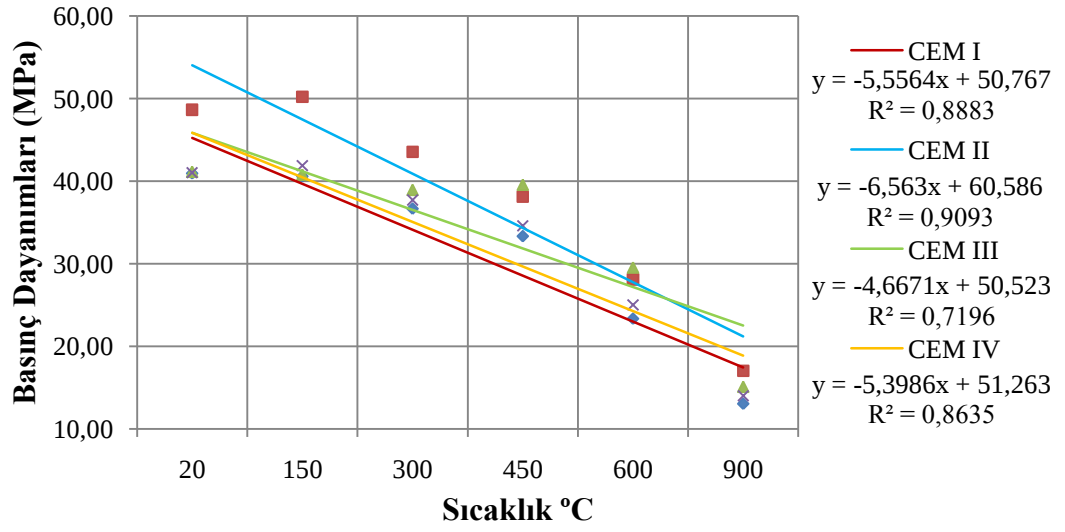
Şekil 5.15. Elli altı günlük havada soğutulmuş numunelerin ana etki büyüklükleri grafiği.

Ana etki büyüklükleri grafiğinden görüldüğü üzere Cem II tipi çimento 28. ve 56. günler arasında diğer tiplere göre daha fazla dayanım kazanmıştır. Basınç dayanımları sıcaklığa karşı kıyaslandığında ani dayanım düşmesinin meydana geldiği kırılma noktasının 450 °C ile 600 °C arasında olduğu görülmüştür (Şekil 5.15).



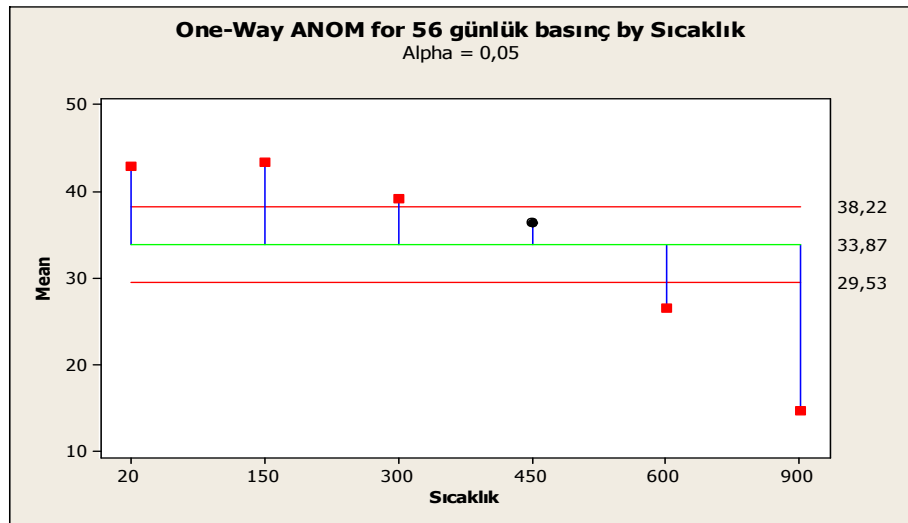
Şekil 5.16. Elli altı günlük havada soğutulmuş numunelerin etkileşimler grafiği.

Dördüncü bölümde yapılan bağıl değerlendirmelerde Cem III H grubu numuneler ön plana çıkmıştı. Şekil 5.16'daki 56 günlük ve havada soğutulmuş numunelerin etkileşimler grafiğinde, ana etkiler grafiğinden de fark ettiğimiz gibi en yüksek dayanım değerlerine kırılma noktasına kadar Cem II tipinde ulaşılmıştır. Fakat 450 °C ve 600 °C'de en iyi sonuçları Cem III çimentosu vermiştir. 300 °C sonrasında dayanımında tek artış meydana gelen çimento Cem III'tür. Yirmi sekiz günlük havada soğutulmuş numunelerin dayanım değerlerinden, katkılı çimentoların Cem I'e nazaran sıcaklığa karşı daha dayanıklı olduğu sonucunu çıkarmıştık. Elli altı günlük havada soğutulmuş numunelerde bu sonucu desteklemektedir. Ayrıca tüm basınç grafikleri göz önüne alındığında en yüksek dayanım değerlerine 56 günlük havada soğutulmuş numunelerde ulaşılmıştır.



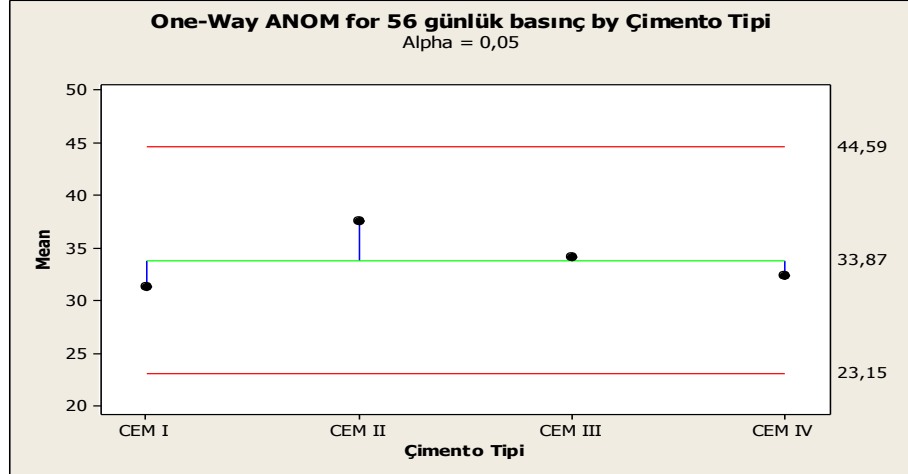
Şekil 5.17. Elli altı günlük havada soğutulmuş numuneler için basınç dayanımı-sıcaklık ilişkisi.

Şekil 5.17’de 56 gün kür uygulanmış ve havada soğutulmuş harç numuneleri için basınç dayanımı-sıcaklık ilişkisi incelenmiştir. Doğrusal eğilim çizgileri göstermektedir ki 28 günlük havada soğutulan numuneler için basınç dayanımlarının 20 MPa’ın altına düştüğü sıcaklık 600 °C iken (Şekil 5.3), 56 günlük harç numuneleri için 900 °C’dir (Şekil 5.17).



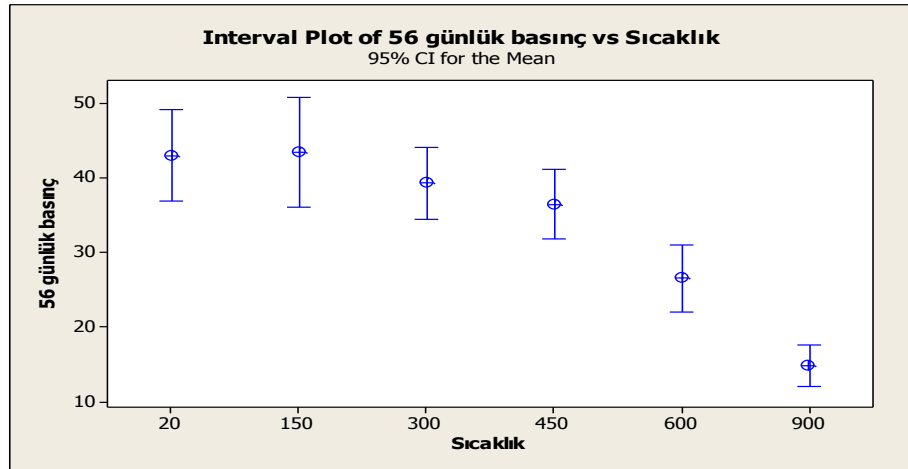
Şekil 5.18. Elli altı günlük havada soğutulmuş numunelerin basınç dayanımı ve sıcaklık ilişkisi için tek yönlü Anova analizi grafiği.

Elli altı günlük havada soğutulmuş numuneler için basınç dayanımı ile sıcaklık ilişkisi tek yönlü Anova analizi ile incelendiğinde 450 °C’de dayanımın üst karar limiti çizgisine doğru yükseldiği görülmüştür. Yani kırılma noktasının 450 °C’nin üzerinde olduğu sonucuna ulaşılmıştır (Şekil 5.18).



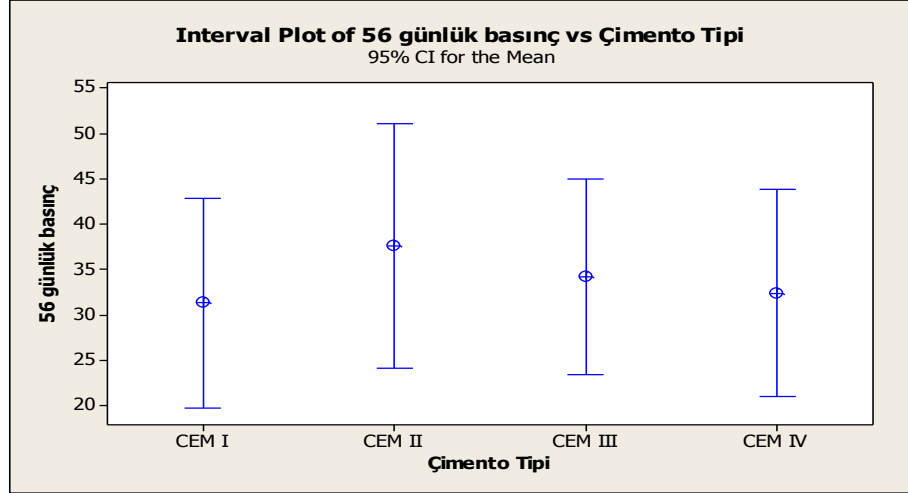
Şekil 5.19. Elli altı günlük havada soğutulmuş numunelerin basınç dayanımı ve çimento tipi ilişkisi için tek yönlü Anova analizi grafiği.

Tek yönlü Anova analizi çimento tipi ve basınç arasında uygulandığında tüm çimento tiplerinin dayanımları karar limitleri içerisinde yer almakta fakat Cem II tipinin farklılıklar gösterdiği açıkça görülmektedir (Şekil 5.19).



Şekil 5.20. Elli altı günlük havada soğutulmuş numunelerin basınç dayanımı ve sıcaklık arasındaki aralık grafiği.

Sıcaklık değişkenine göre çizilen 56 günlük basınç değerlerinin aralık grafiğinde aralıkların 450 °C sonrasında düşüş yaptığı görülmektedir (Şekil 5.20).



Şekil 5.21. Elli altı günlük havada soğutulmuş numunelerin basınç dayanımı ve çimento tipi arasındaki aralık grafiği.

Çimento tiplerini esas alan aralık grafiğinde ise en geniş aralık Cem II tipinde elde edilmiştir (Şekil 5.21).

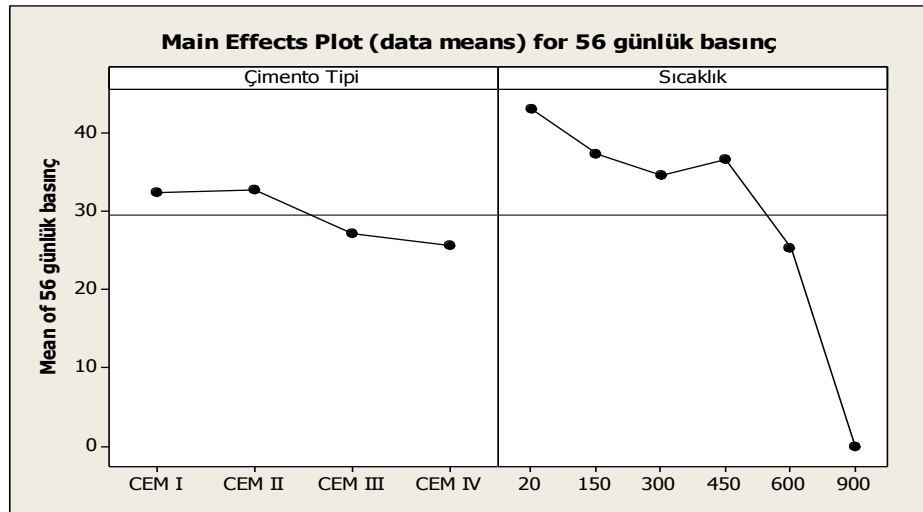
5.6. Elli Altı Günlük Suda Soğutma Uygulanmış Numunelerin Basınç Dayanımları

Yapılan iki yönlü Anova analizi sonucunda elde edilen 56 gün kür uygulanan ve suda soğutulan numunelerin basınç dayanımlarının ayrı ayrı sıcaklık ve çimento tiplerine karşı değerlendirilmesi sonucu elde edilen Anova tablosu Çizelge 5.4'te verilmiştir.

Çizelge 5.4. Elli altı günlük suda soğutulmuş numunelerin Anova tablosu.

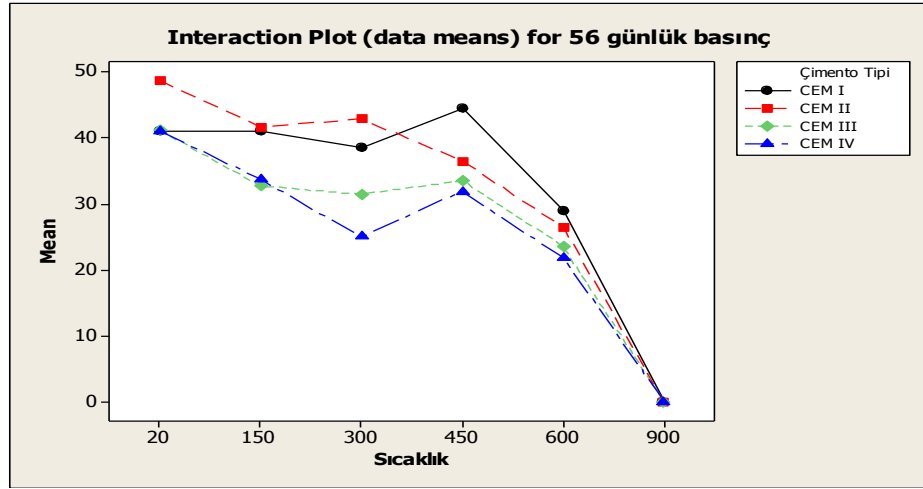
Kaynak	DF	SS	MS	F	P
Sıcaklık	5	4817.67	963.535	79.00	0.000
Çimento Tipi	3	235.33	78.445	6.43	0.005
Hata	15	182.94	12.196		
Toplam	23	5235.95			

Çizelge 5.4'te verilen Anova tablosu incelendiğinde; çimento tipine göre ($P=0,005<0,05$) ortalamalar arasında azda olsa farklılıklar olduğu görülmektedir. Sıcaklık değişkenine göre de ($P=0,000<0,05$) ortalamalar arasında büyük farklılıklar olduğu görülmektedir.



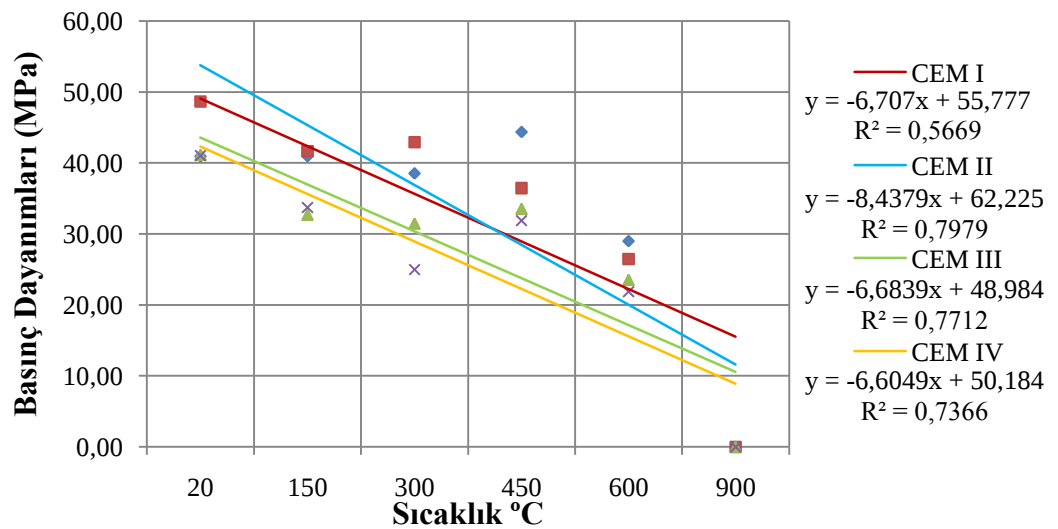
Şekil 5.22. Elli altı günlük suda soğutulmuş numunelerin ana etki büyüklükleri grafiği.

Elli altı günlük suda soğutulan numunelerin basınç dayanımları, çimento tipi ve sıcaklık değerlerine bağlı olarak çift yönlü Anova analizi yapıldığında elde edilen ana etki büyüklükleri grafiği Şekil 5.22'de görülmektedir. Cem I ve Cem II tiplerinin dayanımları genel ortalamanın üzerinde yer almıştır. Sıcaklığa karşı basınç dayanımları değerlendirildiğinde ani basınç dayanımı düşmesinin meydana geldiği kırılma noktası 450 °C ile 600 °C arasındadır.



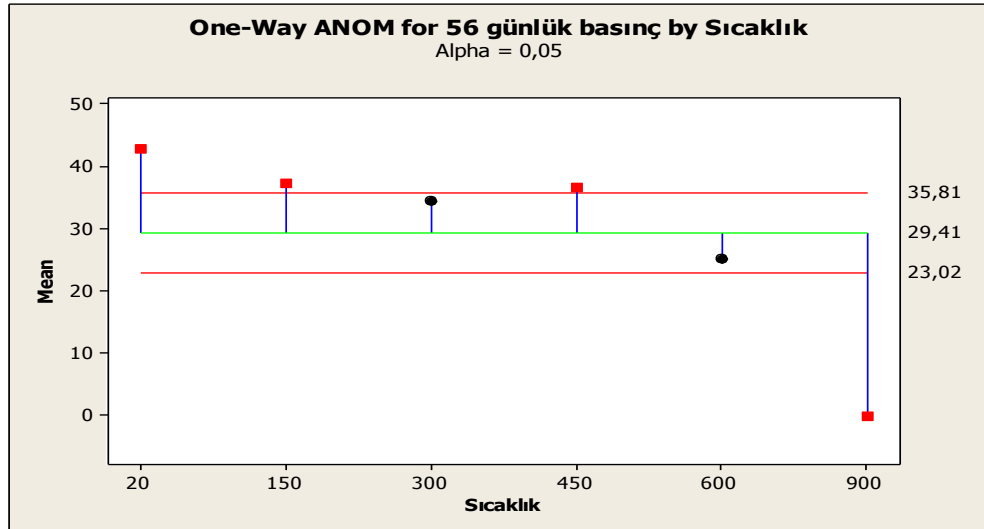
Şekil 5.23. Elli altı günlük suda soğutulmuş numunelerin etkileşimler grafiği.

Suda soğutulan numunelerin 28 günlük olan grubundan dayanımların ani iniş çıkışlar gösterdiği sonucuna varmıştık. Elli altı günlük numunelerin grafiği de bu sonucu desteklemektedir. Elli altı günlük havada soğutulan numunelerde katkılı çimentoların dayanımları yüksek çıkarken, suda soğutulan 56 günlük numunelerde Cem I çimentosunun dayanımı oldukça yüksektir. Cem I ve Cem II çimentoları özellikle 300 °C ve 450 °C’de diğer çimentolara nazaran yüksek dayanımlara ulaşmışlardır (Şekil 5.23).



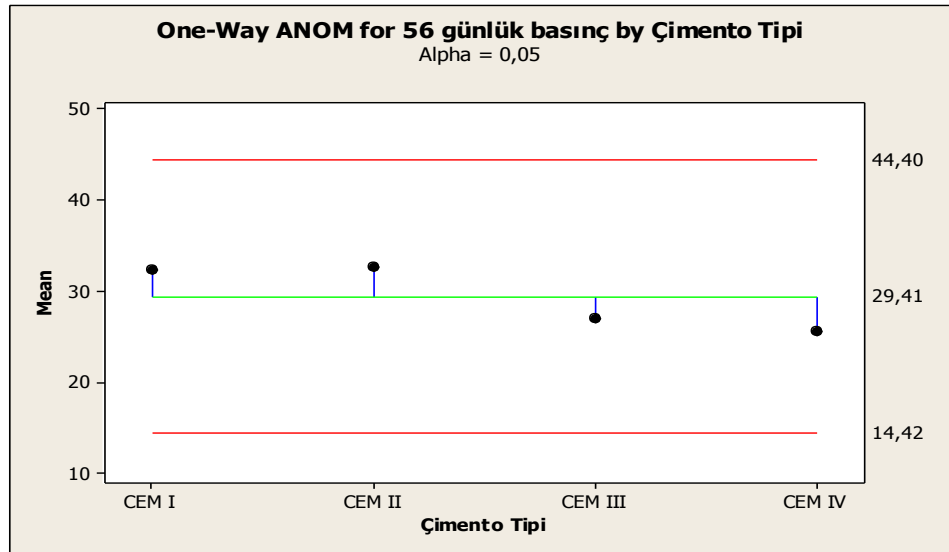
Şekil 5.24. Elli altı günlük suda soğutulmuş numuneler için basınç dayanımı- sıcaklık ilişkisi.

Şekil 5.24'te 56 gün kür uygulanmış ve suda soğutulmuş harç numuneleri için basınç dayanımı-sıcaklık ilişkisi incelenmiştir. Yirmi sekiz günlük suda soğutulan numunelerde olduğu gibi elli altı günlük suda soğutulan numunelerde de suda soğutmanın zararlı etkisi görülmektedir. Havada soğutmada elde ettiğimiz sonuçların aksine ön plana çıkan çimento tipleri Cem III, Cem IV değil Cem I ve Cem II olmuştur. Cem III ve Cem IV'ün basınç dayanımları 20 MPa'nın altına 450 °C'de düşerken, Cem I ve Cem II tipi çimentolarda 20 MPa'nın altına düşüş 600 °C'de gerçekleşmiştir.



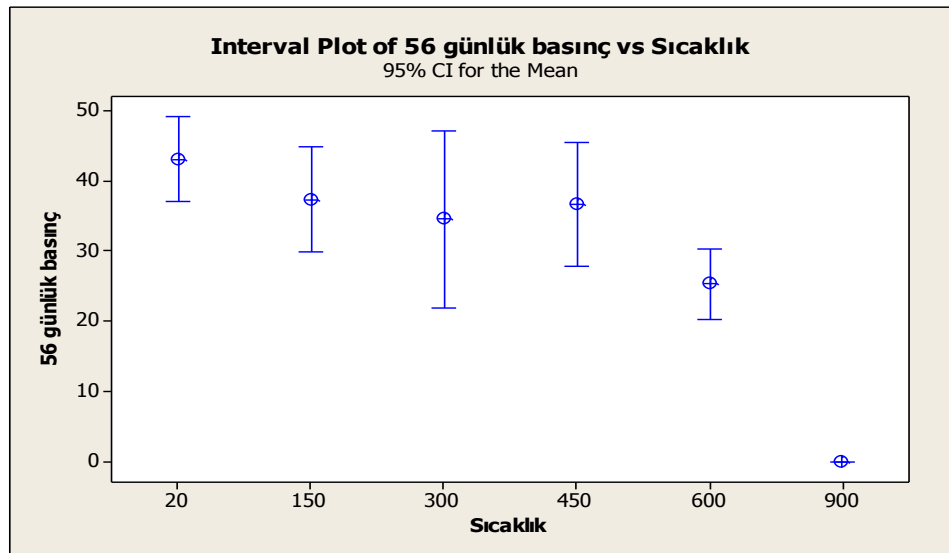
Şekil 5.25. Elli altı günlük suda soğutulmuş numunelerin basınç dayanımı ve sıcaklık ilişkisi için tek yönlü Anova analizi grafiği.

Elli altı günlük suda soğutulmuş numunelerden elde edilen basınç dayanımları sıcaklıkla tek yönlü olarak analiz edildiğinde dikkat çeken en önemli husus 450 °C'deki dayanım ortalamasının, 300 °C'deki dayanım ortalamasından fazla çıkmış olması ve üst karar limiti çizgisinin üzerine çıkmasıdır (Şekil 5.25). Bu durum suda soğutmanın etkisiyle dayanımların ani olarak iniş çıkış yapmasından kaynaklanmaktadır.



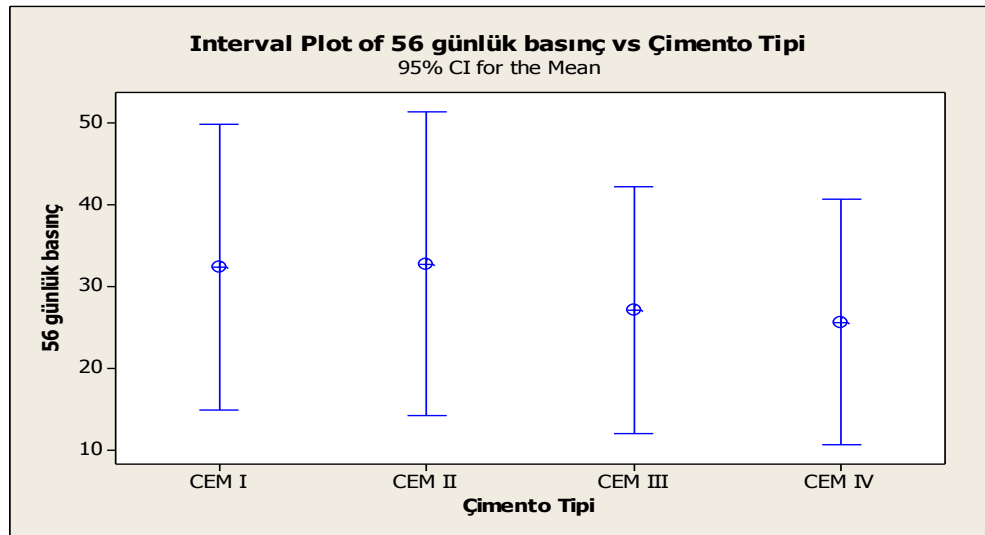
Şekil 5.26. Elli altı günlük suda soğutulmuş numunelerin basınç dayanımı ve çimento tipi ilişkisi için tek yönlü Anova analizi grafiği.

Elli altı günlük suda soğutulan numunelerin basınç dayanımları ile çimento tipleri arasında tek yönlü Anova analizi yapıldığında değerlerin karar limitleri arasında kaldığı görülmektedir (Şekil 5.26).



Şekil 5.27. Elli altı günlük suda soğutulmuş numunelerin basınç dayanımı ve sıcaklık arasındaki aralık grafiği.

Elli altı günlük suda soğutulmuş numunelerin basınç dayanımları ile sıcaklıklar arasında aralık grafiğine baktığımızda en geniş değişim aralığı 300 °C’de görülmektedir (Şekil 5.27).



Şekil 5.28. Elli altı günlük suda soğutulmuş numunelerin basınç dayanımı ve çimento tipi arasındaki aralık grafiği.

Çimento tiplerini esas alan aralık grafiğinde ise en geniş aralık Cem II tipinde elde edilmiştir (Şekil 5.28).

BÖLÜM 6

SONUÇLAR

Farklı çimento tipleri kullanılarak üretilen harç numunelerinde yüksek sıcaklık sonrası meydana gelen değişimlerin incelendiği bu tez kapsamında, üretilen harç numuneleri yüksek sıcaklığa maruz bırakılmış, fiziksel ve mekanik özelliklerindeki değişimlerin belirlenmesi için kontrol deneyleri yapılmıştır. Deneysel sonuçlar istatistiksel olarak incelenmiş, çalışmadan elde edilen sonuçlar aşağıda açıklanmıştır.

- Harçların mekanik özelliklerindeki değişim, bazı farklılıklar olsa da sıcaklık artışı ile dayanım azalması şeklinde görülmüştür.
- Farklı çimentolarla üretilen harç numunelerde basınç dayanımları yaklaşık olarak 300 °C'ye kadar belirgin bir düşüş göstermemiştir. Yirmi sekiz günlük numuneler 150 °C ve 300 °C sıcaklıklara maruz kaldığında Cem I S, Cem II H, Cem III H ve Cem III S gruplarına ait basınç dayanımlarının arttığı görülmüştür. Fakat sıcaklık 450 °C'ye ulaştığında Cem I S ve Cem III S dışındaki grupların dayanımlarının %30 unu kaybettiği görülmüştür. Cem III S grubu ise 900 °C'de suda dağılmasına rağmen 600 °C'de dahi %75 dayanımını korumuştur.
- Ani basınç dayanımı düşüşlerinin 28 günlük numuneler için 300-450 °C aralığında, 56 günlük numuneler için ise 450-600 °C aralığında meydana geldiği görülmüştür.
- Suda soğutma işlemi uygulanan tüm gruplarda (28 ve 56 günlük) basınç dayanımlarının ani iniş çıkışlar yaptığı görülmektedir. Buradan da suda soğutmanın zararlı etkisinin yüksek sıcaklık sonrası arta kalan

dayanımların değerlendirilmesinde yanıltıcı olabileceği sonucuna varılmıştır.

- Elli altı gün kür uygulanmış, 600 °C'ye maruz kalmış ve havada soğutulmuş numuneler esas alındığında en yüksek basınç dayanımını Cem III tipi çimento vermiştir. 900 °C'de havada soğutulan gruplarda ise 28 günlük numuneler için en iyi basınç dayanımı Cem II tipinde gözlenirken, 56 günlük numunelerde Cem III tipinde gözlenmiştir.
- Yirmi sekiz günlük eğilme dayanımlarını incelediğimizde yüksek sıcaklık etkisiyle ani düşmesine rağmen 150 °C ve 300 °C'de en iyi sonuçlar Cem III H grubunda elde edilmiştir. Cem III tipi çimento ile üretilen ve havada soğutma uygulanan grubun 150 °C'deki eğilme dayanımı kontrol numunesine nazaran %25 daha fazla olmuştur. Tüm gruplar için eğilme dayanımında meydana gelen azalma 300 °C'de ortalama %25 civarında iken Cem III H grubunda %8 azalma olmuştur.
- Tüm gruplar için eğilme dayanımındaki azalma, basınç dayanımındakinden daha fazla olmuştur. Gerek havada gerekse suda soğutulan numunelerde ilk sıcaklık değerimiz olan 150 °C'de dahi eğilme dayanımında belirgin azalmalar görülmüştür. Başka bir deyişle yapılarda eğilmeye maruz kalan elemanlar, basınca maruz kalan elemanlara göre yüksek sıcaklığa karşı daha hassastırlar. Bunun sebebi de yüksek sıcaklık etkisiyle yapıda meydana gelen çatlaklardır.
- Soğutma türü yüksek sıcaklığa maruz kalmış tüm numuneleri direkt olarak etkilemektedir. Havada (yavaş) soğutulmuş numuneler, bazı farklılıklar gözlenmesine rağmen suda soğutulmuş numunelere nazaran mekanik özelliklerini daha iyi korumuştur. Bu sonuç yangın söndürmenin binalar üzerinde negatif etkisi olduğunu göstermektedir.

Ayrıca bu etkinin iç yapıda meydana gelen termal şok etkisinden kaynaklandığını söyleyebiliriz.

- Ultrases geçiş hızı değerleri 450 °C'ye kadar çimento tipi ve soğutma türünden fazla etkilenmeden yükselen sıcaklıkla azalmıştır. Yirmi sekiz günlük kontrol numunelerinden en düşük ses geçiş hızı 3.59 km/sn ile Cem I grubunda; en büyük değer ise 3.94 km/sn ile Cem IV grubunda elde edilmiştir. Elli altı günlük kontrol numunelerinden en düşük ses geçiş hızı 3.78 km/sn ile Cem I ve Cem III gruplarında; en büyük değer ise 4.00 km/sn ile Cem IV grubunda elde edilmiştir. Elli altı gün kür uygulanan numunelerin yirmi sekiz günlük numunelere göre ultrases geçiş hızı değerleri belirli bir oranda yüksek olmasına rağmen grafikler birebir paralellik göstermektedir. Suda soğutma şeklinin 450 °C ve 600 °C'de ultrases geçiş hızlarında daha az düşüslere neden olduğu görülmüştür.
- Yüksek sıcaklık etkisinde kalan harçların birim hacim ağırlıklarında maksimum %10 oranında düşüşler gözlenmiştir.
- Beklenildiği gibi 56 günlük harç numuneleri yapılan tüm kontrol deneylerinde 28 günlük numunelerden daha iyi sonuçlar vermişlerdir.
- Her dört çimento tipi içinde 900 °C'ye maruz kalan numunelerin suda soğutulan gruplarında soğutma esnasında su içerisinde dağıldığından, bu numunelerde kontrol deneyleri yapılamamıştır.
- İstatistiksel analize göre 28 ve 56 günlük gruplar ve her iki soğutma türü de dikkate alındığında katkılı çimento tipleri olan Cem II, Cem III ve Cem IV'ün Cem I'e nazaran yüksek sıcaklık karşısında daha iyi sonuçlar verdiği görülmüştür.

Harçlarda yüksek sıcaklık etkisine karşın çimento tipleri ve soğutma türlerinin kıyaslandığı bu çalışmada, çimento tipleri arasında büyük farklılıklar gözlenmese de yüksek sıcaklığa maruz kalacağı öngörülen yapılarda Cem III tipi çimento kullanılması önerilmektedir. Soğutma türleri açısından havada soğutmanın her dört çimento tipi içinde daha iyi sonuçlar verdiği görülmüştür, farklı soğutma türlerinin etkileri ayrıca incelenmelidir. Bu çalışmadan elde edilen sonuçların binalarda yangın güvenliği açısından kullanılabilmesi için agrega, s-ç oranı gibi faktörler de değişken alınarak üretilen farklı harç ve beton türlerinde ayrıca değerlendirilmeleri yapılmalıdır.

KAYNAKLAR DİZİNİ

- Abrams, M., 1971, Compressive strength of concrete at temperatures to 1600 °C, Temperature and Concrete, ACI, 25, 33-58.
- Akman, M.S., 2000, Betona gömülü çeliğin korozyonu, riskin saptanması, önlemler ve onarım, Sika Teknik Bülten, 3, 4, 3-10.
- Aköz F. ve Yüzer N., 1994, Yüksek sıcaklığın nedenleri ve betonarme elemanlara etkileri, Yıldız Teknik Üniversitesi Dergisi, sayı 3, İstanbul.
- Aköz F., Yüzer N. ve Koral S., 1995, Portland çimentolu ve silis dumanı katkılı harçların fiziksel ve mekanik özelliklerine yüksek sıcaklığın etkileri”, İMO Teknik Dergi, sayı 1, İstanbul.
- Allen D.C. ve Desai P.M., 1967, The influence of aggregate on the behaviour of concrete at elevated temperatures, Nuclear Engineering and Design, sayı 6, sayfa 75-77.
- Alonso C., Andrade C. ve Khoury G.A., 2003a, Porosity and microcracking, International Centre for Mechanical Sciences, Course on Effect of Heat on Concrete, Udine/Italy.
- Alonso C., Andrade C. ve Castellote M. ve Khoury G.A., 2003b, Microstructure-solid phases, International Centre for Mechanical Sciences, Course on Effect of Heat on Concrete, Udine/Italy.
- Anderberg Y., 2003, Thermal properties and analysis, International Centre for Mechanical Sciences, Course on Effect of Heat on Concrete, Udine/Italy.
- Andrade C., Alonso C. ve Khoury G.A., 2003a, Relating microstructure to properties, International Centre for Mechanical Sciences, Course on Effect of Heat on Concrete, Udine/Italy.
- Andrade C., Alonso C. ve Khoury G.A., 2003b, Microstructure and moisture, International Centre for Mechanical Sciences, Course on Effect of Heat on Concrete, Udine/Italy.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam ediyor)

ASHRAE Fundamentals, 1997, Yakacaklar ve yanma, Tesisat Mühendisleri Derneği Teknik Yayınları:2, bölüm 15.

ASTM C 597-02, 2002, Standard test method for pulse velocity through concrete.

Aydın S., Baradan B., 2003, Yüksek sıcaklığa dayanıklı bağlayıcı geliştirilmesi, TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası 5. Ulusal Beton Kongresi, sayfa 451-460, İstanbul.

Aydın, S., Development of a high-temperature-resistant mortar by using slag and pumice, Fire Safety Journal, sayı 43, sayfa 610-617.

Avcı A.U., 1984, Dökümde enerji tasarrufu, Yıldız Teknik Üniversitesi Yayınları, sayı 178, İstanbul.

Baradan B., Yazıcı H. ve Ün H., 2002, Betonarme yapılarda kalıcılık, Dokuz Eylül Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Yayınları, 282 s.

Blundell, R., 1976, The properties of concrete subject to elevated temperature, CRIA Underwater Engineering Group.

BS 1881 Part 203, 1986, Recommendations on the non-destructive testing on concrete.

CEB, Bulletin D'Information, 1991, Fire design of concrete structures, Lausanne.

Chan, Y.N.S., Peng, G.F. and Anson, M., 1999a, Residual strength and pore structure of high-strength concrete and normal strength concrete after exposure to high temperature, Cement and Concrete Composites, 21, 23-27.

Chan, Y.N.S., Peng, G.F. and Anson, M., 1999b, Fire behavior of high performance concrete made with silica fume at different moisture contents, ACI Materials Journal, 95, 405-409.

Cülfik, M.S., 2001, Deterioration of bond between cement paste and aggregate at high temperatures PhD. thesis, Boğaziçi University, 175 p.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam ediyor)

- Davis, H.S., 1967, Effect of high temperature exposure on concrete, Materials Research and Standards, 7, 10, 452-459.
- Demir, A., 2008, Kiremit kırığı agregalı betonlarda yüksek sıcaklık etkisinin incelenmesi, Doktora Tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.
- Dias, W.P.S., Khoury, G.A. and Sullivan, P.J.E., 1990, Mechanical properties of hardened cement paste exposed to temperatures up to 700 °C (1292 F), ACI Materials Journal, 8, 2, 160-166.
- Feldman, R.F. and Ramachandran, V.S., 1971, Differentiation of interlayer and adsorbed water in hydrated Portland cement ion thermal analysis, Cement and Concrete Research, 1, 607-611.
- Felicetti, R. and Gambarova, P.G., 1998, Effect of high temperature on residual compressive strength of high strength siliceous concretes, ACI Materials Journal, 95, 395-406.
- Haddad R.H. ve Shannis L., 2004, Post-fire behavior of Bond between high strength pozzolanic concrete and reinforcing steel, Construction and Building Materials, sayı 18, sayfa 425-435.
- Haksever A., 1991, Yangın Odalarının teorik-nümerik yangın analizleri için modellenmesi, Akdeniz Üniversitesi Isparta Mühendislik Fakültesi Dergisi, sayı 6, sayfa 57-66.
- Khoury G.A., 1992, Compressive strength of concrete at high temperatures: A reassessment, Magazine of Concrete Research, sayı 44, sayfa 291-309.
- Khoury G.A., 2000, Effect of fire on concrete and concrete structures, Progress in Tructural Engineering and Materials, sayı 2, sayfa 429-447.
- Khoury G.A., 2003, Fire and Assessment, International Centre for Mechanical Sciences, Course on Effect of Heat on Concrete, Udine/Italy.
- Kocataşkın, F., 2000, Yapı Malzemesi Bilimi, Birsen Yayınevi, İstanbul

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam ediyor)

- Lankard, D.R. and Birkimer, D.L., 1971, Effect of moisture content on the structural properties of Portland cement concrete exposed to temperatures up to 500 F, ACI Temperature and Concrete, SP-25, 59-102.
- Luo, X., Sun, W. and Chan, S.Y.N., 2000, Effect of heating and cooling regimes on residual strength and microstructure of normal strength and high-performance concrete, Cement and Concrete Research, 30, 379-383.
- Mendeş M., Subaşı S. ve Başpınar E., 2005, Bilimsel çalışmalarda p-değerlerinin rapor edilmesi, Tarım Bilimleri Dergisi, 11 (4), sayfa 359-363.
- Neville A.M., 2000, Properties of concrete, Fourth Edition, Longman Scientific and Technical, New York/USA.
- Onaran K., 2000, Malzeme Bilimi, Yedinci Basım, Bilim Teknik Yayınevi, İstanbul.
- 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.
- Papayianni I. ve Valliasis Th., 2005, Heat deformation of fly ash concrete, Cement and Concrete Composites, sayı 27, sayfa 249-254.
- Peng, G.F., Chan, S.Y.N, Song, Q.M. and Yi, Q.X., 2006, Effect of high temperature on concrete: A literature review, Key Engineering Materials, 302-303, 138-149.
- Perkins P.H., 1986, Repair, protection and waterproofing of concrete structures, Elsevier Applied Science Publishers Ltd., England.
- Postacıoğlu B., 1987, Beton, Cilt 2, Teknik Kitaplar Yayınevi, İstanbul.
- Ramakrishnan V., Shafai H.F. ve Wu G., 1991, Cyclic heating and cooling effects on concrete durability, Concrete Durability.
- Riley, M.A., 1991, Possible new method for the assessment of fire damaged concrete, Magazine of Concrete Research, sayı 43, sayı 87-92.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam ediyor)

- Sakr K. ve EL-Hakim E., 2005, Effect of temperature or fire on heavy weight concrete properties, Cement and Concrete Research, sayı 35, sayfa 590-596.
- Sarshar, R and Khoury, G.A., 1993, Material and environmental factors influencing the compressive strength of unsealed cement paste and concrete at high temperatures, Magazine of Concrete Research, 45, 162, 51-61.
- 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 & Concrete Composites, sayı 27, sayfa 239-248.
- Scherefleer, B.A., Brunello P., Gawin D., Majorana C.E. and Pesavento, F., 2002, Concrete at high temperature with application to tunnel fire, Computational Mechanics, 29, 43-51.
- Shneider, U., 1976, Behaviour of concrete under thermal steady state and none-steady state conditions, Fire and Materials, 1, 103-115.
- 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, sayı 31, sayfa 1533-1538.
- Topçu, İ.B. ve Demir, A., 2005, Uçucu kül katkılı harçlarda yüksek sıcaklık etkisi, İMO İstanbul Şubesi, 6. Ulusal Beton Kongresi, İTÜ Süleyman Demirel Kültür Merkezi, İstanbul, 101-115.
- Topçu, İ.B., 2006, Beton teknolojisi, Uğur Ofset A.Ş., 570s.
- Topçu, İ.B. ve Demir, A., 2007, Yüksek sıcaklık uygulama süresinin harç özelliklerine etkisi, 7.
- Ulusal Beton Kongresi, İTÜ Süleyman Demirel Kültür Merkezi, İstanbul, 455-463.
- TS EN 196-1, 2002, Çimento deney yöntemleri, dayanım tayini, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam ediyor)

- TS 1247, 1989, Beton yapım, döküm ve bakım kuralları-normal hava koşullarında, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS 1263, 1983, Yapı elemanlarının yanmaya dayanıklılık sınıfları ve yanmaya dayanıklılık deney metotları.
- TS EN 1363-1, 2001, Yangına dayanıklılık deneyleri Bölüm 1; Genel kurallar, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 12390-3, 2002, Beton-sertleşmiş beton deneyleri-Bölüm 3: Deney numunelerinde basınç dayanımının tayini, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 12390-7, 2002, Beton-sertleşmiş beton deneyleri-Bölüm 7; Sertleşmiş betonun yoğunluğunun tayini, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- Xiao J. ve König G., 2004, Study on concrete at high temperature in China-an Overview”, Fire Safety Journal, sayı 39, sayfa 89-103.
- Xu Y., Wong Y.L., Poon C.S. ve Anson M., 2001, Impact of high temperature on PFA concrete, Cement and Concrete Research, sayı 31, sayfa 1065-1073.
- Yamazaki, N., Yamazaki, M. and Mocida, T., 1995, Structural behavior of reinforced concrete structures at high temperatures, Nuclear Engineering and Design, 138, 156, 121-138.
- Yüzer N., Aköz F. ve Öztürk L.D., 2004, Compressive strength–color change relation in mortars at high temperature, Cement and Concrete Research, sayı 34, sayfa 1803-1807.
- Zakaira, M. and Cabrera, J.G., 1996, Performance and durability of concrete made with demolition waste and artificial fly ash-clay aggregates, Waste Management, 16, 1-3, 151-158.

http://tr.wikipedia.org/wiki/Varyans_analizi

EKLER

Ek 1. Çizelgeler

Ek 2. Yapılan Deneysel Çalışma Fotoğrafları

EK.1.
ÇİZELGELER

Çizelge Ek 1. Harç numunelerinin 28 günlük ultrases geçiş hızları (km/sn).

Sıcaklık (°C)	CEM I		CEM II		CEM III		CEM IV	
	H	S	H	S	H	S	H	S
20	3.59		3.66		3.84		3.94	
150	3.53	3.81	3.68	3.76	3.87	3.94	3.85	3.71
300	3.64	3.29	3.68	3.62	3.35	3.27	3.33	3.25
450	3.32	3.56	2.97	3.43	2.47	3.41	2.68	3.31
600	1.56	3.03	1.49	3.14	1.86	3.01	1.90	3.17
900	1.15	-	1.15	-	1.20	-	1.35	-

Çizelge Ek 2. Harç numunelerinin 56 günlük ultrases geçiş hızları (km/sn).

Sıcaklık (°C)	CEM I		CEM II		CEM III		CEM IV	
	H	S	H	S	H	S	H	S
20	3.78		3.80		3.78		4.00	
150	3.75	3.79	3.76	3.76	3.71	3.86	3.76	3.88
300	3.34	3.39	3.44	3.39	3.19	3.20	3.30	3.43
450	2.82	3.29	2.89	3.27	2.72	3.24	2.64	3.27
600	1.60	3.00	1.60	3.10	2.00	3.20	2.20	3.00
900	1.15	-	1.20	-	1.20	-	1.30	-

Çizelge Ek 3. Harç numunelerinin 28 günlük eğilme dayanımları (MPa).

Sıcaklık (°C)	CEM I		CEM II		CEM III		CEM IV	
	H	S	H	S	H	S	H	S
20	13.89		16.34		9.27		12.86	
150	14.85	13.60	15.79	13.62	11.65	10.33	12.96	10.26
300	11.54	11.67	13.14	11.31	8.67	6.75	11.17	8.08
450	9.66	9.08	9.62	10.16	5.63	5.54	7.00	7.16
600	5.80	6.58	5.30	5.94	3.50	3.20	4.05	4.00
900	2.50	-	2.02	-	1.78	-	1.90	-

Çizelge Ek 4. Harç numunelerinin 56 günlük eğilme dayanımları (MPa).

Sıcaklık (°C)	CEM I		CEM II		CEM III		CEM IV	
	H	S	H	S	H	S	H	S
20	15.01		13.08		11.96		15.00	
150	13.84	13.45	16.80	12.95	14.22	11.27	15.74	11.31
300	12.78	9.89	14.24	12.47	11.07	8.74	13.72	8.63
450	11.66	9.77	9.64	9.02	6.77	7.58	7.42	8.77
600	6.00	5.24	4.32	4.00	3.90	3.88	3.99	4.35
900	3.30	-	2.16	-	1.92	-	1.50	-

Çizelge Ek 5. Harç numunelerinin 28 günlük basınç dayanımları (MPa).

Sıcaklık (°C)	CEM I		CEM II		CEM III		CEM IV	
	H	S	H	S	H	S	H	S
20	31.15		31.25		33.13		39.38	
150	33.96	36.88	39.58	25.42	35.83	36.46	35.00	41.88
300	32.50	33.33	39.38	36.67	36.88	32.71	32.50	35.63
450	22.71	30.46	21.88	19.58	22.71	31.25	29.79	30.63
600	20.20	20.00	20.00	15.63	21.20	25.00	19.19	22.21
900	13.00	-	14.14	-	13.20	-	13.00	-

Çizelge Ek 6. Harç numunelerinin 56 günlük basınç dayanımları (MPa).

Sıcaklık (°C)	CEM I		CEM II		CEM III		CEM IV	
	H	S	H	S	H	S	H	S
20	40.94		48.65		41.15		41.04	
150	40.58	40.96	50.21	41.67	40.79	32.71	41.88	33.75
300	36.67	38.54	43.54	42.92	38.96	31.46	37.71	25.00
450	33.33	44.38	39.58	36.46	38.13	33.54	34.58	31.88
600	23.35	29.00	29.55	26.46	28.11	23.54	25.00	21.88
900	13.05	-	17.05	-	15.10	-	14.00	-

Çizelge Ek 7. Harç numunelerinin 28 günlük birim hacim ağırlıkları (gr/cm³).

Sıcaklık (°C)	CEM I		CEM II		CEM III		CEM IV	
	H	S	H	S	H	S	H	S
20	2.16		2.15		2.19		2.18	
150	2.17	2.18	2.15	2.17	2.19	2.18	2.20	2.18
300	2.10	2.15	2.09	2.09	2.12	2.17	2.16	2.17
450	2.06	2.07	2.05	2.04	2.09	2.10	2.10	2.11
600	2.00	2.04	1.98	2.00	2.08	2.00	2.00	1.99
900	1.95	-	1.93	-	1.98	-	1.96	-

Çizelge Ek 8. Harç numunelerinin 56 günlük birim hacim ağırlıkları (gr/cm³).

Sıcaklık (°C)	CEM I		CEM II		CEM III		CEM IV	
	H	S	H	S	H	S	H	S
20	2.19		2.18		2.22		2.21	
150	2.20	2.21	2.17	2.20	2.20	2.21	2.23	2.21
300	2.13	2.18	2.11	2.12	2.13	2.20	2.19	2.20
450	2.07	2.08	2.06	2.05	2.10	2.11	2.11	2.12
600	2.03	2.07	2.00	2.03	2.09	2.03	2.03	2.02
900	1.98	-	1.95	-	1.99	-	1.99	-

EK.2.

YAPILAN DENEYSEL ÇALIŞMA FOTOĞRAFLARI



Şekil Ek 2.1. Numune üretiminde kullanılan çimento tipleri.



Şekil Ek 2.2. Harç üretiminde kullanılan standart kum.



Şekil Ek 2.3. Harçların mikserde karıştırılması.



Şekil Ek 2.4. Harç karışımlarının hazırlanması.



Şekil Ek 2.5. Numunelerin kalıplara yerleştirilmesi.



Şekil Ek 2.6. Kalıplara yerleştirilmiş harç numuneleri.



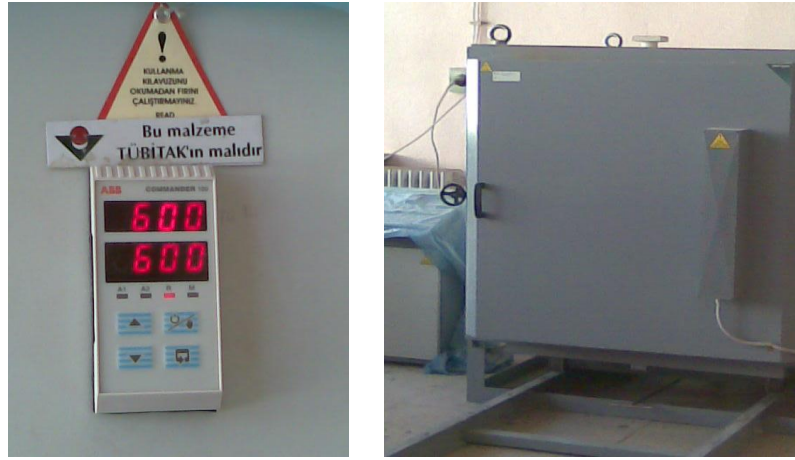
Şekil Ek 2.7. Kür havuzunda bekleyen harç numuneleri.



Şekil Ek 2.8. Yüksek sıcaklık öncesi numunelerin etüvde kurutulması.



Şekil Ek 2.9. Numunelerin fırına yerleştirilmesi.



Şekil Ek 2.10. Yüksek sıcaklık uygulaması.



Şekil Ek 2.11. Harç numunelerinin havada ve suda soğutma süreci.



Şekil Ek 2.12. 900 °C sonrası suda soğutma uygulanan harç numunelerinin suda dağılması.



Şekil Ek 2.13. Ultrases geçiş süresi deneyi.



Şekil Ek 2.14. Eğilme deneyi.



Şekil Ek 2.15. Basınç deneyi.