

Farklı Çimento Tipleri ile Üretilen Betonların Yüksek Sıcaklık ve
Değişik Soğutma Koşulları Altındaki Fiziksel ve Mekanik Özellikleri

Serhat Özbey

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Haziran 2009

Physical and Mechanical Properties of Concretes Produced with
Different Cement Types at Elevated Temperature and Different Cooling Conditions

Serhat Özbey

MASTER OF SCIENCE THESIS

Department of Civil Engineering

June 2009

Farklı Çimento Tipleri ile Üretilen Betonların Yüksek Sıcaklık ve
Değişik Soğutma Koşulları Altındaki Fiziksel ve Mekanik Özellikleri

Serhat Özbey

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 Serhat Özbey'in YÜKSEK LİSANS tezi olarak hazırladığı "Farklı Çimento Tipleri ile Üretilen Betonların Yüksek Sıcaklık ve Değişik Soğutma Koşulları Altındaki Fiziksel ve Mekanik 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 : Prof. Dr. Eşref Ünlüoğlu

Üye : Prof. Dr. İlker Bekir Topçu

Üye : Doç. Dr. Nevzat Kırar

Üye : Yrd. Doç. Dr. Ö.Fatih Eser

Üye : Yrd. Doç. Dr. Mustafa Önder

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

Prof. Dr. Nimetullah BURNAK

Enstitü Müdürü

FARKLI ÇİMENTO TİPLERİ İLE ÜRETİLEN BETONLARIN YÜKSEK SICAKLIK VE DEĞİŞİK SOĞUTMA KOŞULLARI ALTINDAKİ FİZİKSEL VE MEKANİK ÖZELİKLERİ

SERHAT ÖZBEY

ÖZET

Yüksek sıcaklık, yapılarda dayanıklılık sorununa neden olan önemli fiziksel etkilerden biridir. Herhangi bir nedenle yüksek sıcaklık etkisinde kalan betonların fiziksel ve mekanik özelliklerinde bazı değişiklikler meydana gelir. Meydana gelebilecek bu değişiklikler performans açısından oldukça önem taşımaktadır. Bu çalışmada, yüksek sıcaklığın ve söndürme türünün betonun fiziksel ve mekanik özelliklerine etkileri deneysel olarak araştırılmıştır. Deneysel çalışma, numune üretimi, kürü, yüksek sıcaklık etkisi, soğutma süreci, fiziksel ve mekanik deneyler olmak üzere beş aşamada gerçekleştirilmiştir. Üretimde, CEM I 42.5 R ve CEM III/A 32.5 N çimentosu, tane boyutu 0-4 mm olan nehir kumu, 4-16, 16-31.5 mm olan kırmataşlar kullanılmıştır. Yüksek sıcaklığın betonun fiziksel ve mekanik özelliklerine etkilerini araştırmak için beton numuneleri 28 ve 56 günlük kür sürelerinin sonunda, TS EN 1363-1'e uygun olarak 3 saat süreyle 150, 300, 450 ve 600 °C olmak üzere dört farklı sıcaklıkta ısıtılmış, soğutma işlemi havada ve suda olmak üzere iki farklı grupta gerçekleştirilmiştir. Oda sıcaklığına kadar soğutulan numunelerde, birim ağırlık, ultrases geçiş hızı, hacimce su emme değerleri, yarmada çekme dayanımı, yüzey sertliği dayanımı ve basınç dayanımı değerleri belirlenmiştir. Deney sonuçları istatistiksel yöntemle de değerlendirilmiş, yüksek sıcaklık ve soğutma türünün betonun basınç dayanımına etkisi istatistiksel olarak yorumlanmıştır. Deney sonuçları; yüksek sıcaklıkların ve söndürme türünün betonlar üzerinde kayda değer fiziksel ve mekanik etkiler yaptığını göstermiştir. Özellikle 600 °C'de betonların dayanımlarında çok büyük kayıpların meydana geldiği, kayıpların havada soğutma uygulanan betonlarda suda soğutma uygulananlara göre daha az olduğu görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Çimento, Beton, Yüksek Sıcaklık, Soğutma Türü, Basınç Dayanımı

**PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF CONCRETES PRODUCED
WITH DIFFERENT CEMENT TYPES AT ELEVATED TEMPERATURE AND
DIFFERENT COOLING CONDITIONS**

SERHAT ÖZBEY

SUMMARY

High temperature is one of the important physical effects that lead to durability problem. The physical and mechanical properties of concretes change if they are exposed to high temperatures. These changes are very important for its performance. In this study, the effects of high temperatures and extinguishing type on the physical and mechanical properties of the concrete were investigated by experimentally. Experimental study comprises of five stages as specimen production, cure, high temperature process, cooling process, physical and mechanical tests. In the production, CEM I 42.5 R and CEM III/A 32.5 N cements, river sand in the range of 0-4 mm size, crushed stone in the range of 4-16 and 16-31.5 mm sizes are used. For investigating the effect of high temperature on physical and mechanical properties of concrete, concrete specimens after 28 and 56 days curing periods, are exposed to 150, 300, 450 and 600 °C for 3 hours according to TS EN 1363-1 and samples cooled to the room temperature in water and in air. Unit weight, ultrasonic pulse velocity, values of water absorption by volume, tensile splitting strength, surface hardness strength and compressive strength are determined and recorded after cooling the specimens to the room temperatures. Experimental results are evaluated by using statistical method, the effects of high temperature and cooling type to compressive strength of concrete has been interpreted as statistically. Experimental results have shown that elevated temperatures and type of extinguishing have significant effects on the physical and mechanical properties of concretes. Important strength losses in concrete were observed especially for 600 °C and these strength losses to be less than in air cooling to in water cooling.

Keywords: Cement, Concrete, High Temperature, Cooling Type, Compressive Strength

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans çalışmamın; ders aşaması, laboratuvar çalışmaları ve tez aşamasında, bana her türlü destek ve olanağı sağlayan, danışman hocam Sayın Yrd. Doç. Dr. Ö. Fatih Eser başta olmak üzere, Prof. Dr. İlker Bekir Topçu'ya, Ağustos 2008 döneminde okulumuzda tamamlanan “Kiremit Kırıklılı Betonlarda Yüksek Sıcaklık Etkisinin İncelenmesi” başlıklı araştırma projesini destekleyen ve yüksek sıcaklık fırınının laboratuvarımıza kazandırılmasını sağlayan TÜBİTAK Mühendislik Araştırma Grubu'na ve her konuda beni destekleyen aileme, sonsuz teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET.....	v
SUMMARY.....	vi
TEŞEKKÜR.....	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ	xi
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	xv
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	xvi
 1. GİRİŞ	 1
 2. KONU İLE İLGİLİ GENEL BİLGİLER	 3
2.1. Yangın ve Yüksek Sıcaklık Etkisi	3
2.1.1. Yangın	4
2.1.2. Yüksek sıcaklığın betona etkisi	6
2.1.2.1. Yüksek sıcaklığın çimento hamuruna etkisi	7
2.1.2.2. Yüksek sıcaklığın agregaya etkisi	13
2.2. Yüksek Sıcaklığın Betonun Isıl Özelliklerine Etkisi	15
2.2.1. Isıl iletkenlik	15
2.2.2. Özgül ısı	16
2.2.3. Isıl genleşme	16
2.2.4. Isıl yayılma	16
2.2.5. Isı şoku parametresi	17
2.3. Yüksek Sıcaklığın Betonun Fiziksel Özelliklerine Etkisi	17
2.3.1. Kütle kaybı	18
2.3.2. Birim hacim ağırlığı	18
2.3.3. Boşluk oranı	19
2.3.4. Renk	20

İÇİNDEKİLER (devam)

	<u>Sayfa</u>
2.4. Yüksek Sıcaklığın Betonun Mekanik Özelliklerine Etkisi	21
2.4.1. Basınç dayanımı	22
2.4.1.1. Betonda ısıtma sürecinde buharlaşabilir suyun basınç dayanımındaki rolü	23
2.4.1.2. Soğutma türünün basınç dayanımına etkisi	23
2.4.2. Çekme dayanımı	24
2.4.3. Elastisite modülü	25
3. DENEYSEL ÇALIŞMA	27
3.1. Üretimde Kullanılan Malzemeler	28
3.1.1. Çimentolar	28
3.1.2. Kaba Agrega	29
3.1.3. Kum	31
3.1.4. Su	31
3.1.5. Kimyasal katkı	31
3.2. Numune Üretimi	32
3.3. Yüksek Sıcaklık Uygulaması ve Soğutma Süreci	33
3.4. Yapılan Deneyler	33
3.4.1. Birim ağırlık	34
3.4.2. Ultrases geçiş hızlarının belirlenmesi	34
3.4.3. Yüzey sertliği deneyi	35
3.4.4. Basınç dayanımı deneyi	35
3.4.5. Yarmada çekme deneyi	36
3.4.6. Hacimce su emme deneyi	36
4. DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ	37
4.1. Ultrases Geçiş Değerlerinin Değerlendirilmesi.....	37

İÇİNDEKİLER (devam)

	<u>Sayfa</u>
4.2. Yarmada Çekme Dayanımının Değerlendirilmesi.....	39
4.3. Basınç Dayanımının Değerlendirilmesi.....	40
4.4. Birim Hacim Ağırlıkların Değerlendirilmesi.....	42
4.5. Yüzey Sertliği Değerlerinin Değerlendirilmesi.....	43
4.6. Hacimce Su Emme Değerlerinin Değerlendirilmesi.....	45
5. DENEY SONUÇLARININ İSTATİSTİKSEL ANALİZİ.....	46
5.1. Varyans Analizi	46
5.1.1. Tek yönlü varyans analizi	46
5.1.2. Çoklu değişirli varyans analizi	47
5.2. Bilimsel Çalışmalarda P Değerinin Rapor Edilmesi	47
5.3. Yirmi Sekiz Günlük Havada Soğutma Uygulanmış Numunelerin Basınç Dayanımları	48
5.4. Yirmi Sekiz Günlük Suda Soğutma Uygulanmış Numunelerin Basınç Dayanımları	52
5.5. Elli Altı Günlük Havada Soğutma Uygulanmış Numunelerin Basınç Dayanımları	57
5.6. Elli Altı Günlük Suda Soğutma Uygulanmış Numunelerin Basınç Dayanımları	61
6. SONUÇLAR	71
7. KAYNAKLAR DİZİNİ.....	74

EKLER

Ek 1. Çizelgeler

Ek 2. Yapılan Deneysel Çalışma Fotoğrafları

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
2.1. Yangın ve deneysel sıcaklık artışı-zaman ilişkisi.....	3
2.2. Standart sıcaklık-zaman eğrisi	5
2.3. Boşluk suyu transferi	8
2.4. Doygun buhar basıncı ile sıcaklık arasındaki ilişki.....	10
2.5. Çimento hamurunda dayanım ve sıcaklık ilişkisi.....	11
2.6. Çimento hamurunda ağırlık kaybı ve sıcaklık ilişkisi	12
2.7. Çimento hamurunda elastisite modülü-sıcaklık ilişkisi	13
2.8. Ağırlık kaybının sıcaklıkla değişimi.....	19
2.9. Normal betonda basınç dayanımı-sıcaklık ilişkisi	22
2.10. Basınç dayanımının soğutma şekline göre sıcaklıkla değişimi.....	24
2.11. Normal betonda çekme dayanımı-sıcaklık ilişkisi	25
2.12. Normal betonda elastisite modülü-sıcaklık ilişkisi.....	26
2.13. Betonun elastisite modülünün sıcaklıkla değişimi.....	26
3.1. Agregalara ait granülometri eğrileri	30
3.2. Beton numunelerinde ses geçiş süresinin ölçümü.....	35
4.1. Yirmi sekiz günlük beton numunelerinin sıcaklık-ultrases geçiş hızı ilişkisi.....	37
4.2. Elli altı günlük beton numunelerinin sıcaklık-ultrases geçiş hızı ilişkisi.....	38
4.3. Yirmi sekiz günlük beton numunelerinin sıcaklık-yarmada çekme dayanımı ilişkisi.....	39
4.4. Elli altı günlük beton numunelerinin sıcaklık-yarmada çekme dayanımı ilişkisi.....	39
4.5. Yirmi sekiz günlük beton numunelerinin sıcaklık-basınç dayanımı ilişkisi.....	40
4.6. Elli altı günlük beton numunelerinin sıcaklık-basınç dayanımı ilişkisi.....	41
4.7. Yirmi sekiz günlük beton numunelerinin sıcaklık-birim hacim ağırlık ilişkisi.....	42
4.8. Elli altı günlük beton numunelerinin sıcaklık-birim hacim ağırlık ilişkisi.....	43

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
4.9. Yirmi sekiz günlük beton numunelerinin sıcaklık-yüzey sertliği ilişkisi	43
4.10. Elli altı günlük beton numunelerinin sıcaklık-yüzey sertliği ilişkisi.....	44
4.11. Yirmi sekiz günlük beton numunelerinin sıcaklık-hacimce su emme ilişkisi	45
4.12. Elli altı günlük beton numunelerinin sıcaklık-hacimce su emme ilişkisi.....	45
5.1. Yirmi sekiz günlük havada soğutulmuş numunelerin ana etki büyüklükleri grafiği	49
5.2. Yirmi sekiz günlük havada soğutulmuş numunelerin etkileşimler grafiği	49
5.3. Yirmi sekiz günlük havada soğutulmuş numunelerin basınç dayanımı ve sıcaklık ilişkisi için tek yönlü anova analizi grafiği	50
5.4. Yirmi sekiz günlük havada soğutulmuş numunelerin basınç dayanımı ve çimento tipi ilişkisi için tek yönlü anova analizi grafiği.....	51
5.5. Yirmi sekiz günlük havada soğutulmuş numunelerin basınç dayanımı ve sıcaklık arasındaki aralık grafiği.....	51
5.6. Yirmi sekiz günlük havada soğutulmuş numunelerin basınç dayanımı ve çimento tipi arasındaki aralık grafiği	52
5.7. Yirmi sekiz günlük suda soğutulmuş numunelerin ana etki büyüklükleri grafiği	53
5.8. Yirmi sekiz günlük suda soğutulmuş numunelerin etkileşimler grafiği	54
5.9. Yirmi sekiz günlük suda soğutulmuş numunelerin basınç dayanımı ve sıcaklık ilişkisi için tek yönlü anova analizi grafiği	54
5.10. Yirmi sekiz günlük suda soğutulmuş numunelerin basınç dayanımı ve çimento tipi ilişkisi için tek yönlü anova analizi grafiği.....	55
5.11. Yirmi sekiz günlük suda soğutulmuş numunelerin basınç dayanımı ve sıcaklık arasındaki aralık grafiği	56
5.12. Yirmi sekiz günlük suda soğutulmuş numunelerin basınç dayanımı ve çimento tipi arasındaki aralık grafiği	56

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
5.13. Elli altı günlük havada soğutulmuş numunelerin ana etki büyüklükleri grafiği.....	58
5.14. Elli altı günlük havada soğutulmuş numunelerin etkileşimler grafiği	58
5.15. Elli altı günlük havada soğutulmuş numunelerin basınç dayanımı ve sıcaklık ilişkisi için tek yönlü anova analizi grafiği.....	59
5.16. Elli altı günlük havada soğutulmuş numunelerin basınç dayanımı ve çimento tipi ilişkisi için tek yönlü anova analizi grafiği.....	60
5.17. Elli altı günlük havada soğutulmuş numunelerin basınç dayanımı ve sıcaklık arasındaki aralık grafiği	60
5.18. Elli altı günlük havada soğutulmuş numunelerin basınç dayanımı ve çimento tipi arasındaki aralık grafiği	61
5.19. Elli altı günlük suda soğutulmuş numunelerin ana etki büyüklükleri grafiği.....	62
5.20. Elli altı günlük suda soğutulmuş numunelerin etkileşimler grafiği.....	63
5.21. Elli altı günlük suda soğutulmuş numunelerin basınç dayanımı ve sıcaklık ilişkisi için tek yönlü anova analizi grafiği	64
5.22. Elli altı günlük suda soğutulmuş numunelerin basınç dayanımı ve çimento tipi ilişkisi için tek yönlü anova analizi grafiği.....	64
5.23. Elli altı günlük suda soğutulmuş numunelerin basınç dayanımı ve sıcaklık arasındaki aralık grafiği	65
5.24. Elli altı günlük suda soğutulmuş numunelerin basınç dayanımı ve çimento tipi arasındaki aralık grafiği	65
5.25. Yirmi sekiz ve elli altı gün kür uygulanan ve havada soğutulan numuneler için sıcaklık-basınç dayanımı ilişkisi	66
5.26. Yirmi sekiz ve elli altı gün kür uygulanan ve suda soğutulan numuneler için sıcaklık-basınç dayanımı ilişkisi.....	67
5.27. Yirmi sekiz ve elli altı gün kür uygulanan ve havada soğutulan numuneler için sıcaklık-basınç dayanımı ilişkisi	68
5.28. Yirmi sekiz ve elli altı gün kür uygulanan ve suda soğutulan numuneler için sıcaklık-basınç dayanımı ilişkisi.....	69
Ek 2.1. Numune üretiminde kullanılan kalıplar	87
Ek 2.2. Numune üretiminde kullanılan çimento tipleri	87

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
Ek 2.3. Beton mikseri	88
Ek 2.4. Vibratör masası.....	88
Ek 2.5. Sabit çökme miktarı 12 cm.....	89
Ek 2.6. Kür havuzunda bekleyen beton numuneleri.....	89
Ek 2.7. Yüksek sıcaklık öncesi numunelerin etüvde kurutulması.....	90
Ek 2.8. Numunelerin fırına yerleştirilmesi.....	90
Ek 2.9. Fırın koruyucu tel kafes	91
Ek 2.10. Farklı sıcaklık sonrasında havada soğumaya bırakılan beton numuneleri	91
Ek 2.11. Farklı sıcaklık sonrasında suda soğumaya bırakılan beton numuneleri	92
Ek 2.12. Ultrases geçiş süresi deneyi	92
Ek 2.13. Yüzey sertliğinin belirlenmesi.....	93
Ek 2.14. Basınç deneyi	93
Ek 2.15. Yarma deneyi	94
Ek 2.16. Hacimce su emme deneyi	94

ÇİZELGELER DİZİNİ

<u>Cizelge</u>	<u>Sayfa</u>
3.1. Numune gruplarının kodlanması	27
3.2. Kullanılan çimentoların kimyasal özellikleri	28
3.3. Kullanılan çimentoların mekanik özellikleri	29
3.4. Agregaların fiziksel özellikleri	30
3.5. Kullanılan şebeke suyunun kimyasal analizi	31
3.6. 1 m ³ beton için gerekli malzeme miktarları	32
5.1. Yirmi sekiz günlük havada soğutulmuş numunelerin anova tablosu.....	48
5.2. Yirmi sekiz günlük suda soğutulmuş numunelerin anova tablosu.....	53
5.3. Elli altı günlük havada soğutulmuş numunelerin anova tablosu.....	57
5.4. Elli altı günlük suda soğutulmuş numunelerin anova tablosu.....	62
Ek 1.1. Beton numunelerinin 28 günlük birim hacim ağırlıkları, gr/cm ³	82
Ek 1.2. Beton numunelerinin 56 günlük birim hacim ağırlıkları, gr/cm ³	82
Ek 1.3. Beton numunelerinin 28 günlük ultrases geçiş hızları, km/sn.....	82
Ek 1.4. Beton numunelerinin 56 günlük ultrases geçiş hızları, km/sn.....	83
Ek 1.5. Beton numunelerinin 28 günlük yüzey sertliği dayanımları, MPa.....	83
Ek 1.6. Beton numunelerinin 56 günlük yüzey sertliği dayanımları, MPa.....	83
Ek 1.7. Beton numunelerinin 28 günlük basınç dayanımları, MPa.....	84
Ek 1.8. Beton numunelerinin 56 günlük basınç dayanımları, MPa	84
Ek 1.9. Beton numunelerinin 28 günlük yarmada çekme dayanımları, MPa	84
Ek 1.10. Beton numunelerinin 56 günlük yarmada çekme dayanımları, MPa.....	85
Ek 1.11. Beton numunelerinin 28 günlük hacimce su emme değerleri, %.....	85
Ek 1.12. Beton numunelerinin 56 günlük hacimce su emme değerleri, %.....	85

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklama</u>
Δ	Birim ağırlık
λ	Isıl iletkenlik katsayısı
α	Genleşme katsayısı
c	Özgül ısı
ρ	Yoğunluk
μ_s	Ses geçiş süresi
σ_{φ}	Çekme dayanımı
$\sigma_{\text{basınç}}$	Basınç dayanımı
a	Isıl yayılma
A	Yüzey alanı
E	Elastisite modülü
F	F sınaması
P	Isı şoku parametresi
P_k	Kırılma yükü
t	Yangın süresi
T	Ortalama yangın gazı sıcaklığı
T_0	Başlangıç sıcaklığı
W	Mukavemet momenti
V	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 (Kireç)
CaCO ₃	Kalsiyum karbonat
Ca(OH) ₂	Kalsiyum hidroksit
CEM I	Portland çimentosu
CEM III	Portland yüksek fırın cürufu çimento
CSH	Kalsiyum silikat hidrate
EN	Avrupa Standardı
H	Havada soğutulmuş numuneler
H ₂ O	Su
ISO	International Organization for Standardization
MgO	Magnezyum oksit
S	Suda soğutulmuş numuneler
TS	Türk Standardı

BÖLÜM 1

GİRİŞ

Beton; agrega, çimento, su ve gerektiğinde bazı mineral ve kimyasal katkı maddelerinin birlikte karılmasıyla elde edilen, başlangıçta akışkan olduğu için istenilen kalıbın şeklini kolayca alan, sertleştikten sonra ise yüksek bir dayanıklılık ile belirli bir taşıma gücü için gerekli dayanımı sağlayabilen yapay bir yapı malzemesidir (Erdoğan, 2003; Neville, 1978). Beton yeni karıldığında taze beton adını alırken, katılaşp dayanım kazanınca sertleşmiş beton adını alır. Taze betonda işlenebilirlik, sertleşmiş betonda ise dayanım ve dayanıklılık özellikleri betonda aranan en önemli özelliklerdir. Ayrıca büyük miktarlarda kullanıldığı için betonun en ekonomik şekilde üretilmesi beton teknolojisi için çok önemlidir. Kaliteli bir beton, kaliteli malzemeler ve deneyimli elemanlarla belirli kurallara ve standartlara uyularak yapılabilir (Topçu, 2006a).

Betonda dayanıklılık problemine neden olan başlıca fiziksel etkilere biri yüksek sıcaklıktır. Yüksek sıcaklık yapılar da kalıcı hasarlar oluşturarak, yapının servis dışı kalmasına, can ve mal kaybına neden olabilmektedir (Aydın vd., 2003). Yapılarda yangın sırasında oldukça yüksek sıcaklık derecelerine ulaşıldığı bir çok yangın olayında saptanmıştır (Baradan vd., 2002). Bu yüksek sıcaklık, otoyollarda ve tünellerde meydana gelebilecek otomobil kazaları sonucunda ortaya çıkan yangınlarda veya yeterli güvenlik önlemlerinin alınmadığı özel tesislerde (kimyasal madde üretim tesisleri, şeker fabrikaları, cephanelikler, yakıt siloları, kağıt, kumaş fabrika ve depoları, benzin istasyonları) çıkan yangınlarda ortaya çıkmaktadır. Danimarka'da bulunan Great Belt Tüneli'nde ve Channel Tünel'de, 1994 ve 1996 yıllarında çıkan yangınlarda, yüksek sıcaklık etkisi ile betonda meydana gelen patlama ve parça atmalar nedeni ile beton kesitindeki azalmalar ağır hasarlara; New York'taki Dünya Ticaret Merkezi binalarının çökmesi ile çok sayıda can ve mal kaybına neden olmuştur (Khoury, 2003; Schrefler et al., 2002; Baradan vd., 2002).

Yüksek sıcaklıklara karşı dirençli ve yanmaz bir malzeme olan beton, yangın ya da oluşabilecek yüksek sıcaklıklarda, yapısında fiziksel ve kimyasal değişiklikler gösterir. Yüksek sıcaklık etkisi altında kalan betonların jel ve kapiler boşluklarındaki serbest suların kaybı ile oluşan büzülme ve beton içindeki buhar basıncının, betonun dış yüzeyinde ayrılmaya, kabuk halinde dökülmeye yol açtığı bilinmektedir. Artan yüksek sıcaklıkta betonun kimyasal yapısında meydana gelen değişikliklerle, dayanım ve dayanıklılığında azalmalara neden olmaktadır.

Yapılan çalışmalar sonucunda betonun birçok yapı malzemesine göre yüksek sıcaklık ve yangın etkisine karşı daha dayanıklı bir malzeme olduğu ortaya çıkmıştır. Ancak bu dayanıklılık sınırlı süreler ve belirli sıcaklık dereceleri için geçerlidir (Baradan vd., 2002). Betonların yüksek sıcaklık dayanıklılığını etkileyen faktörler, malzemeye ilgili faktörler ve çevresel faktörler olarak iki gruba ayrılır. Malzemeye ilgili faktörler agrega özellikleri, agrega çimento hamuru arasındaki bağ, bileşenlerin ısı uyumu ve çimento hamurunun özellikleri olarak sayılır. Çevresel faktörler; ısıtma derecesi, betonun en yüksek sıcaklıkta karşı karşıya kaldığı süre, soğuma derecesi, soğutma şekli, yükleme koşulları ve nem durumudur. Beton yapıların yüksek sıcaklıklarla karşı karşıya kalma sürecinde ve bu sürecin ardından göstereceği tepkileri öngörebilmek için, betonların dayanım ve şekil değiştirme özelliklerinin iyice bilinmesi gerekir (Peng et al., 2006a).

Bu çalışmada, farklı çimento tipleri kullanılarak üretilen beton numunelerin, yüksek sıcaklık sonrası fiziksel ve mekanik özelliklerinde meydana gelen değişimler incelenmiştir. Beton numunelerinde kullanılan agrega 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 şeklini göz önünde bulundurarak ortaya koymak ve kendi aralarında bir değerlendirme sunmaktır.

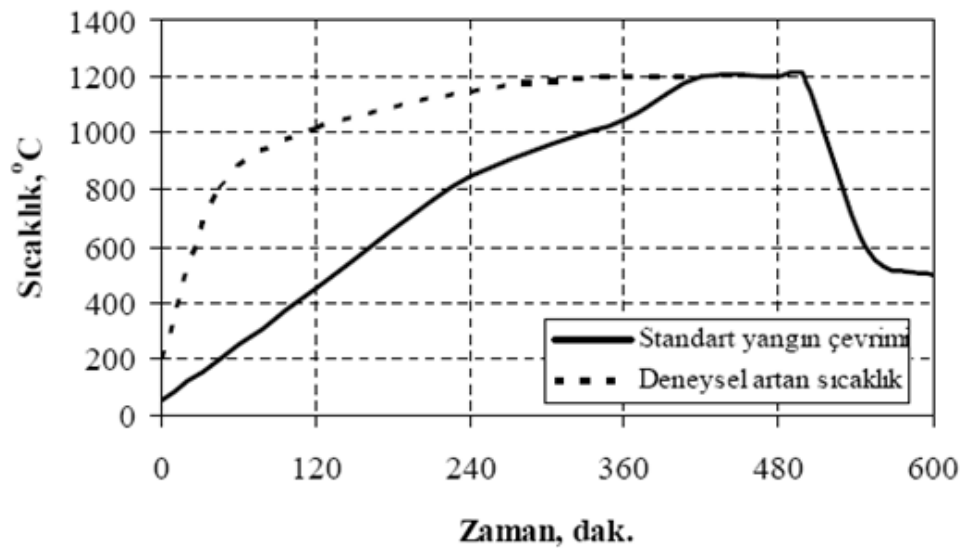
BÖLÜM 2

KONU İLE İLGİLİ GENEL BİLGİLER

2.1. Yangın ve Yüksek Sıcaklık Etkisi

Birçok yapı ve inşaatlarda potansiyel risklerden biri de 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.

Yangın koşullarının belirtildiği değişik ülke standartları vardır. Bunlardan birisi BS 476: Kısım 20: 1987 betonda yangın etkisini araştıran çalışmalar için deney koşulları standardıdır (Peng et al., 2006a). Standartta yer alan sıcaklık artışı ve zaman ilişkisi Şekil 2.1’de gösterilmiştir. Yangın, betonda artan yüksek sıcaklık deneylerindeki belli bir noktaya kadar benzerlik göstermektedir.



Şekil 2.1. Yangın ve deneysel sıcaklık artışı-zaman ilişkisi (Peng et al., 2006a).

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

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

Yüksek sıcaklığın betona etkisi, betonun maruz kaldığı sıcaklık ve sürenin yanı sıra çimento hamuru fazı ve agrega türüne bağlı olarak da 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, 2007a).

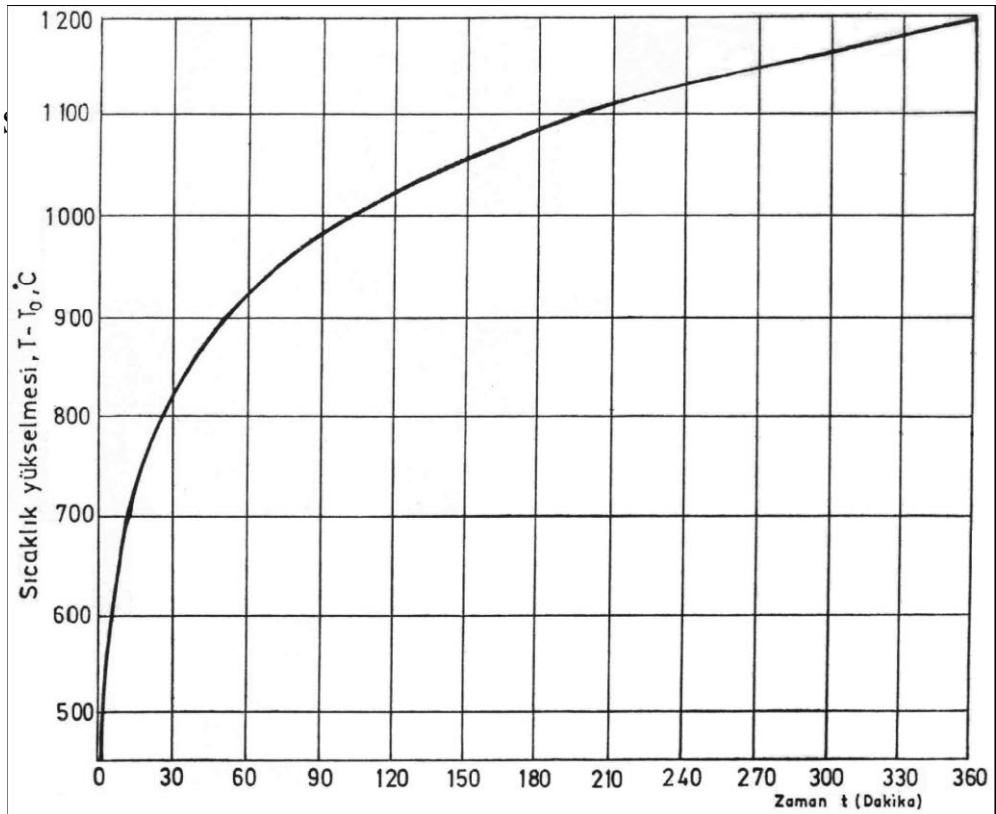
2.1.1. Yangın

Yüksek sıcaklığa neden olan yangın 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 2.2’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), T_0 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).



Şekil 2.2. Standart sıcaklık-zaman eğrisi (TS 1263, 1983).

2.1.2. Yüksek sıcaklığın betona etkisi

Betonun diğer yapı malzemelerine göre en önemli bazı avantajları sıralandığında istenilen şekil ve boyutlarda üretilebilmesi, yüksek basınç dayanımına sahip olması, çelik donatı ile iyi aderansa sahip olması, diğer taşıyıcı malzemelere kıyasla yüksek sıcaklık ve yangın etkisine daha dayanıklı bir malzeme olması gibi özellikleri söylenebilir (Erdoğan, 2003). Beton, yanmayan madde oluşu, belirli bir süre için önemli bir zarar görmemesi ve zehirli duman çıkarmaması ile yangın direnci yüksek bir malzemedir (Neville, 2000).

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).

Yüksek sıcaklık etkisiyle oluşan parça atmalar sonucu, donatılar yüksek sıcaklığa maruz kalırlar. Bu da yapı elemanının yük taşıma kapasitesini ve bütünlüğünü kaybetmesine neden olur. 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 (Riley, 1991; Akman, 2000).

Yüksek sıcaklık altındaki betonun dayanımını etkileyen faktörler çevresel ve malzeme faktörleri olmak üzere iki ana grupta toplanır. Çevresel faktörler ulaşılan en yüksek sıcaklık derecesi, bu sıcaklığa ulaşma hızı, bu sıcaklıkta kalma süresi, soğutma hızı, yükleme koşulları ve soğutma şekilleridir (Sarshar and Khoury, 1993). Malzeme faktörleri ise kullanılan agrega tipi ve özellikleri, kullanılan çimento tipi ve özellikleri, agrega-çimento hamuru aderansı ve kullanılan mineral katkıların özellikleridir. Beton yapıların yüksek sıcaklık etkisi altında kalma süresince ve sonrasında dayanımını tahmin edebilmek için yüksek sıcaklık etkisinde kalmış betonların dayanım ve şekil değiştirme özelliklerinin iyi anlaşılması gerekir.

Yüksek sıcaklıklar altındaki betonun dayanımında (hem basınç hem de çekme de) ve sertliğinde (elastisite modülü) kayıplar oluşur. Bu kayıplarda, serbest suyun yer değiştirmesi ve buharlaşması, bağlanmış ve emilmiş suyun kaybedilmesi, 450 °C’de kalsiyum hidroksitin ayrışması, 575 °C’de kumların çoğunluğunu oluşturan kuvartzın α -kuvartz’dan β -kuvartz’a geçişi, 400-600 °C’de CSH yapıların bozulması gibi etkenler rol oynar (Felicetti and Gambarova, 1998).

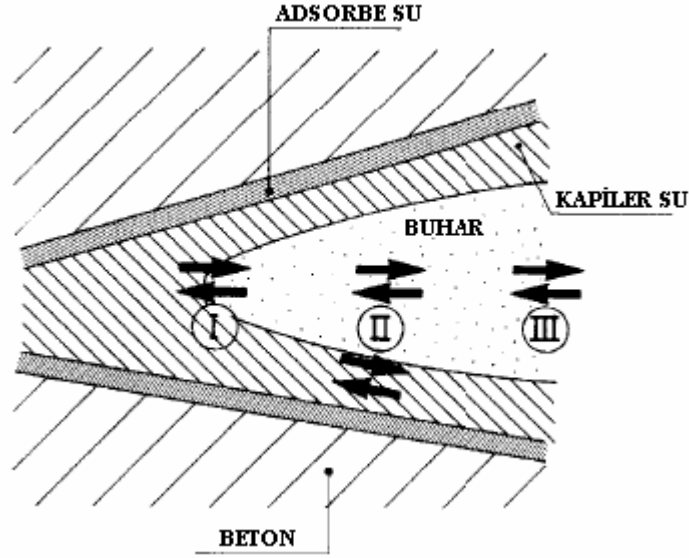
Betonun, farklı termal karakteristiklere sahip bileşenleri, nem ve poroziteden dolayı yüksek sıcaklık karşısında karmaşık bir davranış sergiler (Li vd., 2004). Bu nedenle betonun yüksek sıcaklık etkisindeki davranışı, çimento hamuru ve agregası için ayrı ayrı ele alınmıştır.

2.1.2.1. Yüksek sıcaklığın çimento hamuruna etkisi

Çimento hamuru, betonun ilk ısıtma esnasında çok istikrarsız olan bir bileşenidir. Çünkü önemli fiziksel ve kimyasal dönüşümler geçirir. Yapısındaki serbest su yaklaşık 100-200 °C’ye varan 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).

Beton bünyesinde su üç farklı şekilde bulunmaktadır. Bunlar, jel yapılı çimento hamurundaki kalsiyum silikat hidratenin (CSH) katı ögelerini 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 2.3'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., 2003a).



Şekil 2.3. Boşluk suyu transferi (Andrade vd., 2003b).

Bilindiği gibi betonun basınç dayanımı ile porozitesi arasında ilişki bulunmaktadır. Betonun porozitesi arttıkça basınç dayanımı azalır (Vodak vd., 2004).

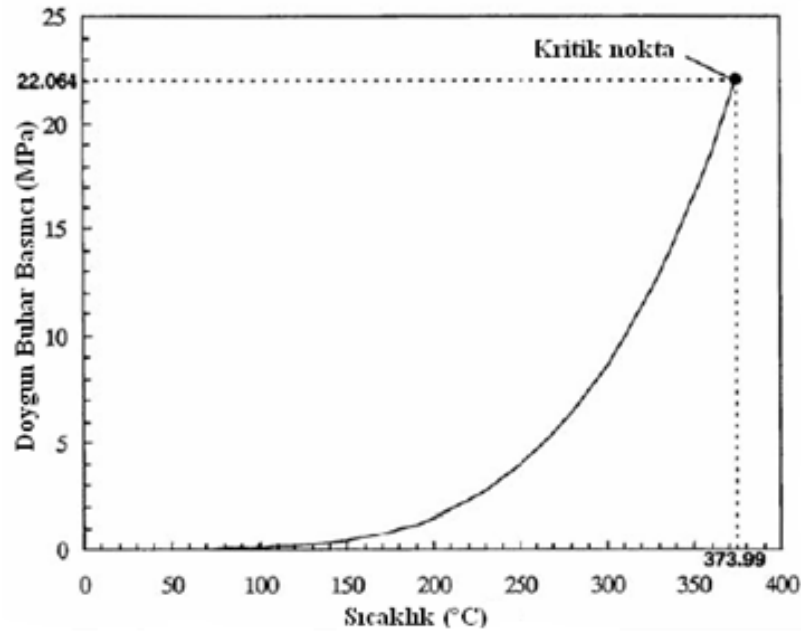
Beton bünyesinde su üç farklı şekilde bulunmaktadır. Bunlar, jel yapılı çimento hamurundaki kalsiyum silikat hidratenin (CSH) katı ögelerini birbirine bağlayan adsorpsiyon suyu, hidratlardaki kimyasal bağlı su ve kılcal boşluklarda serbest sudur. Çimento türüne ve üretim sırasındaki su/çimento oranına 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).

Betonun katı fazları çimento hamuru ve agregalar, yüksek sıcaklığa maruz kaldığında gözenek yapısını etkiler. Katı fazlarda meydana gelen fiziksel ve kimyasal değişiklikler toplam porozitede ve gözenek boyutunun dağılımında değişikliklere neden olur.

Genellikle, sertleşmiş çimento hamuru 20-200 °C civarında genişler. 200 °C'nin üstünde farklı yoğunlukların etkisiyle büzülür, bu sırada da agregalar genişler. Bütün bu değişiklikler gözenek boyutunu büyütür (Alonso vd., 2003a). 500 °C'ye kadar kapiler ve jel suyunun ayrılması toplam boşluk hacminde önemli bir artışa neden olur (Haddad vd., 2004). 600 °C'ye kadar toplam boşluk hacmi artar. Bu artış beklenenden fazladır ve ağırlık kaybıyla benzerlik gösterir. Bunun nedeni büzülen ara bölme duvarlar ve oluşan mikro çatlaklar olabilir. Yüksek sıcaklıklarda küçük boşlukların oranı azalır, bu da 900 °C'nin üzerindeki sıcaklıklarda sinterleşmeye neden olabilir (Alonso vd., 2003a).

Yüksek termal gerilmelere maruz kalmış betonlarda çatlak oluşumunun birçok nedeni vardır. Çimento hamurundaki başlangıç mikroçatlakların 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 tanelerin etrafındaki mikroçatlaklar da 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).

Şekil 2.4'te 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 2.4. 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 hamurundaki bir diğer önemli bileşen kalsiyum hidroksittir (Ca(OH)_2). Lea and Stradling (1922) kalsiyum hidroksitin (Ca(OH)_2) kirece (CaO) dönüştüğünü ve soğutulduktan sonra kirecin hidratasyonda genişlemesiyle ısıtma süresinde suyun betonda ciddi zararlara yol açabileceğini belirtmişlerdir (Peng et al., 2006a). Ayrıca soğutma süresince çatlak gelişimine ve agrega ile çimento hamuru arasında ayrışma olabileceğine dikkat çekmişler ve soğutma hızının etkisini ortaya koymuşlardır.

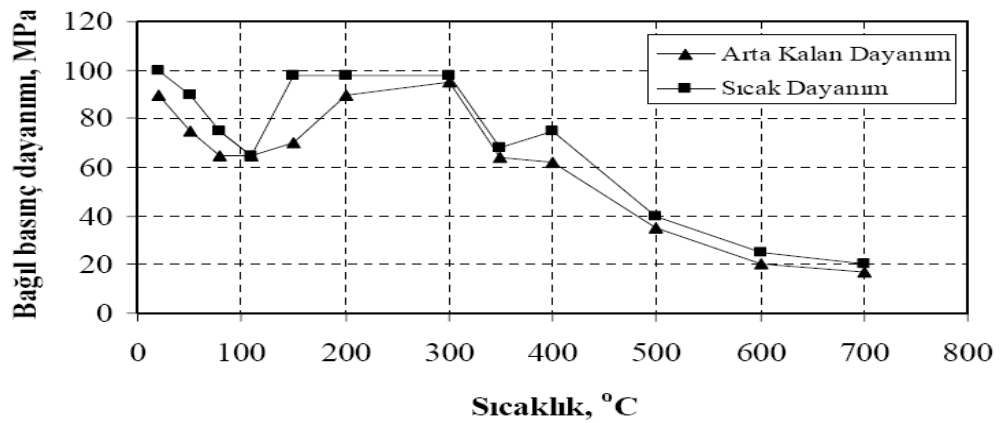
Lea and Stradling'i takiben yüksek sıcaklık uygulamalarında betonun en zayıf noktasının kalsiyum hidroksit problemi olduğu anlaşılmıştır (Peng et al., 2006b).

Çimento hamuru % 70-80 tabakalı CSH jeli, % 20 Ca(OH)_2 ve diğer kimyasal bileşenlerden oluşur (Zhang vd., 2002). 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 artısına 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 'nin CaO ve H_2O 'ya dönüşümü 500 °C civarında olurken, CSH'nin dehidratasyonu 110 °C'den itibaren başlamaktadır (Scherefle, 2003). Her iki olay da çimento pastasındaki katı madde miktarının azalmasına neden olur.

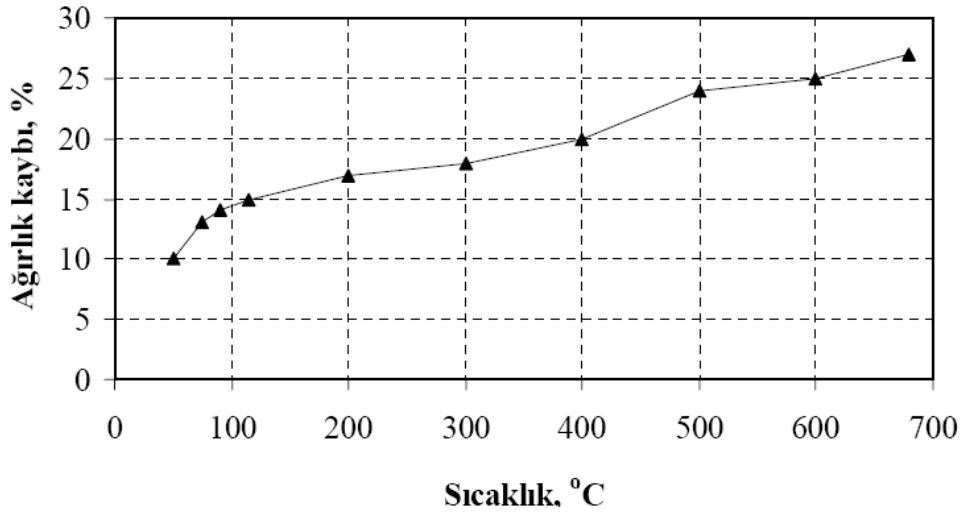
Yüksek sıcaklık etkisi altında kalmış sertleşmiş çimento hamurunun mekanik özelliklerine ilişkin bir araştırma da Dias et al. (1990) tarafından yapılmıştır.

Şekil 2.5'te görüldüğü gibi yaklaşık 120 °C'de çimento hamurunun sıcak ve bağıl dayanımları en küçük değerlerdedir. Dayanımın, 50-120 °C aralığında en küçük düzeyde olmasının nedeni olarak, bünyesindeki suyun buharlaşma eğilimi ile hamurun şişerek aderans kaybına yol açtığı düşünülmektedir. Bundan sonra çimento hamurunun 300 °C'ye kadar olan dayanımının iyileştiği görülmektedir.



Şekil 2.5. Çimento hamurunda dayanım ve sıcaklık ilişkisi (Dias et al., 1990).

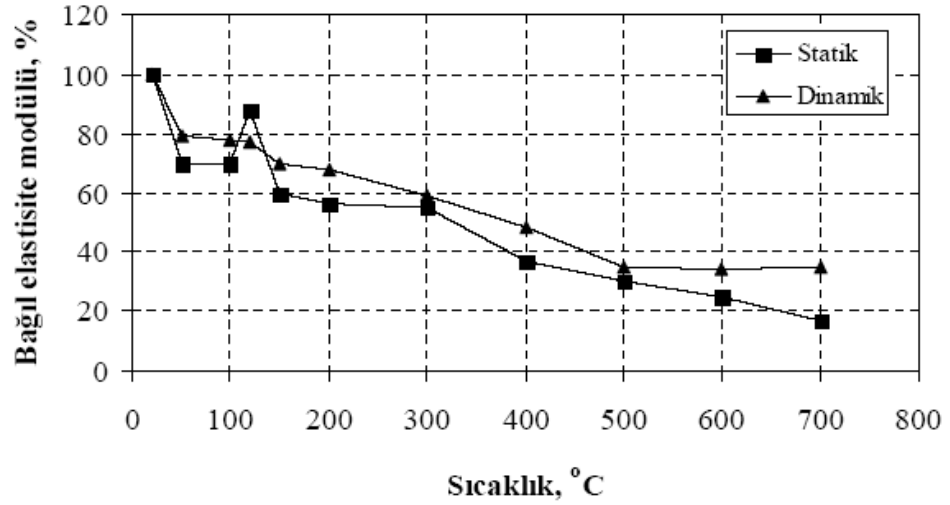
Yapılan çalışmalarda, artan sıcaklıkla beraber sertleşmiş çimento hamurunda ağırlık kaybının arttığı (Şekil 2.6), statik ve dinamik elastisite modüllerinin kademeli olarak düştüğü görülmektedir (Şekil 2.7).



Şekil 2.6. Çimento hamurunda ağırlık kaybı ve sıcaklık ilişkisi
(Dias et al., 1990).

Morsy et al. (1998) yaptıkları bir çalışmada su yalıtımsız sertleşmiş çimento hamurunun 300 °C'ye yükseltilmiş sıcaklıktaki davranışı konusunda benzer sonuçlar elde etmişlerdir. Su yalıtımsız sertleşmiş çimento hamurunun basınç dayanımında, sıcaklığın 200 °C'ye ulaşması ile bir düşüş olduğunu, 300 °C'ye ulaştığında ise; dayanımın arttığını gözlemlemişlerdir. Basınç dayanımında 22-200 °C aralığında gözlenen ilk düşüş, hamur içindeki su katmanlarının şişmesine ve aderans kaybına yol açmasına bağlanmıştır.

Sıcaklıkla beraber artan basınç dayanımı ise suyu alınmış çimento tanelerinin içsel otoklav denen faktörün eklenmesi ile ortaya çıkan buhar etkisi ile hidrasyonundan kaynaklanmaktadır (Morsy et al., 1998; Cülfik, 2001).



Şekil 2.7. Çimento hamurunda elastisite modülü-sıcaklık ilişkisi (Cülfik, 2001).

2.1.2.2. Yüksek sıcaklığın agregaya etkisi

Beton agregaları minerallerden oluşmuş taneli malzemelerdir. Kum, çakıl ve kırmataş en çok kullanılan agregalardır. TS'ye göre elendiğinde 4.0 mm kare delikli elekten geçen agregaya ince ve bu elek üzerinde kalan agregaya iri agrega denir (Topçu, 2006a).

Beton hacminin % 60-80'lik kısmını teşkil eden agreganın, ısıtma sürecinde özelliklerindeki değişim betonun performansını büyük ölçüde etkilemektedir (Alonso vd., 2003). Agregaların yüksek sıcaklıkta betona etkisi mineral yapılarına bağlıdır ve yüksek sıcaklığa dayanıklı oldukları söylenebilir.

Yüksek sıcaklıklarda, yaygın olarak kullanılan agregaların pek çoğunda fiziksel ve/veya kimyasal değişimler meydana gelir ve parçalanırlar. Örneğin; nehir çakılı 350 °C civarında içeriğindeki bileşen minerallerin diferansiyel ısıl genişmesi sonucu parçalanır. Agregalarda meydana gelen bu parçalanma, betonda önemli genişleme ve parçalanmaya neden olur (Cülfik, 2001).

Kuvartz içerikli agreganın içindeki düşük kuvartz 500 °C civarında, yaklaşık % 1 hacim artışı ile beraber dönüşüm fazına girer. Bu etki büyük miktarda kuvartz içeren kum, granit ve bazı şistler gibi agregalarda büyük genleşmelere neden olur. Yaklaşık 550 °C’de çimento hamuru bozulmaya başlar. Hacimdeki artış agreganın genleşmesine, patlamasına ve kabarıp dökülmesine yol açar (Topçu vd., 2006b; Topçu ve Demir, 2005). Agreganın genleşmeleri agreganın parçacıklarını çevreleyen hamur içinde çatlakları tetikler. Bu yüzden yüksek sıcaklık etkisinde kalacak beton için agreganın seçimi yaparken göz önünde bulundurulması gereken ilk kriter onun hem fiziksel hem de kimyasal yönden ısı istikrarlılığıdır (Lin et al., 1996; Culfık, 2001).

Kalker ve dolomitten oluşan agregalar 700 °C’ye kadar kararlıdır (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).

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 kuvartz, 575 °C’de yaklaşık % 5.7’lik bir hacim artışı ve endotermik bir reaksiyonla α -kuvartztan β -kuvartza dönüşür (Alonso vd., 2003b).

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).

2.2. Yüksek Sıcaklığın Betonun Isıl Özelliklerine Etkisi

Yüksek sıcaklık betonun ısı iletkenlik, özgül ısı, ısı ıl genleşme, ısı ıl yayılma ve ısı şoku özelliklerinde farklılıklara yol açar. Isıl değişimler esnasında betonun mekanik özelliklerinde de bazı önemli değişiklikler meydana gelir.

2.2.1. Isıl iletkenlik

Betonun ısı ıl iletkenlik katsayısı, büyük oranda bileşenlerinin, yani çimento hamuru ve agreganın geçirgenliğine bağlı olmaktadır. Genel olarak bazalt ve trakit düşük bir geçirgenliğe, dolomit ve kireçtaşı ise orta düzeyde bir geçirgenliğe, kuvars ise en yüksek iletkenliğe sahiptir (Neville., 1995).

Her durumda, betonun ısı ıl iletkenliği, sıcaklığın yükselmesine bağlı olarak düşüş göstermektedir. 100 °C'nin altında ise; ısı ıl iletkenlik rutubet muhtevassından etkilenmektedir.

Yeterince yüksek sıcaklıkla karşı karşıya kalan bir beton yüzeyi, etkili biçimde, daha düşük ısı ıl iletkenliğe sahip bir yalıtım kabuğu üretmekte; bu kabuk yüksek ısıya dayanır bir malzeme işlevi görerek sıcaklık girişini azaltmaktadır.

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 veYüzer, 1994).

2.2.2. 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). Ancak betondaki rutubet muhtevasının artışına bağlı olarak önemli ölçüde yükseliş ortaya koymakta; sıcaklığın artışıyla yükselmekte; ancak betonda bulunan buharlaşabilir suyun etkisiyle 100 °C civarında düşüş sergilemektedir.

2.2.3. Isıl genleşme

Betonun ısı genleşme katsayısının sıcaklıkla bağlantısı 200 °C'ye kadar olan sıcaklıklarda düşük olmakta, ancak 600 °C civarına çıkıldığında kullanılan agreganın içerdiği kuvarzta bağlı olarak hızla yükselmektedir. Döküldüğü durumda nem kürü uygulanan betonun oda sıcaklığıyla 200 °C arasındaki ısı genleşme katsayısı, havada kür uygulamasında elde edilen katsayıların yaklaşık % 75-85'i kadar oluşmaktadır. Bunun nedeni, betonda kuruma büzülmesinin gözle görülebilir genleşmeyi azaltmasıdır (Yamazaki et al, 1995; Cülfik, 2001).

Betonun genleşme katsayısı (α , 1/°C), üretimde kullanılan agregaların genleşmesine bağlıdır. Çimento hamurunun α 'sı ($11 \cdot 10^{-6}$ - $20 \cdot 10^{-6}$ 1/°C) ile 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).

2.2.4. Isıl yayılma

Basitleştirilmiş hesaplamalar için ısı yayılma hızı genelde $a = \lambda / c \cdot \rho$ olarak kabul edilir; λ ısı iletkenlik (W/m°C), ρ yoğunluk (kg/m³) ve c özgül ısı (KJ/kg°C) indisidir.

Bu katsayı malzemenin sıcaklık özelliğine ilişkin geniş kapsamlı bir bilgi vermektedir. Bu nedenle sıcaklığa bağlı olarak özgül ısıнын nasıl değişim gösterdiğini öğrenmekte oldukça gereklidir. Isıl yayılma sıcaklığa bağlı olarak değişmektedir. Ayrıca agrega türünün de bu katsayı üzerinde etkili olduğu muhakkaktır. Betonun ısı yayılma değerini önemli ölçüde etkiler. Ayrıca betonun ısı yayılma değerinde 100 °C civarında serbest suyun buharlaşmasına bağlı olarak önemli bir azalma görülür.

2.2.5. Isı şoku parametresi

Gevrek malzemelerde sıcaklık değişimleri hızlı ve sıcaklık gradyanı yüksek ise büyük ısıl gerilmeler ve dolayısıyla çatlamlar oluşabilir. Isı şoku denilen bu olay ısı iletimine ve ısıl genleşmeye büyük ölçüde bağlıdır. Isı iletimi yüksek ve ısıl genleşmesi küçük malzemelerde, ısı enerji hızla çevreye yayılır bu nedenle sıcaklık gradyanı düşük, boyut değişimleri az, dolayısıyla gerilmeler küçük olur. Malzemelerin ısı şokuna dayanıklılığını belirtmek için ısı şoku parametresi 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).

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

2.3. Yüksek Sıcaklığın Betonun Fiziksel Özelliklerine Etkisi

Yüksek sıcaklık kütle, yoğunluk, gözeneklilik ve betonun rengi üzerinde bazı değişimlere neden olmaktadır. Fiziksel değişimler sırasında, betonun mekanik özelliklerinde de bazı önemli değişimler ortaya çıkmaktadır.

2.3.1. Kütle kaybı

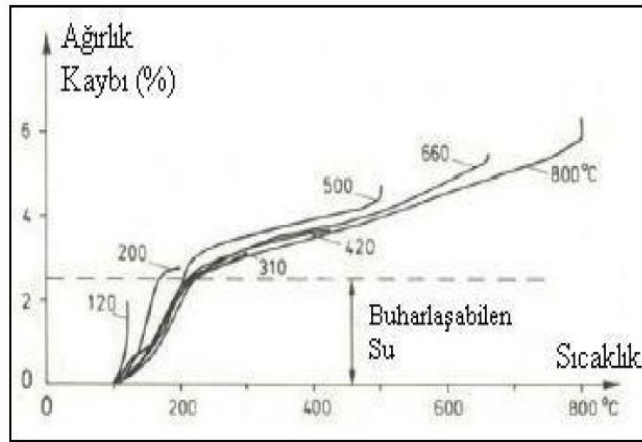
Yerleştirme sırasında beton ıslak, boşluklu bir malzemedir. Normal ve yüksek dayanımlı betonlar 70 °C’de ilk kütlelerinin % 99’a kadarını korumaktadırlar. Betonda bulunan serbest su 70 ile 120 °C arasında buharlaşmaktadır. Normal ve yüksek dayanımlı betonlar 120 °C’de aynı miktarda su kaybetmektedirler. 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).

2.3.2. Birim hacim ağırlığı

Betonun yoğunluğu sıcaklık yükselmesi sırasında önemsiz bir değişim sergilemektedir. Bu değişim özellikle serbest suyun buharlaşmasına bağlı olmakla birlikte, ısı genleşmenin yol açtığı hacim artışıyla da ilişkilidir. Söz konusu düşüş çoğunlukla önemsizmeye değer görülmemektedir. 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., 2003b). 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).

Anderberg-Thelanderson 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 2.8’de verilmiştir. Schneider ve Bazant yaptıkları çalışmada 1000 °C’ye kadar yoğunluğun % 11-13 arasında azaldığını belirtmişlerdir (Anderberg, 2003).



Şekil 2.8. Ağırlık kaybının sıcaklıkla değişimi (Anderberg, 2003).

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).

2.3.3. Boşluk oranı

Betonda gözenek ölçümlerinin verdiği sonuçlara göre, 120 °C'nin altındaki sıcaklıklarda beton boşluk oranının çok az değiştiği görülmüştür. Yüksek performansa sahip betonun kalan toplam gözenekliliği 25, 70 ve 120 °C sıcaklıklarda neredeyse değişmemektedir. 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).

2.3.4. Renk

Silikalı ya da kireçtaşı agregadan üretilen betonlar, sıcaklığa bağlı olarak renk değişimi göstermektedir. Bu nedenle de bir yanma sırasında oluşan maksimum sıcaklığa bağlı olarak renk, değişik tonlarda olabilmektedir. Böylece renge bağlı olarak betonda kalan dayanım yaklaşık olarak saptanabilmektedir. Genellikle rengi pembenin ötesine geçen betondan kuşku duyulmalıdır. Gri rengi aşan beton ise, büyük olasılıkla, ufalanabilir ve gözenekli bir yapı kazanmaktadır (Neville, 1992).

Yüksek sıcaklığın etkisinde kalan betonun renginde önemli değişiklikler meydana geldiği, bu değişikliğin özellikle silisli nehir agregaları ile üretilen betonlarda belirgin olarak görüldüğü, örneğin renk, pembe veya kırmızı ise sıcaklığın 300-600 °C'ye, gri ise 600-900 °C'ye yükselmiş olduğu önceki çalışmalarda ifade edilmiştir (Neville, 2000; Cioni vd., 2001). Sıcaklık 600 °C'ye ulaştığında betonun, dayanımının % 50'sini, 800 °C'ye ulaştığında ise yaklaşık % 80'ini kaybettiği göz önüne alınırsa (Baradan vd., 2002), renk incelemesi ile betonun maruz kaldığı sıcaklık, dolayısı ile basınç dayanımındaki değişim hakkında fikir edinilebilir.

Buradan yüksek sıcaklık etkisinde kalan betondaki renk değişiminin basınç dayanımındaki değişim için önemli bir parametre olduğu anlaşılmaktadır (Yüzer vd., 2003, Yüzer vd., 2004).

Yüzer vd. Munsell renk dizgesi kullanılarak yapılan deneysel çalışmalarında yüksek sıcaklığın silis dumanı katkılı ve katkısız harçlara olan etkilerini araştırmış, harçların maruz bırakıldığı her sıcaklık için yüzey rengi ve basınç dayanımları

belirlemiş, rengin tür bileşeni ile basınç dayanımı arasında bir ilişki kurulabileceği sonucunu ortaya koymuşlardır (Yüzer et al., 2004; Topçu and Demir, 2007; Topçu ve Demir, 2007a).

2.4. Yüksek Sıcaklığın Betonun Mekanik Özelliklerine Etkisi

Yüksek sıcaklıklar betonun bileşenlerinin kimyasal ve fiziksel kompozisyonunu değiştirir. Agreg a ve çimento hamurundaki değişikliklere ek olarak, yüksek sıcaklık agreg a ile çimento hamuru arasındaki aderansını bozmaktadır. Bozulan aderans dayanım ve rijitlik kaybına neden olur ve sünmeyi artırır (Felicetti and Gambarova, 1998).

Genel olarak, betonda patlayarak kabuk atma, betonun 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.

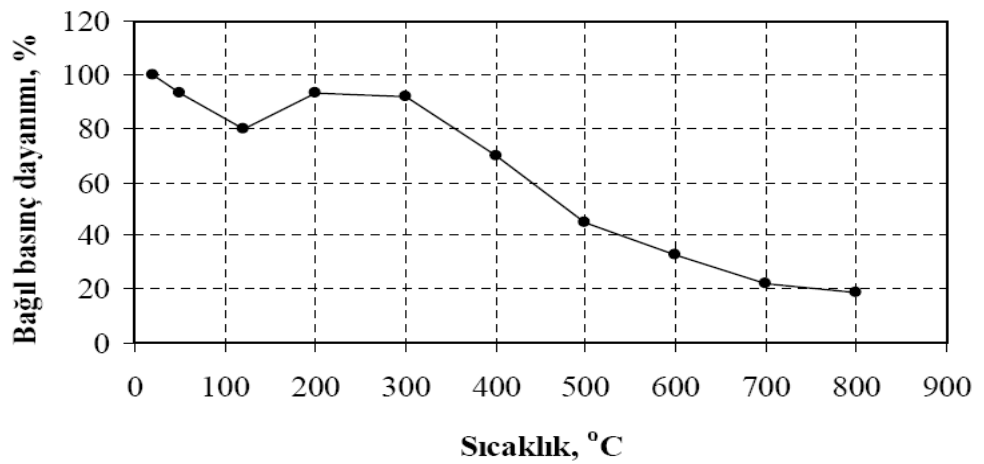
Yüksek sıcaklık etkisinde kalan betonların arta kalan dayanımların araştırıldığı birçok veri doğal soğutma koşulları altında elde edilmiştir. Ancak su sıkılması, suya daldırma veya su ile söndürme gibi işlemlerin kullanıldığı soğutma şekillerinde bu dayanım kayıpları farklılık göstermektedir. Betonun 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 A, 2008).

2.4.1. 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 2.9’da 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 ısı genleşme farklılıkları olarak değerlendirilmektedir (Yamazaki et al, 1995: Cülfik, 2001).



Şekil 2.9. Normal betonda basınç dayanımı-sıcaklık ilişkisi

(Yamazaki et al, 1995: Cülfik, 2001).

Betonda, çimento hamuru ve agregada ortaya çıkan aderans bozulması ve ısı genleşme farklılıkları, beton dayanımının yüksek sıcaklıklarda azalmasına yol açan nedenler arasında kabul edilmektedir.

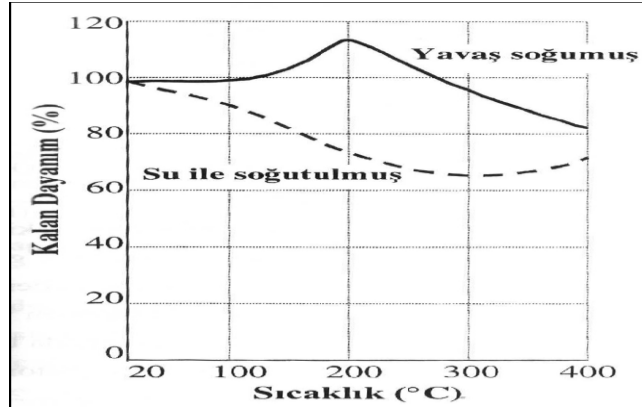
2.4.1.1. Betonda ısıtma sürecinde buharlaşabilir suyun basınç dayanımındaki rolü

Genel olarak, ilk başta 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). Beton 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 kaçmaya 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 bağlıdır. Emilmiş suyun çıktığı ve dayanımın artmaya başladığı sıcaklık, betonun gözenekliliğine bağlı olmaktadır.

2.4.1.2. Soğutma türünün basınç dayanımına etkisi

Soğutma türünün de yüksek sıcaklığa maruz kalan betonun basınç dayanımına etkisi vardır. Su ile soğutulan numunelerin basınç dayanımlarındaki azalma (Şekil 2.10) havada soğutulan numunelere nazaran daha fazladır (Neville, 2000; Yüzer vd. 2004).



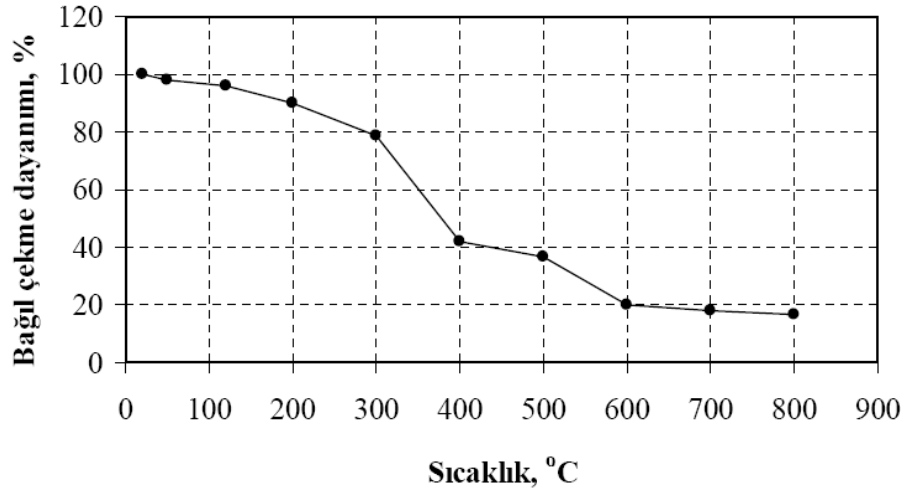
Şekil 2.10. Basınç dayanımının soğutma şekline göre sıcaklıkla değişimi
(Neville, 2000)

Shoaib vd. (2001) tarafından agrega olarak ayrı ayrı kum ve iki farklı cüruf kullanılarak üretilen farklı su/çimento oranlarına sahip 7.5x15 cm boyutlu silindir numuneler 600 °C'ye kadar ısıtılmış ve bu sıcaklıkta iki saat bekletilmiştir. Numunelerde havada soğutulan grupların basınç dayanımındaki azalmanın suda ve fırında soğutulanlardan daha fazla olduğu görülmüştür. Bunun nedeni atmosferik ortama maruz kalan betonda CaO'nun CaCO₃'e dönüşmesiyle ve bunun hacim değişimine ve çatlaklara neden olmasıyla açıklanmıştır. Lea ve Straaling betonda 300 °C'ye kadar olan dayanım artışına dikkat çekmişlerdir. Dayanımdaki artış silis esaslı agrega ile üretilen betonlarda daha fazladır ve bunun nedeni çimento ile agrega arasındaki aderansın silisli agregalarda daha yüksek olmasıdır (Savva vd., 2005).

2.4.2. Çekme dayanımı

Betonun çekme dayanımı, eğilmede çekme ve yarma deneyi sonuçları ile araştırılır. Silindir numunelerde değişik sıcaklık etkisinde iken ve soğutulduktan sonra yapılan yarma deneyi ile elde edilen çekme dayanımlarında 100 °C'den itibaren önemli düşüşler olmakta ve 600 °C'de kayıp % 70 'e varmaktadır (CEB, 1991).

Normal betonun çekme dayanımı yükselen sıcaklığa bağlı olarak hızla azalmaktadır. Çimento hamuru ve agregada ortaya çıkan aderans bozulması ve ısı genleşme farklılıkları, betonun çekme dayanımının yüksek sıcaklıklarda azalmasına yol açan nedenler arasında kabul edilmektedir.

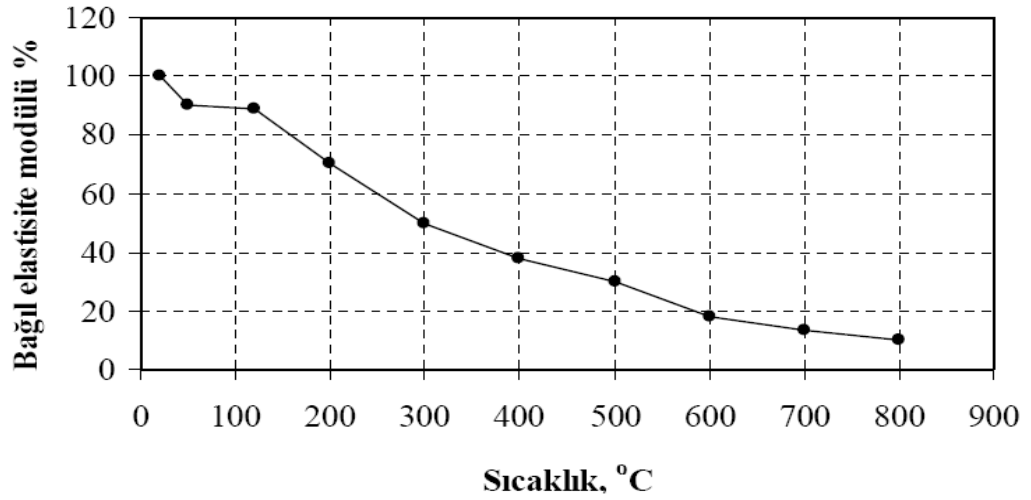


Şekil 2.11. Normal betonda çekme dayanımı-sıcaklık ilişkisi
(Yamazaki et al, 1995; Cülfik, 2001).

Li et al. (1993a) araştırmalarında çekme dayanımındaki azalmaların basınç dayanımına göre daha fazla olduğunu söylemişlerdir. Çünkü rehidratasyon sonucu çimento hamuru ve agrega-hamur arayüzeyindeki oluşan çatlaklar çekme dayanımına daha fazla zarar vermektedir. Li et al.'e (1993b) göre ele alınan ısıtma yöntemleri, yüksek sıcaklıktan sonraki beton dayanımı daha az etkilemektedir.

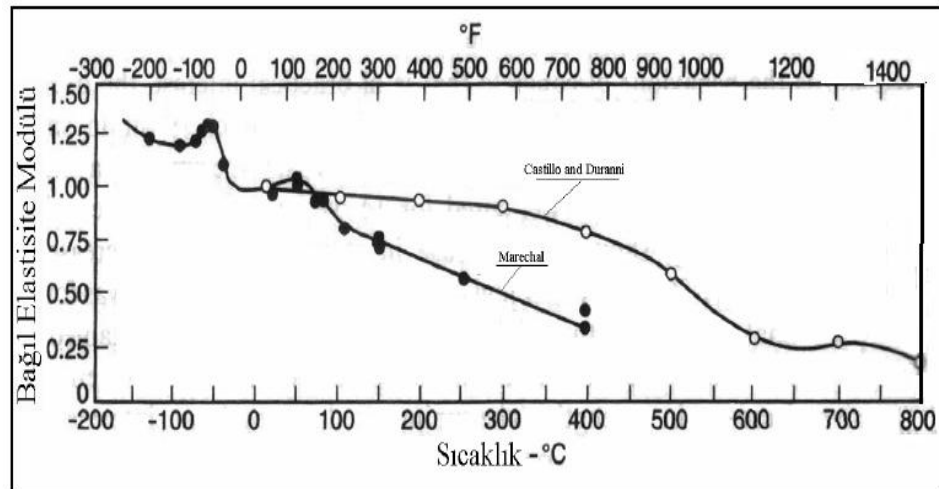
2.4.3. Elastisite modülü

Normal dayanımlı betonun yüksek sıcaklıklardaki elastisite modülü değerleri Şekil 2.12'de gösterilmiştir. Elastisite modülünün artan sıcaklığa bağlı olarak azaldığı görülmektedir. Kür koşullarının veya deney ortam sıcaklığının (sıcak ve soğuk) bir etkisi bulunmamaktadır (Cülfik, 2001).



Şekil 2.12. Normal betonda elastisite modülü-sıcaklık ilişkisi
(Yamazaki et al, 1995; Cülfik, 2001).

Betonarme yapıların davranışı betonun elastisite modülüne bağlıdır ve bu modül sıcaklıktan oldukça etkilenir. Şekil 2.13'te görüldüğü gibi kütle halinde kür edilmiş betonlarda, 21 °C ile 100 °C'ler arasında elastisite modülünün değerinde yaklaşık % 10'luk bir azalma meydana gelmiştir. Sıcaklık 120 °C ve üzeri sıcaklıklara ulaştığında ise elastisite modülünün değerindeki azalma giderek artmaktadır. Suyun betondan uzaklaşması, boşluk ve gözenekliliğin artması ile 800 °C'de azalma % 90'lara ulaşmaktadır (Neville, 2000). Genel olarak, dayanımdaki azalma ile elastisite modülündeki azalma benzer eğilim göstermektedir.



Şekil 2.13. Betonun elastisite modülünün sıcaklıkla değişimi (Neville, 2000).

BÖLÜM 3

DENEYSEL ÇALIŞMA

Yüksek sıcaklıkların, farklı çimentolar kullanılarak üretilen betonların fiziksel ve mekanik özellikleri üzerindeki etkisini araştırmak için düzenlenen deneysel çalışma numune üretimi, kürü, sıcaklık etkisi, soğutma süreci, fiziksel ve mekanik deneyler olmak üzere beş aşamada gerçekleştirilmiştir.

Numune üretiminde, CEM I 42.5 R ve CEM III/A 32.5 N olmak üzere iki farklı tip çimento kullanılmıştır. Yüksek sıcaklık etkisi; 20 °C olarak kabul ettiğimiz oda sıcaklığındaki kontrol numunelerinde ve 150, 300, 450 ve 600 °C olmak üzere dört farklı sıcaklıkta değerlendirilmiştir. Farklı iki 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 240 adet 150x150x150 mm boyutlu küp beton numunesi üretilmiştir (Şekil Ek 2.1). Bunun yanı sıra kullanılan çimento ve soğutma türü 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 III/A 32.5 N	CEM III H	CEM III S

3.1. Üretimde Kullanılan Malzemeler

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

3.1.1. Çimentolar

Beton üretiminde, Bursa Çimento fabrikasından temin edilen CEM I 42.5 R ile Lafarge Çimento Ereğli fabrikasından temin edilen CEM III/A 32.5 N tipi çimentolar kullanılmıştır. Kullanılan çimentolar Şekil Ek 2.2’de gösterilmektedir. Kullanılan çimentoların kimyasal, fiziksel ve mekanik özellikleri Çizelge 3.2 ve Çizelge 3.3’te verilmiştir.

Çizelge 3.2. Kullanılan çimentoların kimyasal özellikleri.

BİLEŞENLER	CEM I 42.5 R	CEM III/A 32.5 N
SiO ₂	18.60	27.88
Al ₂ O ₃	5.71	8.88
Fe ₂ O ₃	3.06	2.40
CaO	63.06	51.83
MgO	0.89	3.83
SO ₃	2.53	1.92
Na ₂ O	0.26	-
K ₂ O	0.53	-
Cl ⁻	0.012	0.010
Kız. Kaybı	3.22	3.90
SCaO	1.18	0.44
Katkı	-	-
Çöz. Kalıntı	0.29	0.43

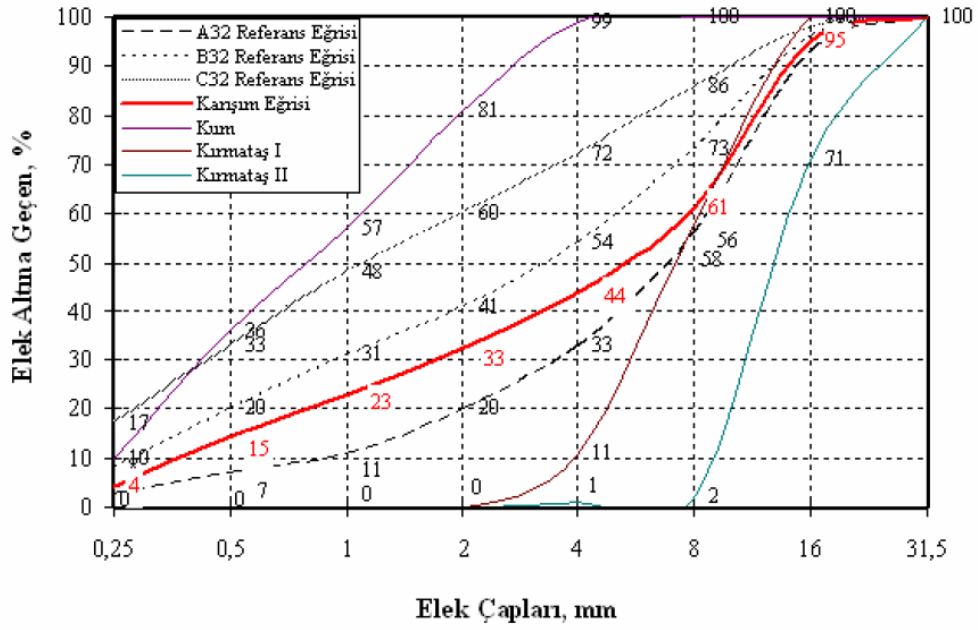
Çizelge 3.3. Kullanılan çimentoların mekanik özellikleri.

MEKANİK ÖZELİKLER				
ÇİMENTO TİPİ	BASINÇ DAYANIMLARI (MPa)			
	1. Gün	2. Gün	7. Gün	28. Gün
CEM I 42.5 R	12.7	23.5	41.3	52.2
CEM III/A 32.5 N	6.0	11.1	20.3	37.0

3.1.2. Kaba Agrega

Beton üretiminde piyasadan temin edilen iki farklı boyuttaki (4-16 ve 16-31.5 mm) kırmataş agregaları kullanılmıştır. Bu iki farklı kırmataş agregasından bir miktar alınarak 24 saat 105 °C'deki etüvde bekletildikten sonra 3000 gr tartılarak elek analizi için hazır duruma getirilmiştir.

Bu agregaların ve kumun elek analizleri ile ideal karışım oranları hesaplanmıştır. Beton üretiminde ideal karışım oranları % 44 kum, % 28 kırmataş I ve % 28 kırmataş II agregası olarak elde edilmiştir. Agregaların özelliklerinin ve granülometrisinin belirlendiği deneyler TS 3529 ve TS 706 EN 12629'a uygun olarak yapılmış, agregaların ve karışımın granülometri eğrisi Şekil 3.1'de verilmiştir. En büyük tane boyutu 31.5 mm'dir.



Şekil 3.1. Agregalara ait granülometri eğrileri.

Tüm malzemeler özelliklerinin belirlenmesinden sonra laboratuvarımızın beton üretim kısmında stoklanmıştır. Beton üretiminde kullanılacak agregaların özgül ağırlıkları ve su emme oranları Çizelge 3.4’te verilmektedir.

Çizelge 3.4. Agregaların fiziksel özellikleri

Malzeme	Özgöl Ağırlık	Su Emme (%)
Kum	2.61	1.2
Kırmataş I	2.71	0.4
Kırmataş II	2.71	0.3

3.1.3. Kum

İnce agrega olarak, yapı malzemesi laboratuvarımızda bulunan, 0-4 mm yıkanmış nehir kumu kullanılmıştır.

3.1.4. 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
Buharlaştırma Bakiyesi	434 mg/l

3.1.5. 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

Bu çalışmada; bir kenarı 150 mm olan toplam 240 adet küp beton numunesi üretilmiştir. Beton numune üretiminde, akıcı kıvamdaki betonda ortalama 12 cm'lik çökme değeri, hiperakışkanlaştırıcı katkı maddesi ile sağlanmıştır. 1 m³ beton için gerekli malzeme miktarları Çizelge 3.6'da verilmiştir.

Numune üretimleri; laboratuvarımızda bulunan, 20 dm³'lük beton mikseri ile yapılmıştır (Şekil Ek 2.3). Beton mikseri ile karışımlar hazırlandıktan sonra, masa vibratörü üzerinde kalıplara yerleştirilmiştir (Şekil Ek 2.4). Üretim sırasında çökme değeri tüm numuneler için 12 cm'de sabit tutulmaya çalışılmıştır (Şekil Ek 2.5).

Üretilen numuneler 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 Ek 2.6).

Çizelge 3.6. 1 m³ beton için gerekli malzeme miktarları

Malzeme, kg	CEM I	CEM III
Çimento	330	377
Su	215	215
Katkı	1.3	1.5
Kum	840	790
Kırmataş I	465	465
Kırmataş II	465	465

3.3. Yüksek Sıcaklık Uygulaması ve Soğutma Süreci

Uygulanan 28 ve 56 günlük kür sürelerinin sonunda, ısıtma işlem aşamasından önce tüm beton numuneleri etüvde (100 ± 5 °C) 48 saat bekletilmiştir (Şekil Ek 2.7). Etüvde kuru duruma getirilen beton numuneleri ısıtma işlem safhasında TS EN 1363-1'e göre ısıtma hızı 6 °C/dak. olan fırında 150, 300, 450 ve 600 °C sıcaklıklarda, 3 saat süreyle yüksek sıcaklık etkisi altında bırakılmıştır (Şekil Ek 2.8). Numunelerin patlayıp fırına zarar verme ihtimaline karşı her sıcaklık uygulamasında üzerlerine çelik tellerle sarılı kafes yerleştirilmiştir (Şekil Ek 2.9).

Yüksek sıcaklık uygulaması tamamlandığında fırından çıkarılan numunelere havada ve suda soğutma olmak üzere iki tür soğutma uygulanmıştır. Her sıcaklık sonrası fırının arabalı olan rafı fırın dışına alınarak sıcaklık sonrası numunelerin bir grubu havada soğumaya bırakılmıştır. Havada soğumaya bırakılan beton numuneleri, deneyleri yapmak için oda sıcaklığına kadar normal oda koşullarında bekletilmiştir (Şekil Ek 2.10).

Suda soğutma uygulanan grup ise, oda sıcaklığında durgun su bulunan deney kaplarına konulmuş, kaplardaki sular ısındıkça kap değiştirilerek oda sıcaklığına kadar soğutulmuştur (Şekil Ek 2.11).

3.4. Yapılan Deneyler

Farklı çimento tipleriyle üretilen betonların yüksek sıcaklık etkisinden sonra arta kalan dayanımlarını belirlemek amacıyla gerçekleştirilen deneysel çalışma kapsamında beton numuneler üretilmiş, gerekli deney ve ölçümler yapılmıştır. Betonların ultrases geçiş hızları ölçülmüş, yarmada çekme ve basınç dayanımı deneyleri yapılmış, hacimce su emme, yüzey sertliği, birim ağırlık değerleri belirlenmiştir. Fiziksel ve mekanik özelliklerin araştırıldığı deneyler aşağıda açıklanmıştır.

3.4.1. Birim ağırlık

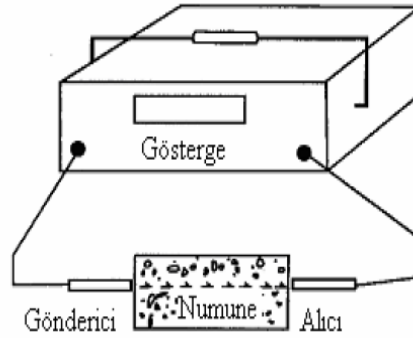
Birim ağırlığı (TS EN 12390-7) belirlemek amacıyla, tüm numuneler yüksek sıcaklık uygulamadan önce ve yüksek sıcaklık uygulandıktan sonra 30 kg kapasiteli terazide tartılmıştır. Daha sonra tüm numunelerin en, boy ve yükseklikleri kumpas ile hassas olarak ölçülmüştür. Boyutları belirlenen numunelerin geometrik hacimleri hesaplanmıştır. Ağırlığın hacme oranı ile tüm numunelerin birim ağırlıkları belirlenmiştir (Çizelge Ek 1.1-1.2).

3.4.2. Ultrases geçiş hızlarının belirlenmesi

Beton numunelerde, ASTM C 597-02 (2002) ve BS 1881 Part 203 (1986)'ya uygun ultrases aleti ile t, μ s ses geçiş süreleri ölçülmüştür (Şekil Ek 2.12).

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 3.2'de görüldüğü gibi numunenin düzgün yüzeylerine yerleştirilmiş, direkt iletim yöntemi uygulanarak ses geçiş süresi (t, μ s) okunmuştur. Problar yer değiştirilerek ikinci okuma alınmış, her numune için bu iki okumanın ortalaması alınarak 3.1 bağıntısından yararlanarak ses geçiş hızı (V, km/sn) hesaplanmıştır (Çizelge Ek 1.3-1.4).

$$V_s = \frac{l}{t} \quad (3.1)$$



Şekil 3.2. Beton numunelerinde ses geçiş süresinin ölçümü.

3.4.3. Yüzey sertliği deneyi

Yüzey sertliği deneyi küp numunelerde TS EN 12504-2: 2004 ve TS 3260'a uygun olarak otomatik beton test çekici ile yapılmıştır. Küp numuneler beton presinde 6 tonluk ön yükleme ile sıkıştırılmıştır. Beton test çekicinin kalibrasyonu test edildikten sonra, sıkıştırılan küp numuneler üzerinde Şekil Ek 2.13'te olduğu gibi 10 vuruş ortalaması ve buna bağlı olarak yüzey sertliği dayanım değerleri cihazdan hazır olarak alınarak tahmini değerler belirlenmiştir (Çizelge Ek 1.5-1.6).

3.4.4. Basınç dayanımı deneyi

Küp numuneler üzerinde TS EN 12390-3'e uygun basınç dayanımı deneyi yapılmıştır. Basınç deneyinde 200 ton kapasiteli 0.1 kg duyarlıklı beton presi kullanılmıştır. Deneyde küp numuneler yan yatırılarak pürüzsüz yüzeylerinin presin iki çelik sıkıştırma tablası arasına gelmesi sağlanmıştır. Pres tablaları arasına yerleştirilmiş numuneler $3 \text{ kg/cm}^2/\text{sn}$ 'lik sabit hızla yüklenmiş ve kırılma yükleri (P_k) belirlenmiştir (Şekil Ek 2.14). Numunenin kırıldığı P_k kuvvetin yüzey alanına bölünmesi ile basınç dayanımı 3.2 bağıntısı ile bulunmuştur.

$$\sigma_{\text{basınç}} = \frac{P_k}{A} \quad (3.2)$$

Tüm numuneler için elde edilen basınç dayanım değerleri Ek Çizelge 1.7 ve 1.8’de verilmiştir.

3.4.5. Yarmada çekme deneyi

Betonun çekme dayanımını endirekt olarak belirlemek için küp numunelerde TS EN 12390-6’ya uygun olarak yarma deneyi yapılmıştır (Şekil Ek 2.15). Yarmadan çekme dayanımını belirlemek için küp beton numuneler pres tablaları arasına düzgün bir şekilde yerleştirilmiştir. Endirekt yoldan çekme sağlamak amacı ile numunelerin alt ve üst kısımlarına paralel olacak şekilde yerleştirilen 25 mm eninde ve 3 mm kalınlığındaki demir çubuklar üzerine, 0.05 MPa/sn yükleme hızı ile presle basınç yükü uygulanmıştır. Küp beton numuneye basınç yükünün uygulanması durumunda beton, yük ekseninde kısalmaya, yük eksenine dik olan yatay ekseninde ise uzama etkisinde kalmıştır. Böylelikle, kübik numune üzerinde çizgisel bir yük meydana getirilerek buna dik doğrultularda numune üzerinde çekme gerilmeleri oluşturulmuştur. Artan basınç yükünün numunenin çekme dayanımını aşması sonucu küp numunenin ortasından yarılarak kırıldığı görülmüştür. Deney sonucunda elde edilen değerler Ek Çizelge 1.9 ve 1.10’da verilmiştir.

3.4.6. Hacimce su emme deneyi

Yarmada çekme deneyinden sonra, ikiye ayrılan numunelerin bir parçası alınıp, hassas terazide tartılmıştır. Tartılan numuneler, kür havuzunda 48 saat süreyle bekletilerek suya doymun hale getirilmiştir. 48 saat sonunda numuneler havuzdan çıkarılıp, tekrar tartılmıştır (Şekil Ek 2.16). İlk tartı ile son tartı arasındaki farklar değerlendirilerek numunelerin hacimce su emme yüzdeleri hesaplanmıştır (Çizelge Ek 1.11-1.12).

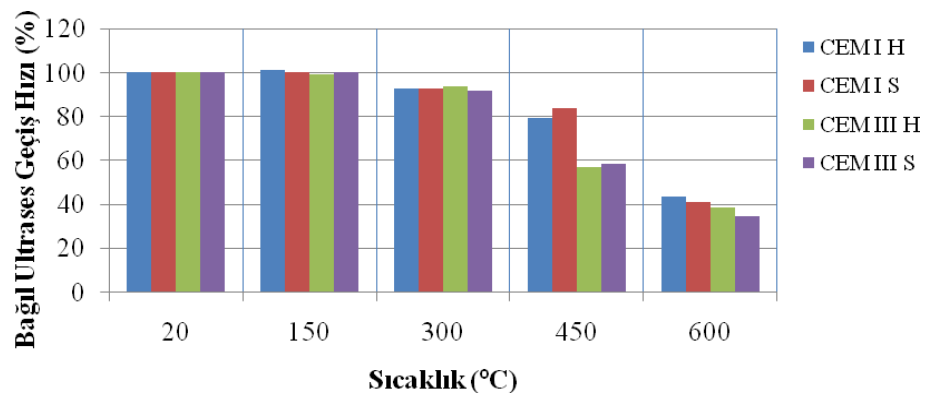
BÖLÜM 4

DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

Farklı çimento tipleri ile üretilen betonların 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.

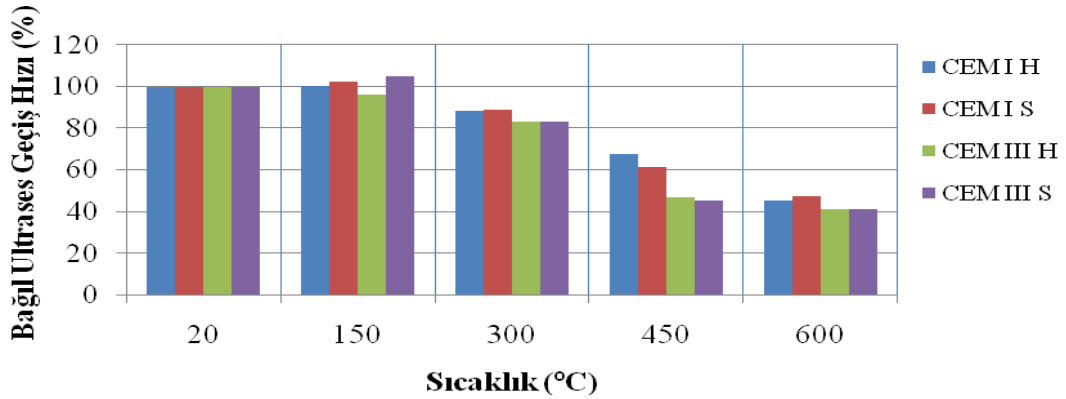
4.1. Ultrases Geçiş Değerlerinin Değerlendirilmesi

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 (Neville, 2000) bu metot için, bazı ülkelerde standartlar da geliştirilmiştir. Ultrasonik dalganın bir ortamda yayılma hızı o ortamın boşluk yapısına, dolayısı ile yoğunluğuna ve elastik özelliklerine bağlıdır. Bu bölümde yapılan ultrases ölçümleri ile, yüksek sıcaklığın betonun boşluk yapısına etkileri değerlendirilmiş, sonuçlar Ek Çizelge 1.3 ve 1.4’te verilmiştir.



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

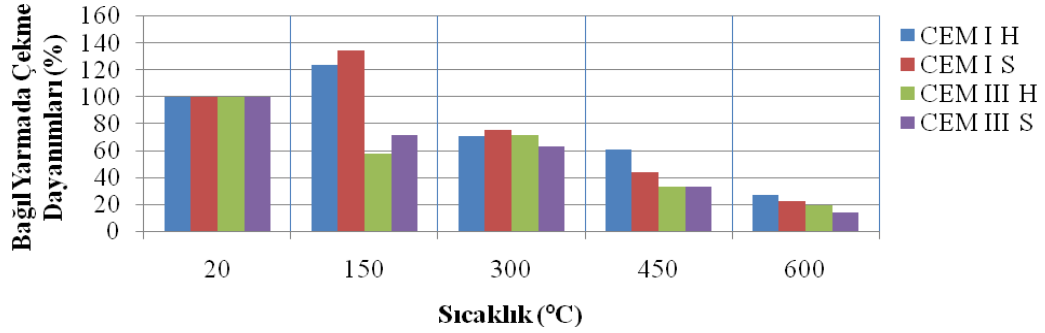
Şekil 4.1’de 28 günlük numuneler için bağıl ses geçiş hızının sıcaklıkla değişimi verilmiştir. 28 günlük kontrol numunelerinden en düşük ses geçiş hızı 4.36 km/sn ile CEM I grubunda; en büyük değer ise 4.63 km/sn ile CEM III grubunda elde edilmiştir. Ultrases deneyi sonuçlarına göre 300 °C’ye kadar önemli bir değişiklik olmamış, 300 °C’den sonra her iki tip çimentonun kullanıldığı gruplarda da belirgin azalmalar meydana gelmiştir. 450 °C’ye kadar kullanılan çimento türünün ve soğutma şeklinin ultrases geçiş hızına önemli bir etkisi olmamıştır. Öte yandan 450 °C ve 600 °C’de soğutma şeklinden çok çimento tipinin, ultrases geçiş değerlerinde daha az düşüslere 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 beton numunelerinin sıcaklık-ultrases geçiş hızı ilişkisi.

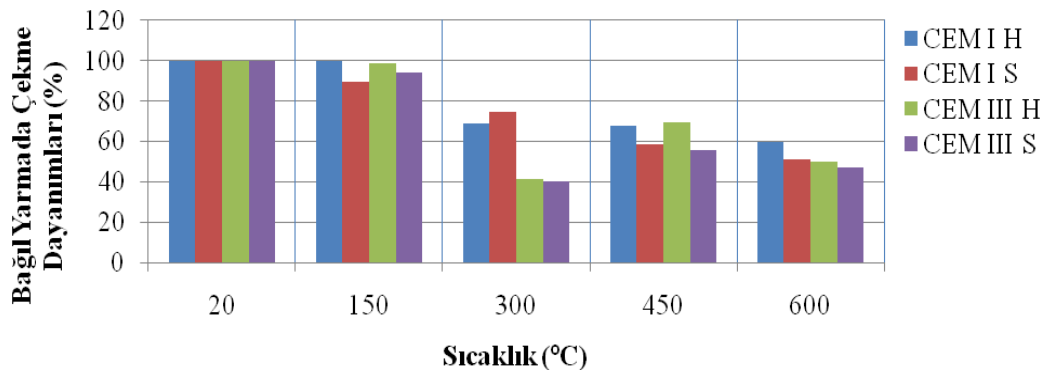
Şekil 4.2’de 56 günlük numuneler için bağıl ses geçiş hızının sıcaklıkla değişimi verilmiştir. 56 günlük kontrol numunelerinden en düşük ses geçiş hızı 4.40 km/sn ile CEM III gruplarında; en büyük değer ise 4.46 km/sn ile CEM I grubunda elde edilmiştir. 56 gün kür uygulanan numunelerin 28 günlük numunelere 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. Yarmada Çekme Dayanımının Değerlendirilmesi



Şekil 4.3. Yirmi sekiz günlük beton numunelerinin sıcaklık-yarmada çekme dayanımı ilişkisi.

Beton numuneleri üzerinde yapılan yarmada çekme deneyi sonuçlarından elde edilen dayanım değerleri Şekil 4.3'te görüldüğü gibi artan sıcaklıkla azalma göstermiştir. 150 °C'de CEM I H ve CEM I S numunelerinin yarmada çekme dayanımlarında iyileşmeler görülmüştür. CEM I tipi çimento ile üretilen grubun 150 °C'deki yarmada çekme dayanımı kontrol numunesine göre % 25 daha fazla olmuştur. 300 °C'de tüm gruplar için eğilme dayanımında meydana gelen azalma, ortalama % 30 civarında olmuştur. Tüm numuneler için suda soğutma uygulamasının zararlı etkisi havada soğutmaya oranla daha fazladır.

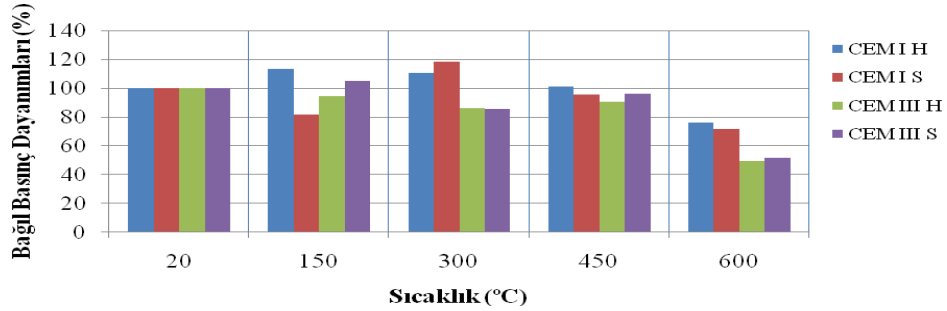


Şekil 4.4. Elli altı günlük beton numunelerinin sıcaklık-yarmada çekme dayanımı ilişkisi.

Elli altı günlük numunelere bakıldığında; kontrol numuneleri ile 150 °C numuneleri arasında yarmada çekme dayanımları arasında çok büyük farklılıklar olmadığı görülmüştür. Ancak CEM I grubu numuneler tüm sıcaklıklarda; CEM III grubuna oranla daha iyi bir performans sergilemiştir (Şekil 4.4). Havada soğutulan grupların yarmada çekme dayanımlarının tüm sıcaklıklarda suda soğutulan gruplara nazaran daha yüksek olduğu sonucuna 56 günlük numunelerden de ulaşılmıştır.

4.3. Basınç Dayanımının Değerlendirilmesi

Basınç dayanımı değerleri tüm gurlar ve tüm sıcaklıklar göz önüne alındığında 28 günlük numuneler için 38.42 MPa ile 14.1 MPa arasında değişmektedir.

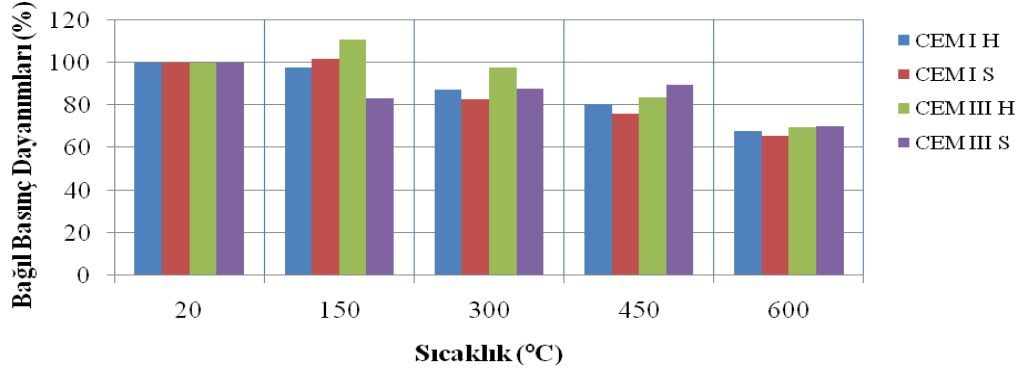


Şekil 4.5. Yirmi sekiz günlük beton numunelerinin sıcaklık-basınç dayanımı ilişkisi.

Şekil 4.5’de farklı sıcaklar sonrası elde edilen basınç dayanımları verilmiştir. Basınç dayanımları kontrol gruplarıyla karşılaştırıldığında 600 °C’ye kadar meydana gelen kayıp CEM I için % 25 oranında iken CEM III için bu oran % 50’ye ulaşmıştır. Yüksek sıcaklık etkisi basınç dayanımını olumsuz yönde etkilemiş, sıcaklık arttıkça basınç dayanımı azalmıştır.

Yirmi sekiz günlük numuneler 150 °C ve 300 °C sıcaklıklara maruz kaldığında CEM I H ve CEM I S gruplarına ait basınç dayanımlarının arttığı, CEM III H ve CEM III S gruplarının basınç dayanımlarının kontrol numunelerine göre % 15 azaldığı görülmüştür. Fakat sıcaklık 600 °C’ye ulaştığında CEM I H ve CEM I S gruplarının kü

durumuna bakılmaksızın dayanımlarının % 25'ini kaybettiği görülmüştür. Diğer yandan CEM III H ve CEM III S grubunda ise bu kaybın % 50 olduğu görülmüştür.



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

Elli altı günlük numunelerde ilk gözlenen; CEM III numune grubunda CEM I numune grubuna göre, sıcaklık arttıkça daha yüksek basınç değerlerinin görülmesidir. 150 °C’de CEM III H’da en iyi basınç dayanımı performansı görülmüştür. 300 °C ve 450 °C’de tüm gruplarda basınç dayanım değerlerinde düşüş olsa da CEM III H’da grubu diğer gruplara göre dayanım üstünlüğünü korumuştur. 600 °C’de her iki çimento grubunda da % 30-35’lik bir basınç dayanımı düşüşü yaşanmasına rağmen CEM III grubu çimentoların basınç dayanımı açısından daha iyi olduğu gözlenmiştir.

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).

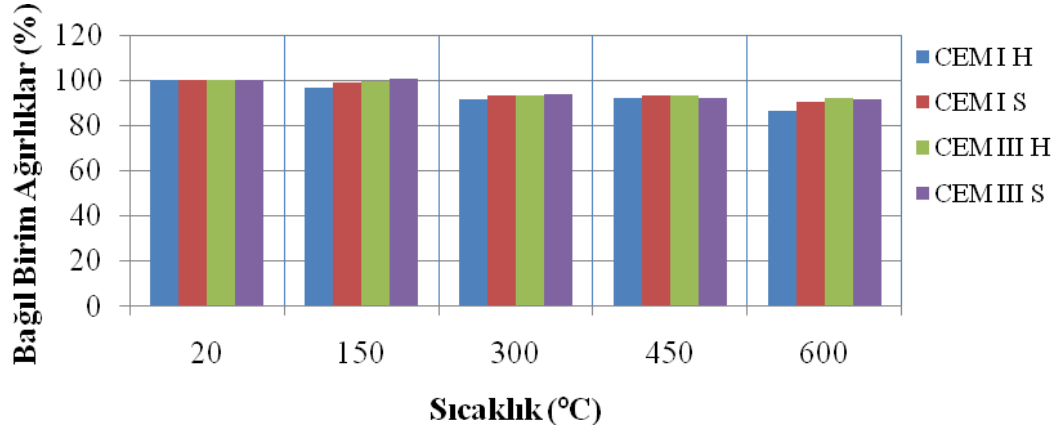
Xu vd. (2001) tarafından yapılan, yüksek sıcaklığın uçucu kül katkılı betonlara etkisinin araştırıldığı çalışmada, 250 °C’de betonun durabilitesi zarar görse de basınç dayanımının arttığı belirtilmiştir. Aynı çalışmada basınç dayanımının, 450 °C’de

% 4-15 arasında azaldığı, 650 °C’de dayanımın yaklaşık yarısını kaybettiği, 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.

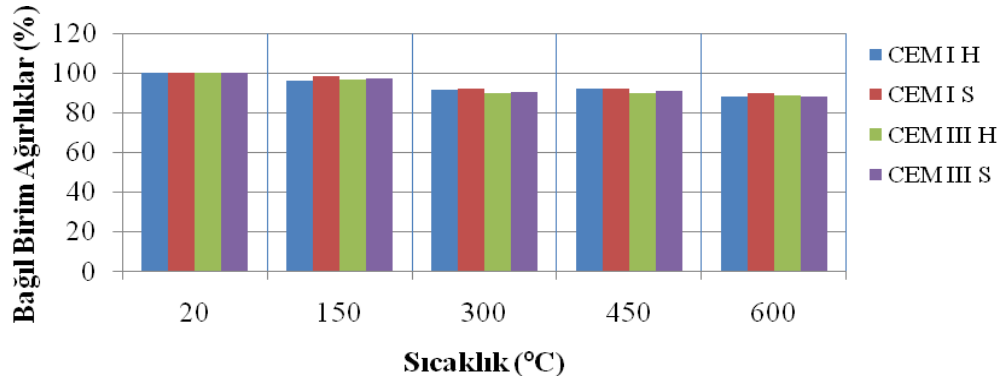
4.4. Birim Hacim Ağırlıkların Değerlendirilmesi

Birim ağırlığın sıcaklıkla değişimi incelenmiş, deney sonuçları Ek Çizelge 1.1 ve 1.2’de verilmiştir. Kontrol numunelerinin birim ağırlık değerleri 2.30 gr/cm^3 ile 2.31 gr/cm^3 arasında değişmektedir.



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

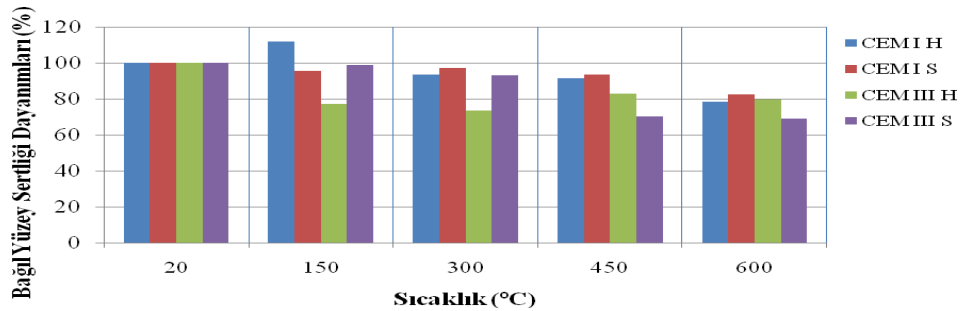
Deney sonuçlarına göre, birim ağırlıkta önemli bir değişiklik olmamasına karşın tüm gruplarda sıcaklık arttıkça azalmaktadır. Azalmalar özellikle 300 °C’den sonra gözlenmiştir. Genel olarak suda soğutulan numunelerin birim ağırlıklarındaki azalma havada soğutulanlara nazaran daha düşüktür. Her iki tip çimentonun kullanıldığı numunelerde de birbirine yakın değişimler görülmüştür.



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

Yirmi sekiz ve 56 günlük beton numunelerinden elde edilen sonuçlar Şekil 4.7 ve Şekil 4.8’de verilmiştir. Birim ağırlık değerleri 300 °C ve üzerindeki sıcaklıklarda % 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 iki 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).

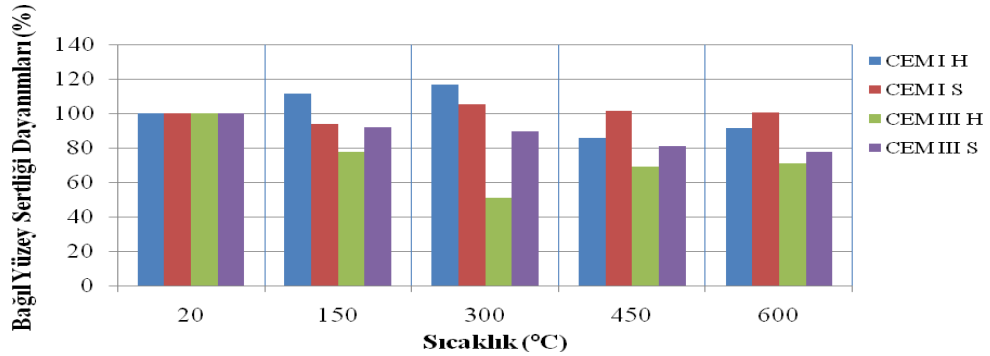
4.5. Yüzey Sertliği Değerlerinin Değerlendirilmesi



Şekil 4.9. Yirmi sekiz günlük beton numunelerinin sıcaklık-yüzey sertliği ilişkisi.

Farklı ısı işlem sonrası soğutulan numuneler üzerinde Schmidt çekici ile vurularak yapılan yüzey sertliği ölçümlerinden elde edilen dayanım sonuçları Çizelge Ek 1.5 ve 1.6'da verilmiştir.

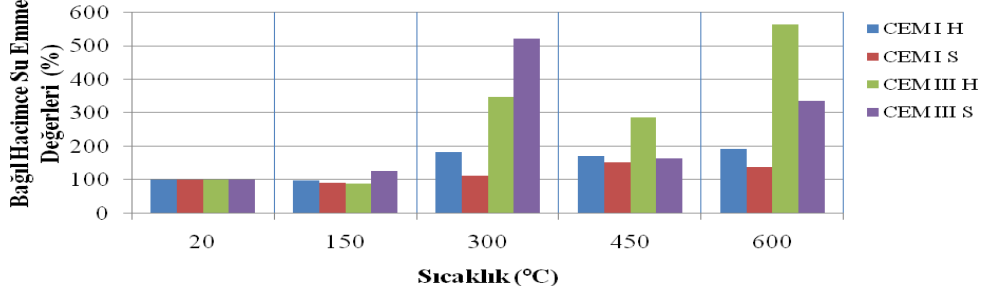
Genel olarak bakıldığında; her sıcaklık değeri için, 28 günlük, CEM I tipi çimento ile üretilen numunelerin yüzey sertliği değerleri, CEM III tipi çimento ile üretilen numunelerin yüzey sertliği değerlerinden fazladır. 150 °C'de CEM I H numunesinin yüzey sertliği değerinde % 10'luk bir değer artışı meydana gelirken; CEM III H numunesinde % 25'e varan bir değer kaybı olmuştur. 300, 450 ve 600 °C'de havada soğutulan CEM I numuneleri, suda soğutulan CEM I numunelere göre daha yüksek değerler vermiştir. CEM III numunelerde ise; 150 ve 300 °C'de suda soğutulan numuneler havada soğutulan numunelere göre daha yüksek değerler verirken; 450 ve 600 °C'de ise havada soğutulan numuneler suda soğutulanlara göre daha iyi değerler vermiştir. Sonuç olarak; sıcaklık artışına paralel olarak, her iki tip çimento grubunun, yüzey sertliği dayanımlarında düşüş gözlenmiştir.



Şekil 4.10. Elli altı günlük beton numunelerinin sıcaklık-yüzey sertliği ilişkisi.

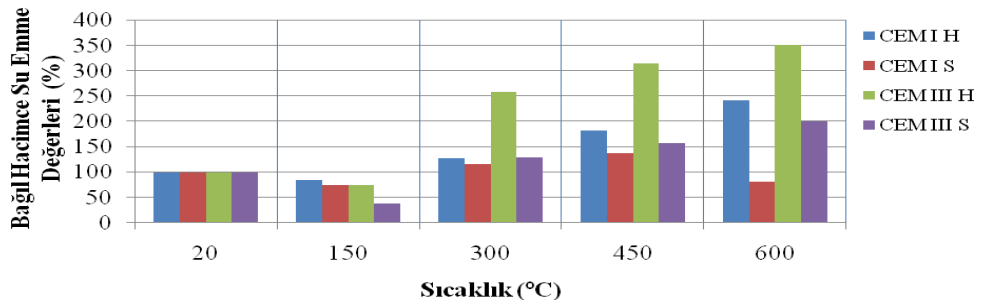
Elli altı günlük numunelerin yüzey sertliği dayanımları-sıcaklık grafiğine bakıldığında da; 28 günlük numunelerin grafiğine benzer bir grafik görülmektedir. Ancak; 56 günlük CEM I numunelerinin yüzey sertliği dayanımlarındaki artış dikkat çekmektedir.

4.6. Hacimce Su Emme Değerlerinin Değerlendirilmesi



Şekil 4.11. Yirmi sekiz günlük beton numunelerinin sıcaklık-hacimce su emme ilişkisi.

Yirmi sekiz günlük numunelerin su emme grafiklerine bakıldığında; sıcaklık artışına paralel olarak, CEM III grubu numunelerin CEM I grubuna göre; daha fazla su emdiği görülmektedir. Ayrıca; çimento tipine bakılmaksızın havada soğutulan numunelerin hacimce su emme yüzdelерinin suda soğutulan numunelerden daha fazla olduğu görülmektedir. 300 °C’de hacimce su emme değeri en yüksek olduğu numune grubu CEM III S iken, 450 ve 600 °C’de en yüksek değeri CEM III grubu numunelerde olduğu görülmektedir.



Şekil 4.12. Elli altı günlük beton numunelerinin sıcaklık-hacimce su emme ilişkisi.

Elli altı günlük grafiklerde de; 28 günlük grafiklere birebir benzer bir grafik elde edilmiştir. Ancak; sıcaklık artışıyla birlikte hacimce su emme yüzdeleri 28 günlüklere göre; her iki tip çimento içinde artış göstermiştir. 300, 450 ve 600 °C’lerde en yüksek hacimce su emme değeri CEM III H grubu numunelerde olduğu görülmektedir.

BÖLÜM 5

DENEY SONUÇLARININ MİNİTAB İLE YORUMLANMASI

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.

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 olmasını 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 birbiri ile çok yakından ilişkilidir. Bu yakın ilişki şöyle ifade edilir:

$$F = t^2 \quad (5.1)$$

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 yorumlanmasında yalnızca şekillere bakılarak görsel yorum yapılmamış ayrıca elde edilen Anova tablosu değerlerine göre de yorumlar eklenmiş, gerekli değerler parantez içinde verilmiştir.

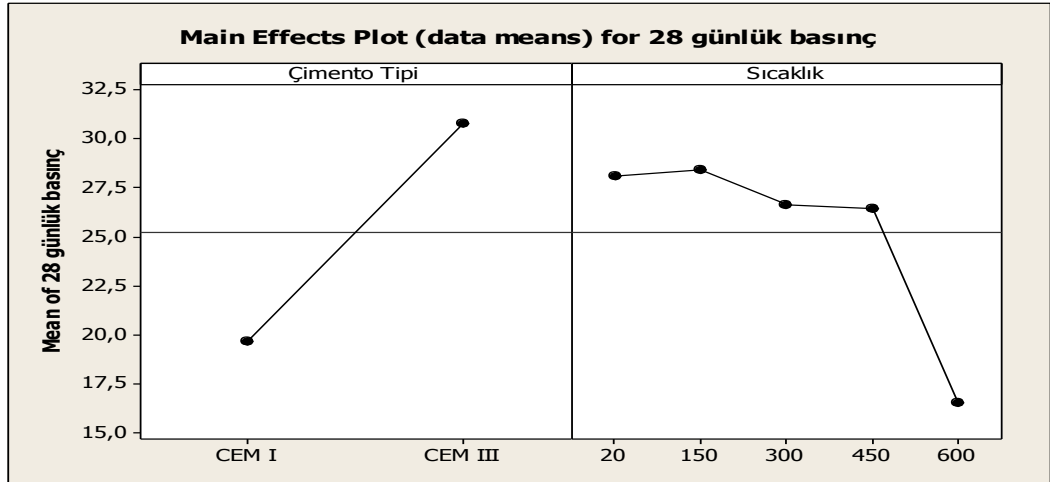
5.3. Yirmi Sekiz Günlük Havada Soğutma Uygulanmış Numunelerin Basınç Dayanımları

Yirmi sekiz gün kür uygulanan ve havada soğutulan numunelerin yapılan Anova analiziyle; basınç dayanımlarının, sıcaklık ve çimento tipine göre değerlendirilmesi sonucu elde edilen Anova tablosu Çizelge 5.1’de verilmiştir.

Çizelge 5.1. Yirmi sekiz günlük havada soğutulmuş numunelerin Anova tablosu

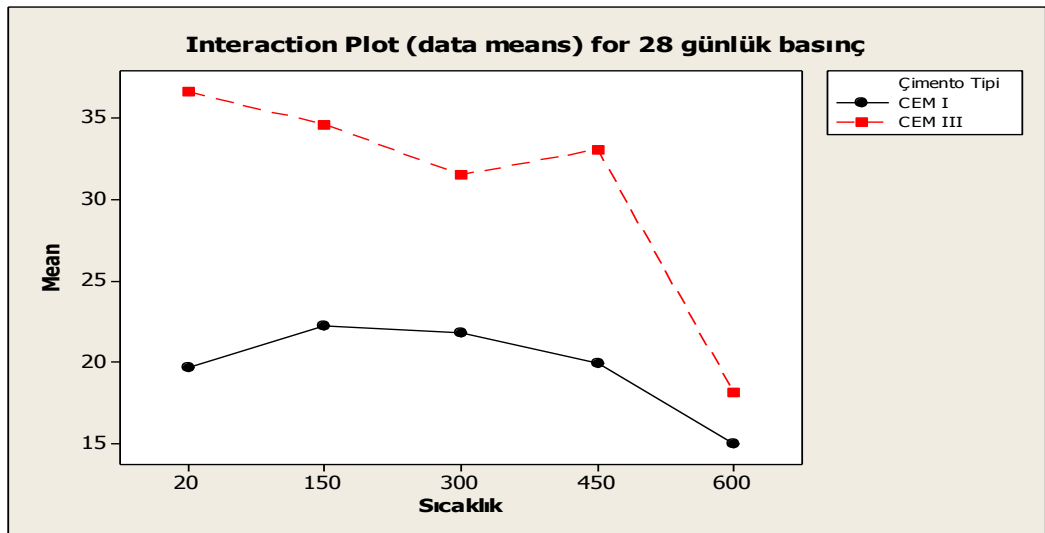
Kaynak	DF	SS	MS	F	P
Çimento Tipi	1	305.035	305.035	23.10	0.009
Sıcaklık	4	194.957	48.739	3.69	0.117
Hata	4	52.817	13.204	-	-
Toplam	9	552.810	-	-	-

Çizelge 5.1’de görülen Anova tablosuna göre çimento tiplerine göre ortalamalar arasındaki farklılıklar kıyaslandığında ($P=0.009<0.05$) ortalamalar arasında önemli farklılıklar olduğu görülmektedir. Sıcaklığa göre ortalamalar arasındaki farklılıklar kıyaslandığında ise ($P=0.117>0.05$) ortalamalar arasında fark olmadığı kabul edilir.



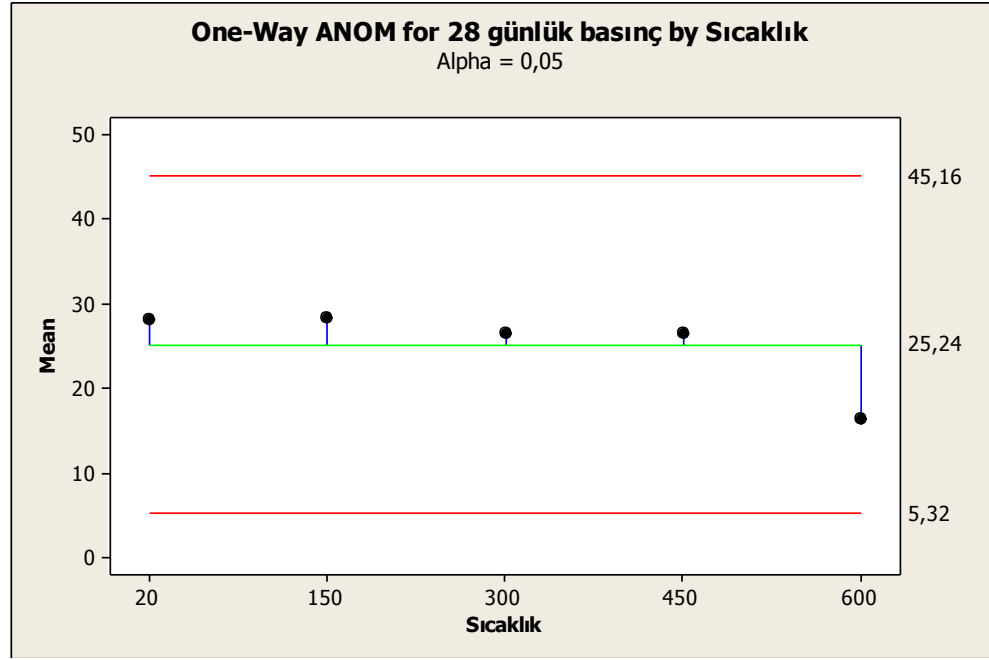
Şekil 5.1. Yirmi sekiz günlük havada soğutulmuş numunelerin ana etki büyüklükleri grafiği.

Ana etki büyüklüklerinin karşılaştırıldığı grafiğe göre 28 günlük havada soğutma uygulanmış numuneler için, en yüksek basınç dayanımları 20 °C ve 150 °C sıcaklıklarda elde edilmiştir. 450 °C ile 600 °C aralığı ise; beton numunelerin dayanımlarında ani düşüşlerin meydana geldiği aralıktır. 450 °C'nin üzerindeki sıcaklıklar beton numuneleri için dayanımın büyük oranda kaybedildiği yüksek sıcaklıklar olarak nitelendirilebilir (Şekil 5.1).



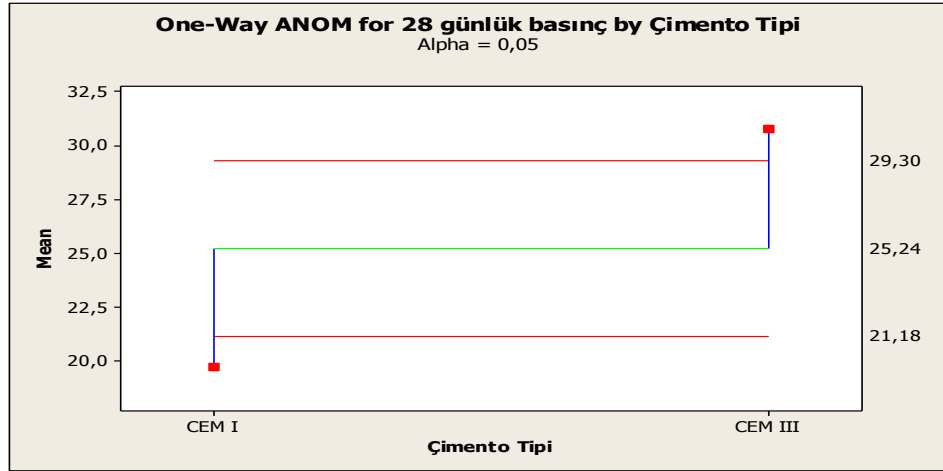
Şekil 5.2. Yirmi sekiz günlük havada soğutulmuş numunelerin etkileşimler grafiği.

Yukarıdaki Anova grafiğinden de görüldüğü üzere (Şekil 5.2) CEM III tipi çimento kullanılarak üretilen numuneler, her farklı sıcaklıklardaki değerler karşılaştırıldığında, CEM I tipi ile üretilen numunelere göre; daha iyi dayanım sonuçları vermiştir. Ancak; 600 °C'ye ulaşıldığında, her iki tip çimento ile üretilen numunelerin basınç dayanımlarında ciddi bir düşüş gözlenmiştir.



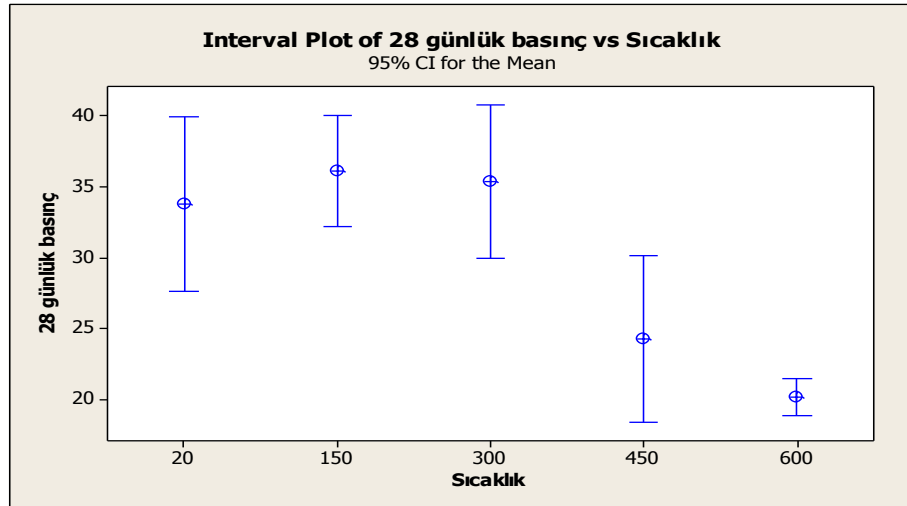
Şekil 5.3. Yirmi sekiz günlük havada soğutulmuş numunelerin basınç dayanımı ve sıcaklık ilişkisi için tek yönlü Anova analizi grafiği.

Yirmi sekiz günlük havada soğutulmuş numuneler için, basınç dayanımıyla sıcaklık ilişkisinin tek yönlü olarak incelendiği Anova grafiğinden de görüldüğü üzere (Şekil 5.3) her iki çimento tipinin 28 günlük basınç dayanımlarının birbirine yakın olduğu görülmektedir. Tüm değerler karar limitleri arasında kalmıştır. 450 °C üstü kırılma noktası olmuştur. 20, 150, 300 ve 450 °C'de üst karar limitinin altında dayanımlar elde edilirken; 450 °C sonrasında değerler alt karar limitin üzerinde kalmıştır.



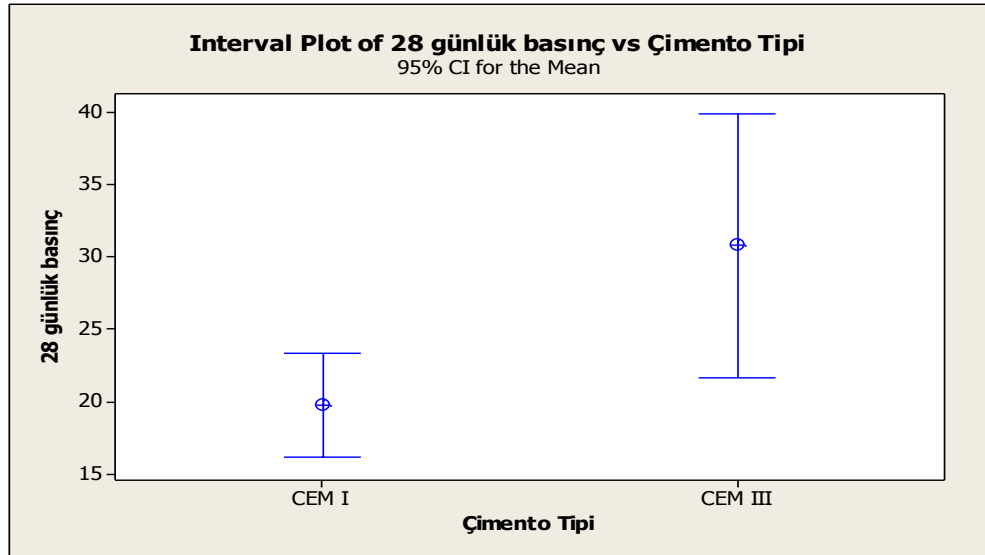
Şekil 5.4. Yirmi sekiz günlük havada soğutulmuş numunelerin basınç dayanımı ve çimento tipi ilişkisi için tek yönlü Anova analizi grafiği.

Tek yönlü Anova ile 28 günlük havada soğutulan numunelerin basınç dayanımları ile çimento tipleri arasında analiz yaptığımızda; her iki çimento tipi için 28 günlük basınç dayanımlarının birbirinden çok farklı olduğunu görülmektedir. CEM I tipi çimento, alt karar limitin altında bir dayanım gösterirken; CEM III tipi çimento ise üst karar limitin üstünde bir dayanım göstermiştir (Şekil 5.4).



Şekil 5.5. Yirmi sekiz günlük havada soğutulmuş numunelerin basınç dayanımı ve sıcaklık arasındaki aralık grafiği.

Sıcaklıklara göre çizilen 28 günlük basınç dayanımlarının aralık grafiğinden de görüldüğü üzere; 600 °C dışında, aralık gruplarının birbirlerinden çok farklı olmadığı görülmektedir (Şekil 5.5).



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

Şekil 5.6’da 28 günlük basınç ve çimento tipi aralık grafiğinden görüldüğü üzere; çimento tiplerinin aralık gruplarının birbirlerine göre oldukça farklılık gösterdiği görülmektedir.

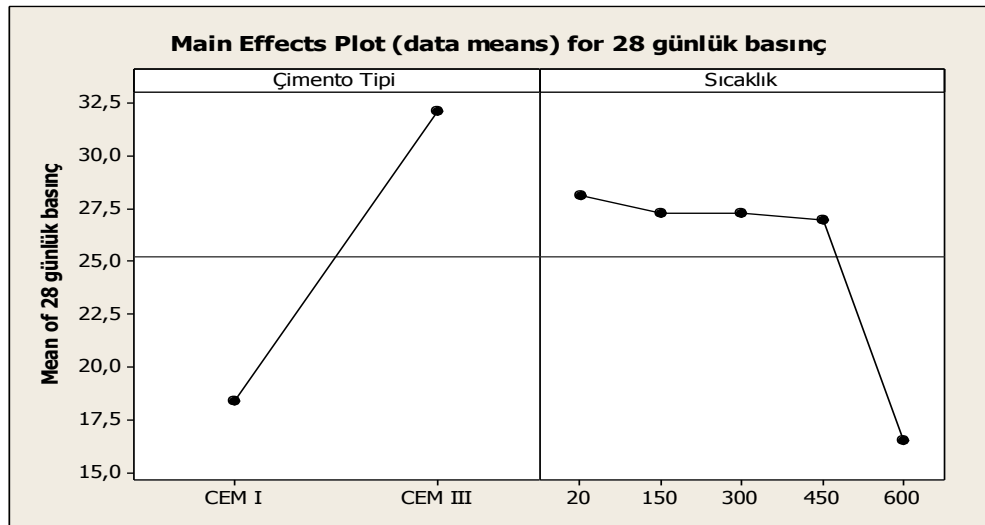
5.4. Yirmi Sekiz Günlük Suda Soğutma Uygulanmış Numunelerin Basınç Dayanımları

Yirmi sekiz gün kür uygulanan ve suda soğutulan numunelerin yapılan Anova analiziyle; basınç dayanımlarının, sıcaklık ve çimento tipine göre 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
Çimento Tipi	1	468.677	468.677	18.69	0.012
Sıcaklık	4	190.158	47.539	1.90	0.275
Hata	4	100.299	25.075	-	-
Toplam	9	759.134	-	-	-

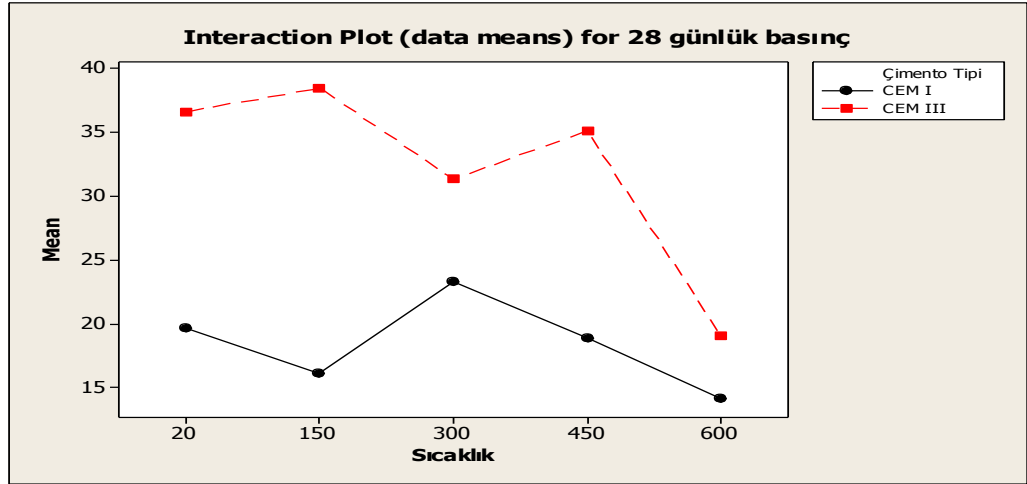
Çizelge 5.2'deki Anova tablosundan da görüldüğü üzere 28 günlük suda soğutulmuş numunelerin çimento tiplerinin değişimiyle bulunan basınç dayanımları ortalamaları arasında fark vardır ($P=0.012<0.05$). 28 günlük suda soğutulmuş numunelerin basınç dayanımları sıcaklığa göre karşılaştırıldığında da ortalamalar arasında önemli farklılıklar olmadığı görülmektedir ($P=0.275>0.05$).



Şekil 5.7. Yirmi sekiz günlük suda soğutulmuş numunelerin ana etki büyüklükleri grafiği.

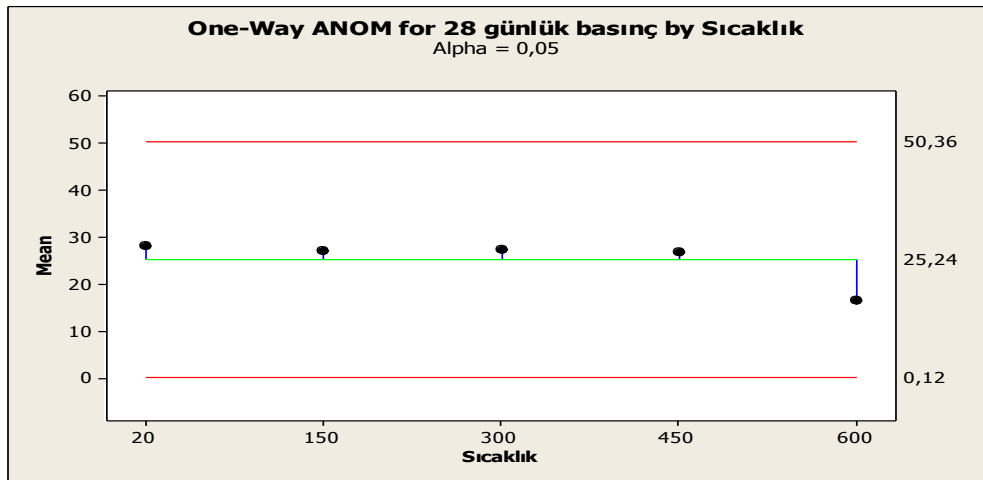
Ana etki büyüklükleri grafiğinden görüldüğü üzere suda soğumanın etkisiyle CEM I ile üretilen betonlarda dayanımlar çok az düşmüş, CEM III ile üretilenlerde ise çok az miktarda artmıştır. Basınç dayanımları sıcaklığa göre değerlendirildiğinde ise; 450 °C'nin üstündeki sıcaklıklarda dayanım düşüşü göze çarpmaktadır. 28 günlük

havada ve suda soğutulan numunelerde basınç dayanımı açısından fazla bir fark olmadığı görülmüştür.



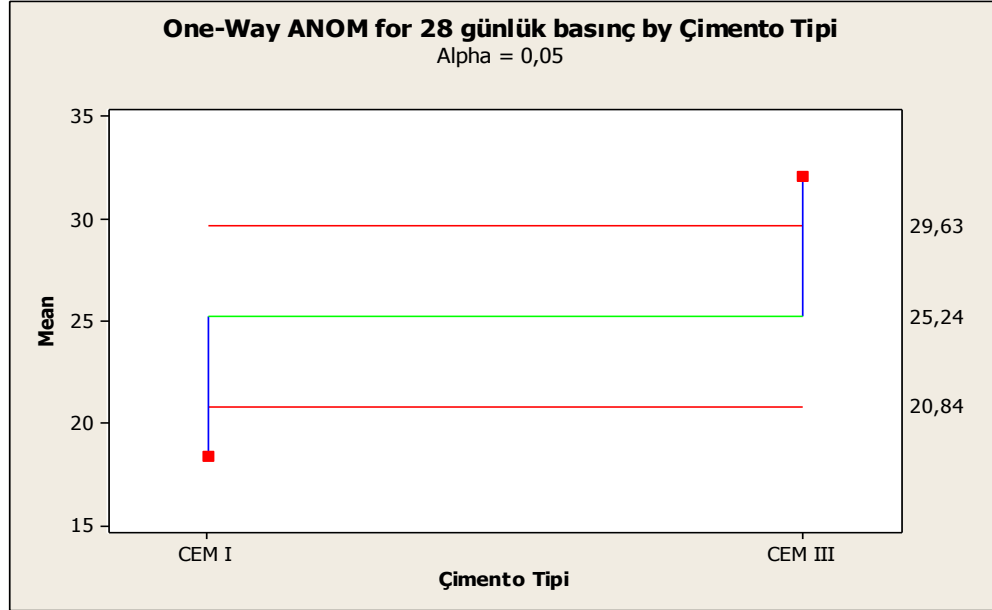
Şekil 5.8. Yirmi sekiz günlük suda soğutulmuş numunelerin etkileşimler grafiği.

Suda soğutulan gruplarda da; havada soğutulan gruplarda olduğu gibi CEM III grubunda, CEM I grubuna göre daha iyi dayanımlar elde edilmiştir. Daha 300 °C'ye dahi ulaşılmadan dayanımlarda iniş çıkışlar gözlenmiştir. Ancak; ani düşüşler 450 °C üstünde burada da göze çarpmaktadır (Şekil 5.8).



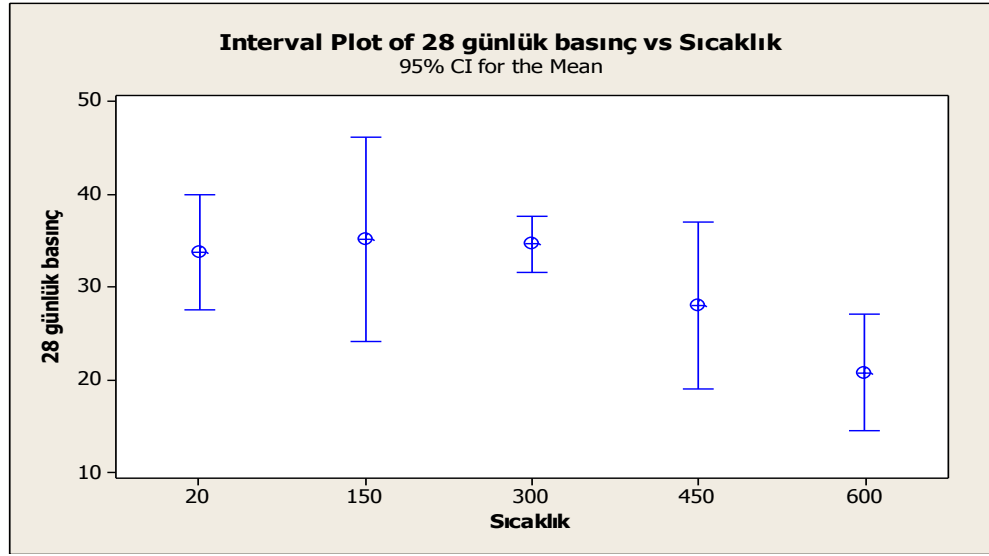
Şekil 5.9. Yirmi sekiz günlük suda soğutulmuş numunelerin basınç dayanımı ve sıcaklık ilişkisi için tek yönlü Anova analizi grafiği.

Yirmi sekiz günlük suda soğutma uygulanmış numuneler için basınç ve sıcaklık arasında tek yönlü Anova analizi yaptığımızda; havada soğutma uygulanmış numunelerde elde edilen değerlere benzer değerler görülmektedir. 20, 150, 300 ve 450 °C’de genel ortalamanın altında bir değer gözlenmektedir (Şekil 5.9).



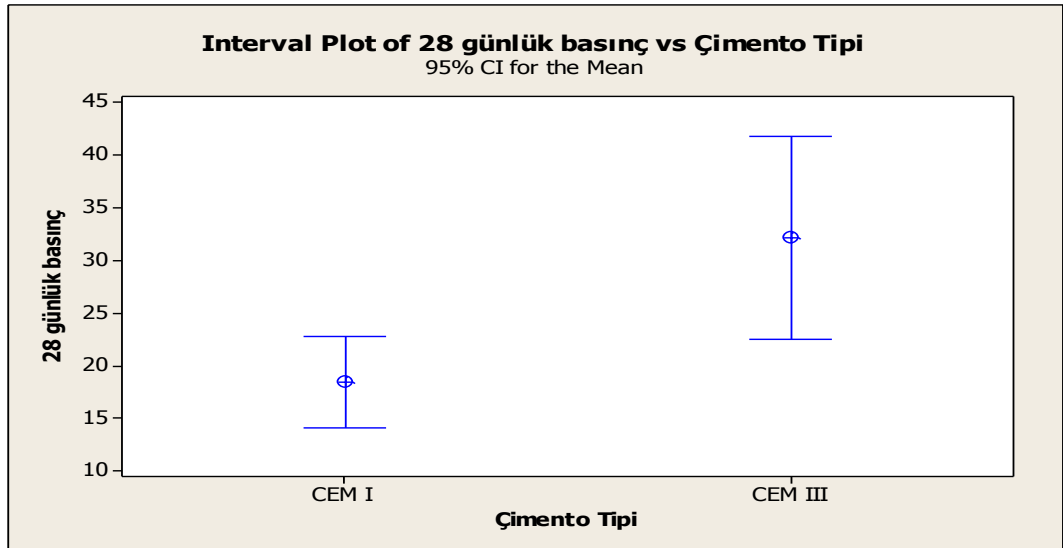
Şekil 5.10. Yirmi sekiz günlük suda soğutulmuş numunelerin basınç dayanımı ve çimento tipi ilişkisi için tek yönlü Anova analizi grafiği.

Yirmi sekiz günlük suda soğutulan numunelerin basınç dayanımları ile çimento tipleri arasında tek yönlü Anova analizi yapıldığında; havada ve soğutulan numune değerlerine benzer şekilde her iki çimento tipi için 28 günlük basınç dayanımlarının birbirinden çok farklı olduğu görülmektedir. CEM I tipi çimento, alt karar limitin altında bir değer gösterirken; CEM III tipi çimento ise üst karar limitin üstünde bir dayanım göstermiştir (Şekil 5.10).



Şekil 5.11. 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 5.11) en geniş değişim aralıklarına 150 °C ve 450 °C’de ulaşıldığı görülmüştür.



Şekil 5.12. Yirmi sekiz günlük suda soğutulmuş numunelerin basınç dayanımı ve çimento tipi arasındaki aralık grafiği.

Suda soğutulan numunelerin 28 günlük basınç ve çimento tipi aralık grafiği de havada soğutulan numunelerin grafiğine benzerlik göstermektedir. Çimento tiplerinin aralık gruplarının birbirlerine göre oldukça farklılık gösterdiği görülmektedir.

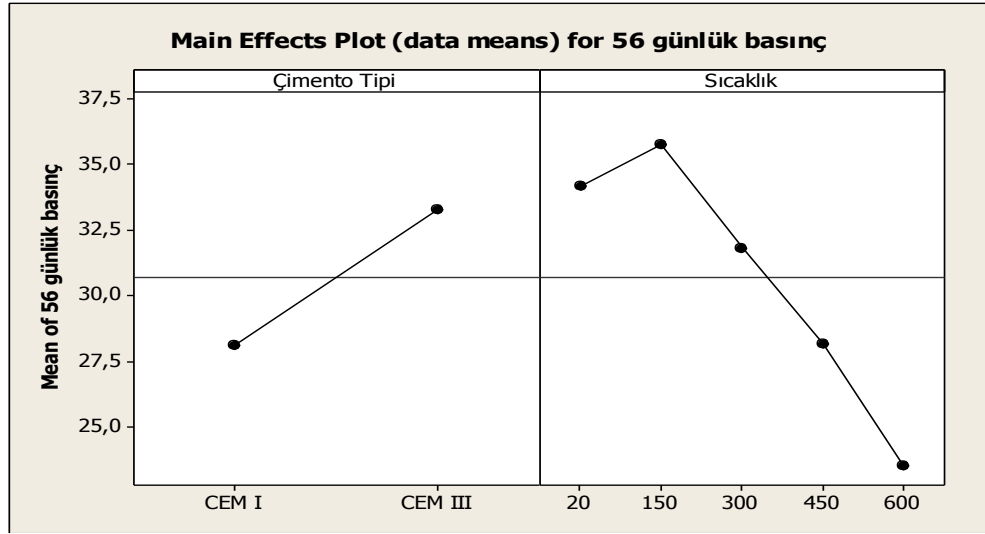
5.5. Elli Altı Günlük Havada Soğutma Uygulanmış Numunelerin Basınç Dayanımları

Elli altı gün kür uygulanan ve havada soğutulan numunelerin yapılan Anova analiziyle; basınç dayanımlarının, sıcaklık ve çimento tipine göre değerlendirilmesi sonucu elde edilen Anova tablosu Çizelge 5.3'te verilmiştir.

Çizelge 5.3. Elli altı günlük havada soğutulmuş numunelerin Anova tablosu

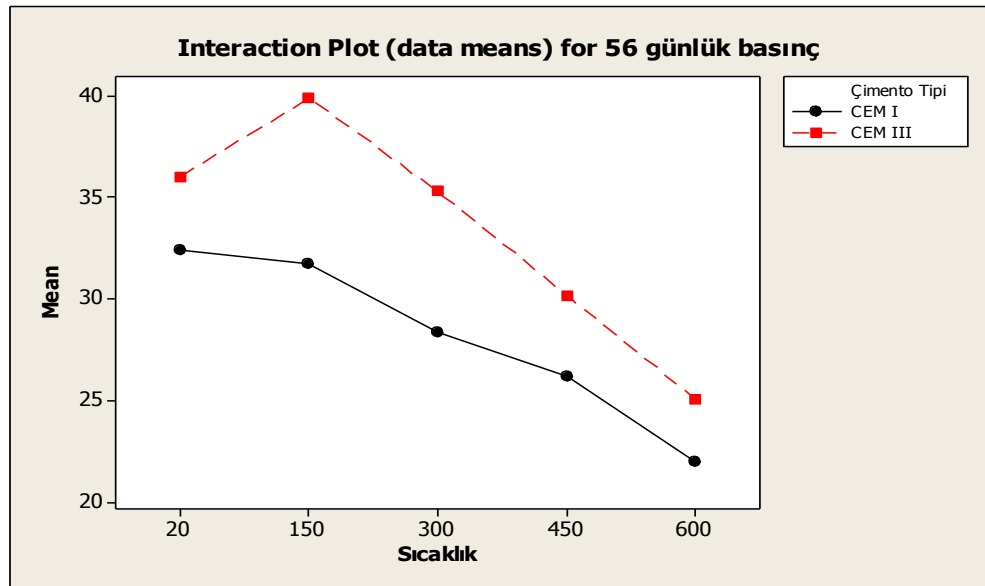
Kaynak	DF	SS	MS	F	P
Çimento Tipi	1	66.358	66.358	26.06	0.007
Sıcaklık	4	194.452	48.613	19.09	0.007
Hata	4	10.184	2.546	-	-
Toplam	9	270.994	-	-	-

Çizelge 5.3'te verilen Anova tablosundaki değerler göstermektedir ki çimento tiplerine göre, 56 günlük basınç dayanımı ortalamaları arasında farklılıklar gözlenmiştir ($P=0.007<0.05$). Sıcaklıklar ve 56 günlük basınç dayanımlarının ortalamalarını kıyasladığımızda da ($P=0.007<0.05$) ortalamalar arasında farklılıklar olduğu görülmüştür.



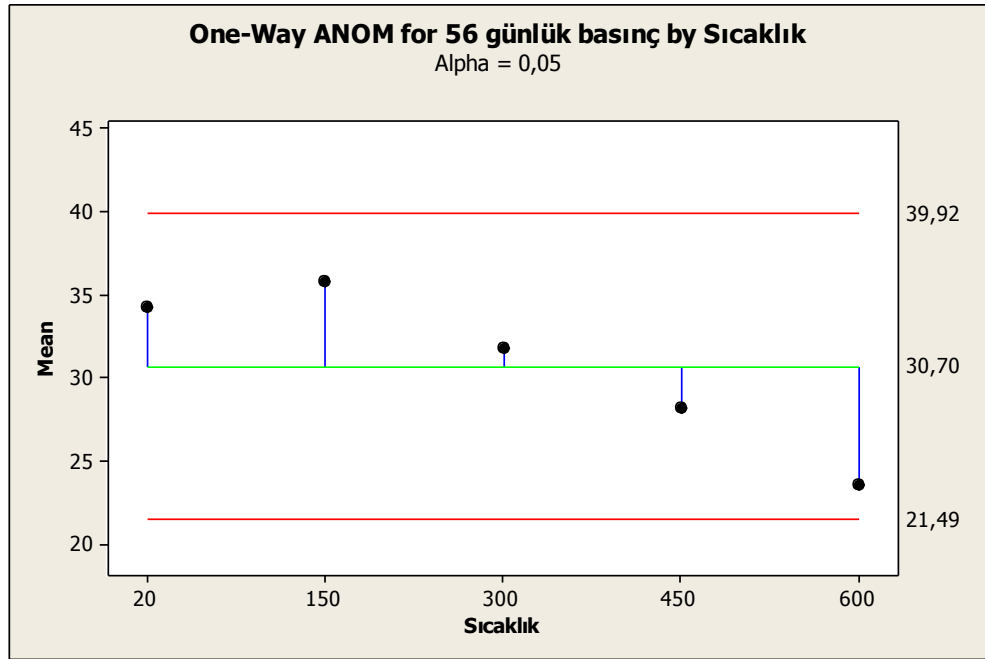
Şekil 5.13. Elli altı günlük havada soğutulmuş numunelerin ana etki büyüklükleri grafiği.

Ana etki büyüklükleri grafiğinden görüldüğü üzere CEM I tipi çimento 28. ve 56. günler arasında CEM III'e göre daha fazla dayanım kazanmıştır. Basınç dayanımları sıcaklığa karşı kıyaslandığında, ani dayanım düşmesinin meydana geldiği kırılma noktasının 300 °C ile 450 °C arasında olduğu görülmüştür (Şekil 5.13).



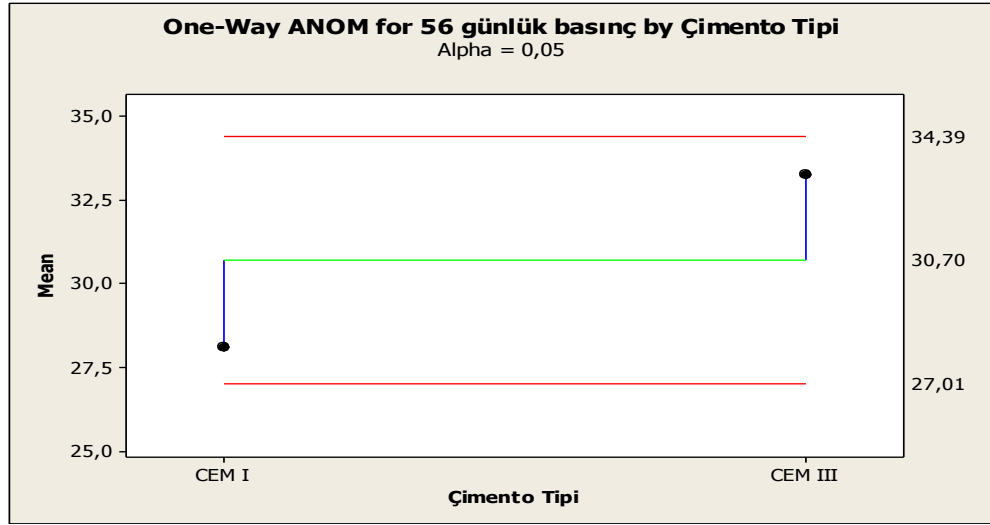
Şekil 5.14. Elli altı günlük havada soğutulmuş numunelerin etkileşimler grafiği.

Elli altı günlük havada soğutulmuş numunelerin etkileşimler grafiğinde, ana etkiler grafiğinden de görüldüğü gibi CEM III’de, CEM I’e göre daha yüksek dayanımlara ulaşılmıştır. Ayrıca; 28 ve 56 günlük havada soğutulmuş numunelerin basınç dayanım değerleri karşılaştırıldığında; en yüksek dayanım değerlerine 56 günlük CEM III numunesinde ulaşıldığı görülmektedir.



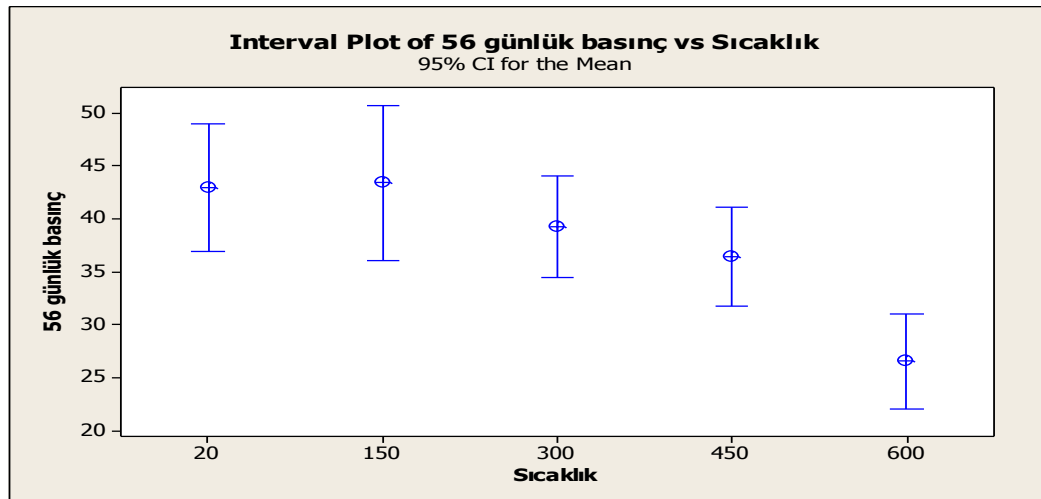
Şekil 5.15. Elli altı günlük havada soğutulmuş numunelerin basınç dayanımı ve sıcaklık ilişkisi için tek yönlü Anova analizi grafiği.

Elli altı günlük havada soğutulmuş numuneler için basınç dayanımı ile sıcaklık ilişkisi tek yönlü Anova analizi ile incelendiğinde; 450 °C’de dayanımın alt karar limiti çizgisine doğru düştüğü görülmektedir. Yani kırılma noktasının 450 °C’nin üzerinde olduğu sonucuna ulaşılmıştır (Şekil 5.15).



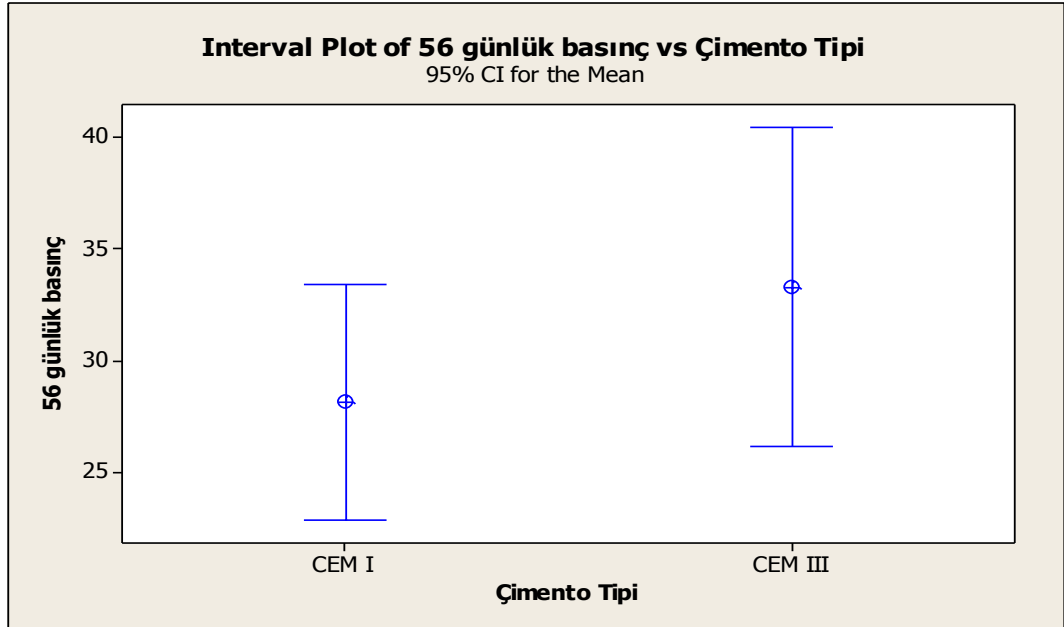
Şekil 5.16. Elli altı günlük havada soğutulmuş numunelerin basınç dayanımı ve çimento tipi ilişkisi için tek yönlü Anova analizi grafiği.

Tek yönlü Anova analizi, çimento tipi ve basınç arasında uygulandığında tüm çimento tiplerinin dayanımları karar limitleri içerisinde yer almaktadır. Ayrıca; her iki çimento tipi içinde 28 günlüklere göre 56 günlüklerdeki dayanım artışının daha belirgin olduğu görülmektedir (Şekil 5.16).



Şekil 5.17. Elli altı günlük havada soğutulmuş numunelerin basınç dayanımı ve sıcaklık arasındaki aralık grafiği.

Sıcaklık değişkenine göre çizilen 56 günlük basınç değerlerinin aralık grafiğinde aralıkların 28 günlüğe göre düştüğü görülmektedir (Şekil 5.17).



Şekil 5.18. Elli altı günlük havada soğutulmuş numunelerin basınç dayanımı ve çimento tipi arasındaki aralık grafiği.

Çimento tiplerini esas alan aralık grafiğinde ise; 28 günlük havada soğutulan numunelerin grafiğine benzer bir grafik görülmektedir. Bu grafikte de en geniş aralık yine CEM III tipinde elde edilmiştir (Şekil 5.18).

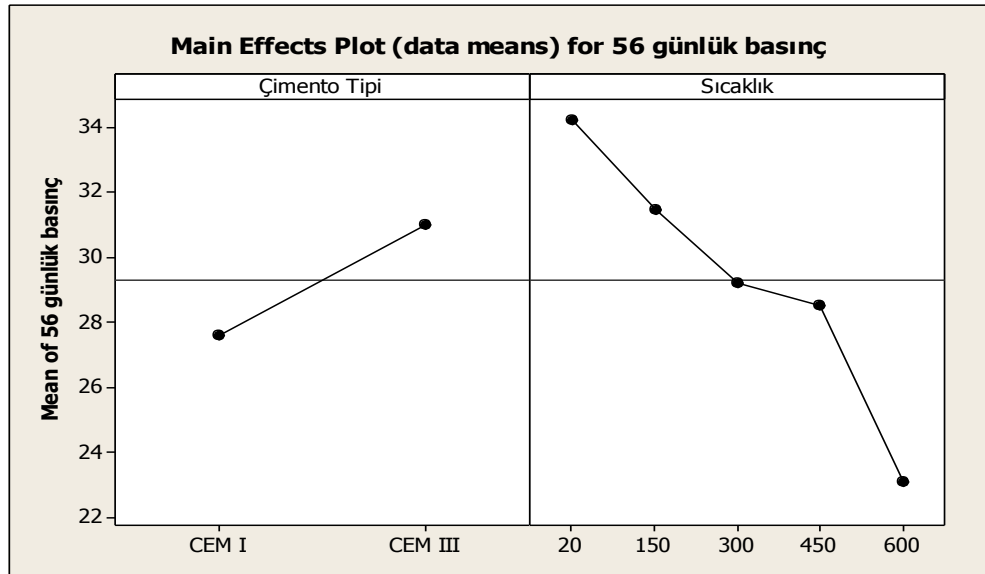
5.6. Elli Altı Günlük Suda Soğutma Uygulanmış Numunelerin Basınç Dayanımları

Elli altı gün kür uygulanan ve suda soğutulan numunelerin yapılan Anova analiziyle; basınç dayanımlarının, sıcaklık ve çimento tipine göre 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
Çimento Tipi	1	28.764	28.764	3.80	0.123
Sıcaklık	4	134.959	33.740	4.45	0.089
Hata	4	30.311	7.578	-	-
Toplam	9	194.034	-	-	-

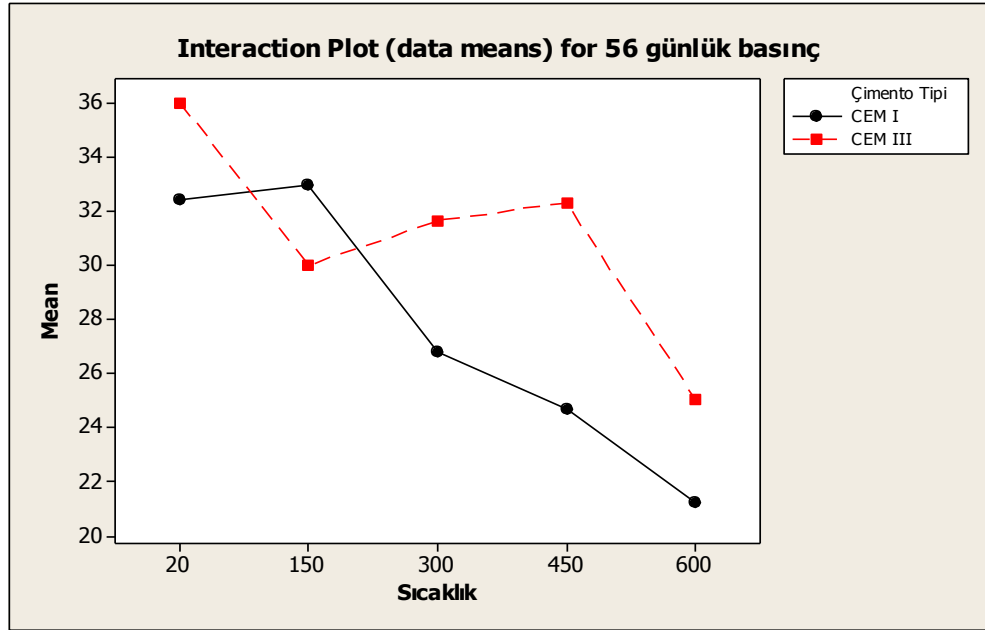
Çizelge 5.4'te verilen Anova tablosu incelendiğinde; çimento tipine göre ($P=0.123>0.05$) ortalamalar arasında farklılıklar olmadığı kabul edilmektedir. Sıcaklık değişkenine göre de ($P=0.089>0.05$) ortalamalar arasında büyük farklılıklar olmadığı görülmektedir.



Şekil 5.19. Elli altı günlük suda soğutulmuş numunelerin ana etki büyüklükleri grafiği.

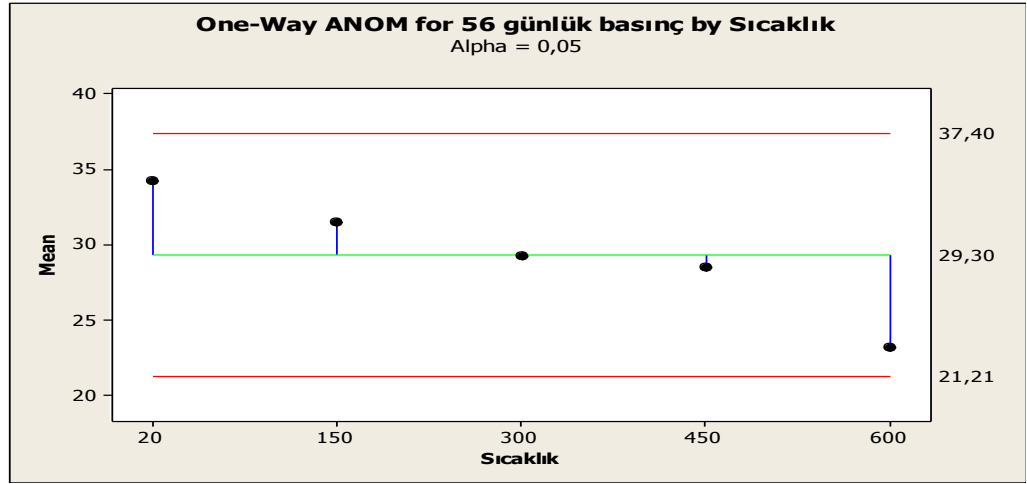
Elli altı günlük suda soğutulan numunelerin basınç dayanımları, çimento tipi ve sıcaklık değerlerine bağlı olarak çift yönlü Anova analizi yapıldığında elde edilen ana etki büyüklükleri grafiği Şekil 5.19'da görülmektedir. 56 günlük suda soğutulmuş CEM I'in dayanımı, 28 günlük suda soğutulmuş CEM I'in dayanımına göre artış

göstermektedir. Sıcaklığa karşı basınç dayanımları değerlendirildiğinde kırılma noktası 300 °C'dedir. 28 günlük suda soğutulmuş numunelerde, kırılma sıcaklığı 450 °C üstü iken; 56 günlük suda soğutulmuş numunelerde kırılma sıcaklığının 600 °C ve üstü olduğu görülmektedir.



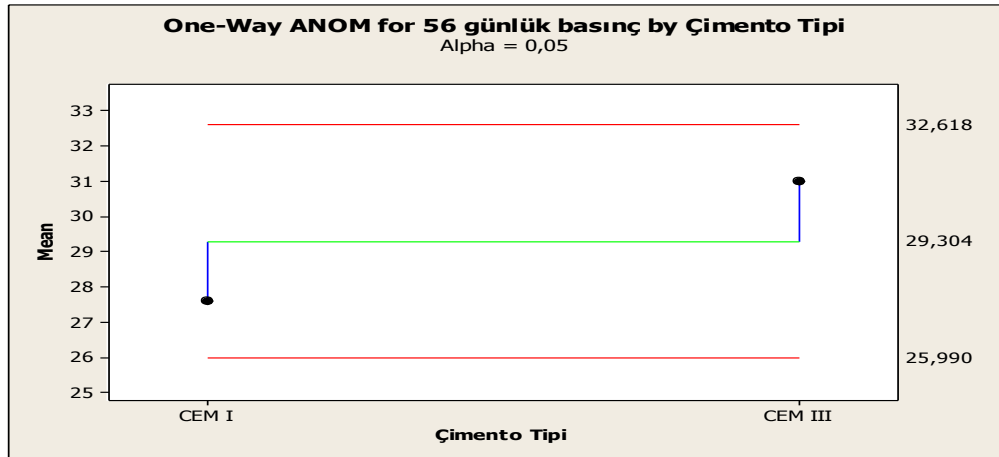
Şekil 5.20. Elli altı günlük suda soğutulmuş numunelerin etkileşimler grafiği.

Yirmi sekiz günlük suda soğutulan numunelerin dayanımları ani iniş çıkışlar göstermekteydi. Elli altı günlük numunelerin grafiği de buna benzer bir görünüm sergilemektedir. Elli altı günlük suda soğutulan numunelerde; CEM I çimentosunun dayanımının 150 °C'de CEM III'ün dayanımından daha fazla olduğu görülmektedir. Ancak; diğer sıcaklıklarda, CEM III çimentosunun üstünlüğü açık bir şekilde görülmektedir.



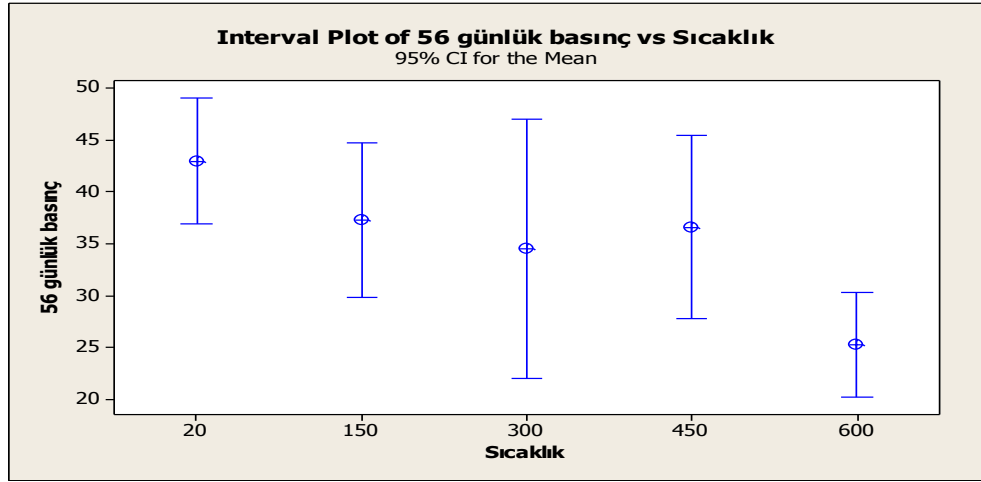
Şekil 5.21. Elli altı günlük suda soğutulmuş numunelerin basınç dayanımı ve sıcaklık ilişkisi için tek yönlü Anova analizi grafiği.

Elli altı günlük suda soğutulmuş numunelerden elde edilen basınç dayanımları sıcaklıkla tek yönlü olarak analiz edildiğinde, dikkat çeken en önemli husus; 300°C'deki dayanım ortalamasının, genel ortalamanın altına sarkmasıdır (Şekil 5.21).



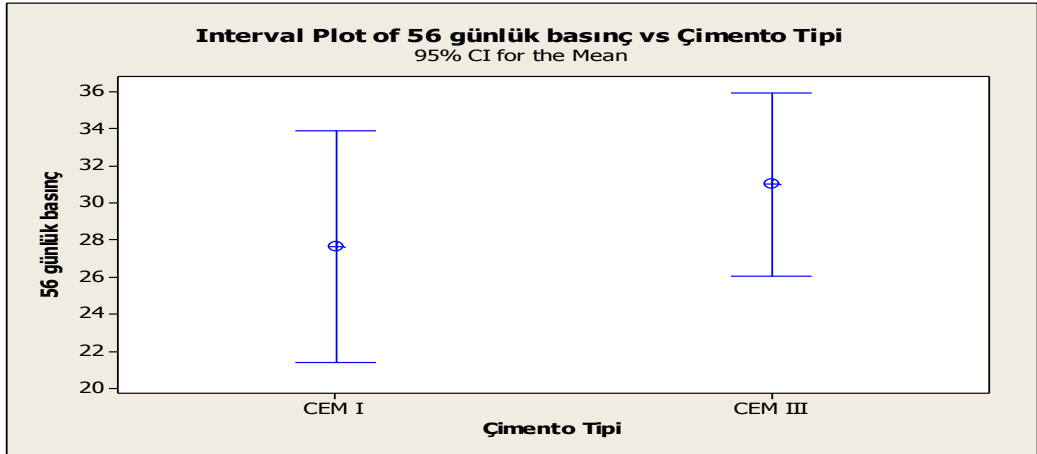
Şekil 5.22. Elli altı günlük suda soğutulmuş numunelerin basınç dayanımı ve çimento tipi ilişkisi için tek yönlü Anova analizi grafiği.

Elli altı günlük suda soğutulan numunelerin basınç dayanımları ile çimento tipleri arasında tek yönlü Anova analizi yapıldığında değerlerin karar limitleri arasında kaldığı görülmektedir (Şekil 5.22).



Şekil 5.23. Elli altı günlük suda soğutulmuş numunelerin basınç dayanımı ve sıcaklık arasındaki aralık grafiği.

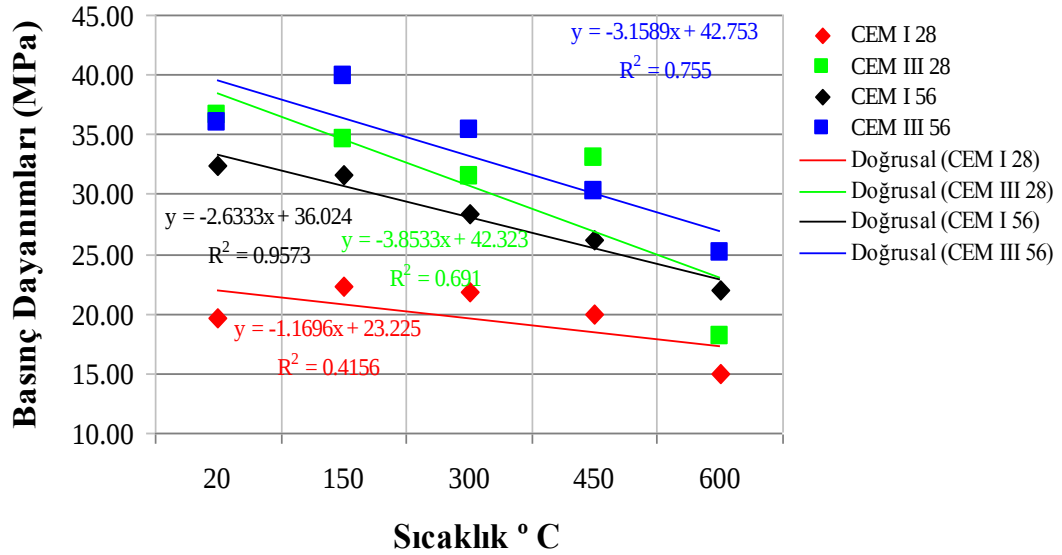
Elli altı günlük suda soğutulmuş numunelerin basınç dayanımları ile sıcaklıklar arasında aralık grafiğine baktığımızda, en geniş değişim aralığının 450 °C’de olduğu görülmektedir (Şekil 5.23).



Şekil 5.24. 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 I tipi çimento ile üretilen numunelerde elde edilmiştir (Şekil 5.24).

Şekil 5.25'te CEM I ve CEM III çimentosu ile üretilen, 28 ve 56 günlük kür sürelerinin ardından yüksek sıcaklığa maruz bırakıldıktan sonra havada soğutma uygulanmış numunelere ait sıcaklık ile basınç dayanımı arasındaki doğrusal ilişkiler verilmiştir.



Şekil 5.25. Yirmi sekiz ve elli altı gün kür uygulanan ve havada soğutulan numuneler için sıcaklık-basınç dayanımı ilişkisi.

Grafiğe bakıldığında; CEM III ile üretilen, gerek 28 gerekse 56 gün kür uygulanan numunelerin basınç dayanımlarının, CEM I ile üretilen numunelerin basınç dayanımlarına göre daha yüksek olduğu görülmektedir.

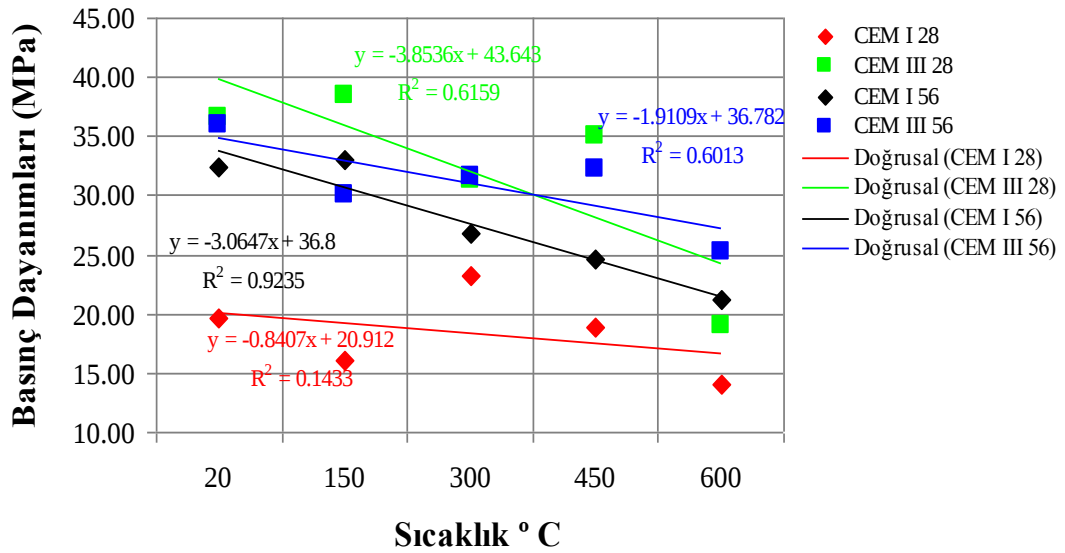
Her iki çimento tipinde de 56 gün kür uygulanan numunelerin basınç dayanımları, 28 günlüklere göre daha yüksektir. Her iki kür süresi de dikkate alındığında; sıcaklık artışına paralel olarak, özellikle 300 °C'den sonra CEM I ve CEM III çimentosu ile üretilen betonların basınç dayanımları düşüş göstermektedir. Her iki çimento tipi ile üretilen betonların basınç dayanımlarındaki kayıplar 600 °C'de % 50'leri aşmaktadır.

En yüksek basınç dayanımı 40 MPa ile 56 gün kür uygulanan ve 150 °C sıcaklığa maruz bırakılmış CEM III numunesinde elde edilirken, en düşük basınç

dayanımı 15 MPa ile 28 gün kür uygulanan ve 600 °C sıcaklığa maruz bırakılmış CEM I numunesinde görülmektedir.

Sonuç olarak; 56 gün kür uygulanan ve CEM III çimentosu ile üretilen numunelerde daha yüksek basınç dayanımlarına ulaşılmıştır.

Şekil 5.26'da CEM I ve CEM III çimentosu ile üretilen, 28 ve 56 günlük kür sürelerinin ardından yüksek sıcaklığa maruz bırakıldıktan sonra suda soğutma uygulanmış numunelere ait sıcaklık ile basınç dayanımı arasındaki doğrusal ilişkiler verilmiştir.



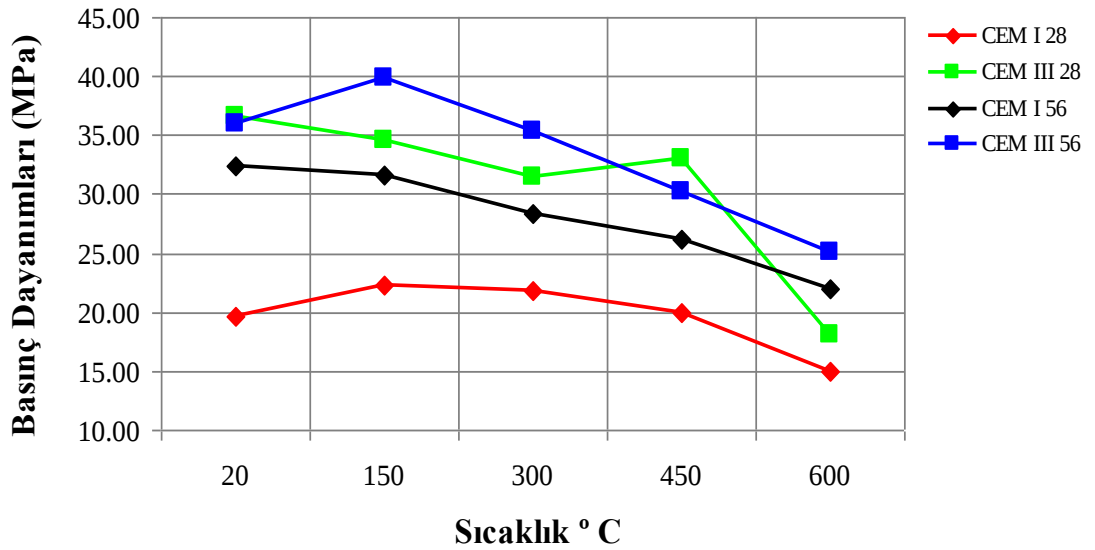
Şekil 5.26. Yirmi sekiz ve elli altı gün kür uygulanan ve suda soğutulan numuneler için sıcaklık-basınç dayanımı ilişkisi.

Genel olarak; havada soğutulan numunelerin grafiklerine paralel grafikler suda soğutulan numunelerin grafiklerinde de görülmektedir. Grafiğe bakıldığında, CEM III ile üretilen, gerek 28 gerekse 56 gün kür uygulanan numunelerin basınç dayanımlarının, CEM I ile üretilen numunelerin basınç dayanımlarına göre daha yüksek olduğu görülmektedir.

Sıcaklık artışına paralel olarak basınç dayanımı düşüş göstermektedir. Her iki kür süresi de dikkate alındığında; özellikle 450 ve 600 °C'deki basınç dayanımındaki düşüşler % 50'leri aşmaktadır. En yüksek basınç dayanımı 38 MPa ile 28 gün kür uygulanan ve 150 °C sıcaklığa maruz bırakılmış CEM III numunesinde elde edilirken, en düşük basınç dayanımı 21 MPa ile 28 gün kür uygulanan ve 600 °C sıcaklığa maruz bırakılmış CEM I numunesinde görülmektedir.

Sonuç olarak; yüksek sıcaklıklar sonrası havada soğutma uygulanan beton numunelerinin basınç dayanımları genel olarak suda soğutma uygulanan numunelerin basınç dayanımlarına göre daha yüksek çıkmaktadır. Bu sonuç; suda soğutmanın betonların basınç dayanımlarını olumsuz yönde etkilediğini göstermektedir. Soğutma şekline bakılmaksızın CEM III ile üretilen betonların, CEM I ile üretilen betonlara göre, 56 günlük kür uygulanan numunelerde daha yüksek basınç dayanımı değerleri verdiği görülmektedir.

Şekil 5.27'de CEM I ve CEM III çimentosu ile üretilen, 28 ve 56 günlük kür sürelerinin ardından yüksek sıcaklığa maruz bırakıldıktan sonra havada soğutma uygulanmış numunelere ait basınç değerleri birlikte verilmiştir.

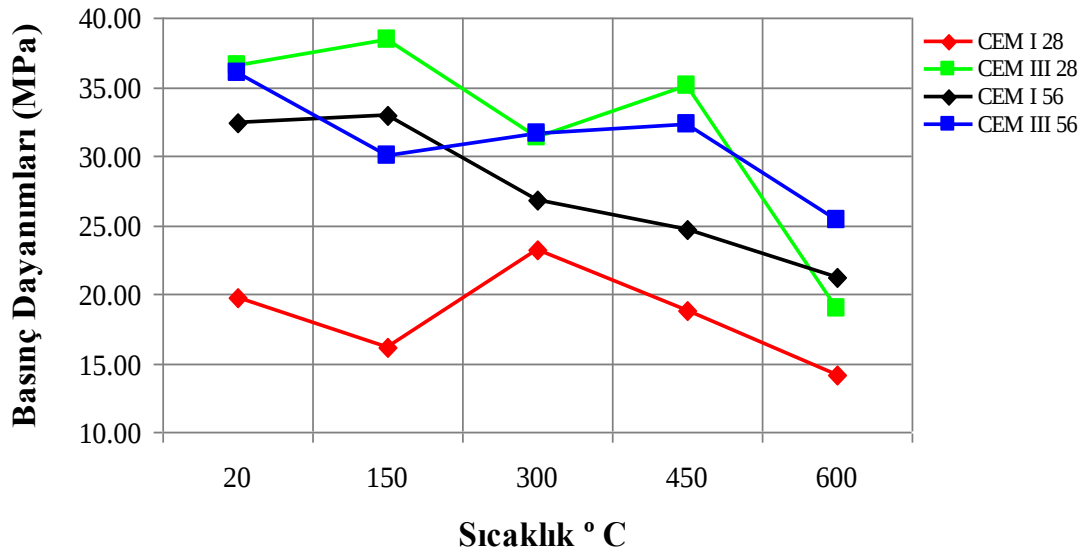


Şekil 5.27. Yirmi sekiz ve elli altı gün kür uygulanan ve havada soğutulan numuneler için sıcaklık-basınç dayanımı ilişkisi.

En yüksek basınç dayanımı 40 MPa ile 56 gün kür uygulanan ve 150 °C sıcaklığa maruz bırakılmış CEM III numunesinde elde edilirken, en düşük basınç dayanımı 15 MPa ile 28 gün kür uygulanan ve 600 °C sıcaklığa maruz bırakılmış CEM I numunesinde görülmektedir.

Grafiğe bakıldığında, CEM III ile üretilen betonların, gerek 28 gerekse 56 gün kür uygulanan numunelerin basınç dayanımlarının, CEM I ile üretilen numunelerin basınç dayanımlarına göre daha yüksek olduğu görülmektedir. Her iki çimento tipinde de 56 günlük kür uygulanan numunelerin basınç dayanımları, 28 günlüklere göre daha yüksektir. Her iki kür süresi dikkate alındığında ise; basınç dayanımlarındaki düşüşün 300 °C'den sonra belirginleştiği görülmektedir. Her iki çimento tipi ile üretilen betonların basınç dayanımlarındaki kayıplar 600 °C'de % 50'leri aşmaktadır.

Sonuç olarak; 56 gün kür uygulanan ve CEM III çimentosu ile üretilen numunelerde daha yüksek basınç dayanımlarına ulaşılmıştır.



Şekil 5.28. Yirmi sekiz ve elli altı gün kür uygulanan ve suda soğutulan numuneler için sıcaklık-basınç dayanımı ilişkisi.

Şekil 5.28’de CEM I ve CEM III çimentosu ile üretilen, 28 ve 56 günlük kür sürelerinin ardından yüksek sıcaklığa maruz bırakıldıktan sonra suda soğutma uygulanmış numunelere ait basınç değerleri birlikte verilmiştir.

Genel olarak; havada soğutulan numunelerin grafiklerine paralel grafikler suda soğutulan numunelerin grafiklerinde de görülmektedir. Grafiğe bakıldığında, CEM III ile üretilen betonların, gerek 28 gerekse 56 gün kür uygulanan numunelerin basınç dayanımlarının, CEM I ile üretilen numunelerin basınç dayanımlarına göre daha yüksek olduğu görülmektedir.

Her iki çimento tipinde de 56 gün kür uygulanan numunelerin basınç dayanımları, 28 günlüklere göre daha yüksektir. Her iki çimento tipi ile üretilen betonların basınç dayanımlarındaki kayıplar 600 °C’de % 50’leri aşmaktadır. En yüksek basınç dayanımı 40 MPa ile 56 gün kür uygulanan ve 150 °C sıcaklığa maruz bırakılmış CEM III numunesinde elde edilirken, en düşük basınç dayanımı 15 MPa ile 28 gün kür uygulanan ve 600 °C sıcaklığa maruz bırakılmış CEM I numunesinde görülmektedir.

Sonuç olarak; yüksek sıcaklıklar sonrası havada soğutma uygulanan beton numunelerinin basınç dayanımları genel olarak suda soğutma uygulanan numunelerin basınç dayanımlarına göre daha yüksek çıkmaktadır. Bu sonuç; suda soğutmanın betonların basınç dayanımlarını olumsuz yönde etkilediğini göstermektedir.

Soğutma şekline bakılmaksızın CEM III ile üretilen betonların, CEM I ile üretilen betonlara göre, 56 günlük kür uygulanan numunelerde daha yüksek basınç dayanımı değerleri verdiği görülmektedir.

BÖLÜM 6

SONUÇLAR

Yüksek sıcaklığın etkisinde kalan betonun fiziksel ve mekanik özelliklerinin araştırıldığı bu çalışmada; farklı çimento tipleri kullanılarak üretilen beton numunelere, 28 ve 56 günlük olmak üzere iki farklı süre kür uygulandıktan sonra yüksek sıcaklığa maruz bırakılmış, havada ve suda olmak üzere iki ayrı soğutma uygulanmış, fiziksel ve mekanik özelliklerindeki değişimlerin belirlenmesi için kontrol deneyleri yapılmıştır. Deneysel sonuçlar istatistiksel olarak incelenmiş, çalışmalardan elde edilen sonuçlar aşağıda açıklanmıştır.

- Yüksek sıcaklık etkisinden sonra; suda soğutmanın zararlı etkisi tüm gruplarda, havada soğutmaya göre daha fazla olmuştur.
- Yüksek sıcaklık etkisinde kalan betonların birim ağırlıklarında önemli bir değişiklik olmamıştır. Ancak; birim ağırlıklar, 300 °C'den sonra tüm numunelerde (havada ve suda soğutma uygulanmış, 28 ve 56 günlük) % 10 civarında azalmıştır.
- Hacimce su emme oranları; tüm numunelerde, özellikle 300 °C ve daha yüksek sıcaklıklarda ani artışlar göstermiştir. Havada soğutma uygulanan 28 ve 56 günlük CEM III numunelerinde bu artışlar % 100'ün üzerindedir ve daha belirgindir.
- Tüm numunelerin ultrases geçiş hızı değerlerinde 300 °C'den itibaren bir düşüş gözlemlenmiştir. Ancak; 28 ve 56 günlük CEM I numunelerinin ultrases geçiş hızı değerleri CEM III numunelerine göre daha fazladır. 600 °C'de ise; tüm gruplardaki kayıplar birbirine yakındır. 600 °C'de ultrases geçiş hızındaki kayıplar her iki çimento tipi ile üretilen

numunelerde yaklaşık % 50-55 civarındadır. Sıcaklık artışıyla ultrases geçiş hızı değerlerinin düşüş göstermesinin nedeni; beton numunelerinin artan sıcaklıkla yapılarındaki suyun buharlaşması sonucu, ilave boşlukların ve gözenekliliğin artmasıdır.

- Yüzey sertliği dayanımlarında; en yüksek dayanım değerine 300 °C sıcaklık uygulanmış havada soğutulan CEM I numunesinde ulaşılmıştır. 300 °C'den sonra tüm numunelerin yüzey sertliği dayanımlarında düşüşler gözlenmiştir. CEM I numunelerinin dayanım değerleri CEM III'lere göre daha yüksektir. CEM III ile üretilen ve 56 gün kür uygulanan numunelerde 600 °C'deki kayıplar % 20-25 iken; CEM I ile üretilenlerde yaklaşık % 10 civarındadır. Ancak; bu yüzey sertliği dayanım değerleri çok güvenilir değildir. Çünkü; yüzey sertliği yüzeye yakın beton kalitesi hakkında fikir vermektedir. Dolayısıyla; yalnızca yüzey sertliği dayanım değerine bakılarak yapılacak bir dayanım değerlendirmesi yanıltıcı olacaktır.
- Yarmada çekme dayanımları; genel olarak, tüm numunelerde sıcaklık artışıyla düşmüştür. Ancak; 28 günlük CEM I numunelerinde % 30 civarında bir artış gerçekleşmiştir. Genel olarak tüm numunelerde 56 günlük dayanımlar 28 günlük dayanımlardan daha fazladır.
- Yirmi sekiz günlük numunelerde en yüksek basınç dayanım değerlerine, CEM I numunelerinde 150 ve 300 °C'de ulaşılırken; 56 günlük numunelerde ise; en yüksek basınç dayanım değerlerine CEM III numunelerinde 150 °C'de ulaşılmıştır. Genel olarak; sıcaklık artışı ile basınç dayanımları azalmıştır. 28 günlük havada soğutulmuş CEM I numunelerinin basınç dayanım değerleri CEM III'lere göre daha fazla iken; 56 günlük havada soğutulmuş CEM III numunelerinin basınç dayanımları, CEM I'lere göre daha fazladır. 600 °C'de 28 günlük numunelerde dayanım kayıpları % 25-30 iken, 56 günlüklerde kayıplar % 30-35'e ulaşmaktadır. CEM III numunelerindeki kayıplar

ise; 28 günlüklerde % 55 iken, 56 günlüklerde basınç dayanımı artış göstermektedir ve basınç dayanımı % 25-30 azalmaktadır. Kür süresi uzadıkça; CEM III numunelerinde daha yüksek basınç dayanım değerlerine ulaşılmıştır.

- Soğutma türü, yüksek sıcaklığa maruz kalmış tüm numuneleri direk 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.
- Betonların mekanik özelliklerindeki değişim, bazı farklılıklar olsa da sıcaklık artışı ile dayanım azalması şeklinde görülmüştür.
- Deneysel çalışma sonucu elde edilen verilerden yararlanılarak, belirlenen bazı özellikler arasındaki ilişkiler istatistiki olarak değerlendirilmiştir. İstatistiksel analiz sonucunda; 28 ve 56 günlük kür süreleri ve her iki soğutma türü de dikkate alındığında en iyi dayanım değerlerine CEM III çimentosu ile üretilen numunelerde ulaşıldığı görülmektedir.

CEM I ve CEM III çimentosu kullanılarak üretilen betonların, yüksek sıcaklıklar altındaki fiziksel ve mekanik davranışlarının incelendiği bu çalışmada; 28 ve 56 günlük iki farklı kür süresi, havada ve suda soğutma olmak üzere iki farklı soğutma şekli uygulanmıştır. Soğutma türü açısından havada soğutmanın her iki çimento tipi içinde daha iyi sonuçlar verdiği görülmüştür. Elde edilen sonuçlar doğrultusunda; yüksek sıcaklığa maruz kalacağı düşünülen yapılarda CEM III tipi çimentonun kullanılması önerilmektedir.

KAYNAKLAR DİZİNİ

- 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.
- 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, Microstructure and moisture, 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.
- 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.
- 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.
- British Standards Institution (BSI), 1970, Methods of testing hardened concrete for other than strength, BS 1881, Part 5, London.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- 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.
- Cioni P., Croce P. ve Salvatore W., (2001), "Assessing Fire Damage to R.C. Elements", *Fire Safety Journal*, sayı 36, sayfa 181-199.
- Cülfik, M.S., 2001, Deterioration of bond between cement paste and aggregate at high temperatures PhD. thesis, Boğaziçi University, 175 p.
- 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 oC (1292 F), *ACI Materials Journal*, 8, 2, 160-166.
- Erdoğan, T.Y., 2003, Beton, ODTÜ Geliştirme Vakfı Yayını, Ankara, 741 s.
- 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.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Haksever A., 1991, Yangın Odalarının teorik-nümerik yangın analizleri için modelleştirilmesi, 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., 2003, Fire and Assessment, International Centre for Mechanical Sciences, Course on Effect of Heat on Concrete, Udine/Italy.
- 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.
- Lea, F.C. and Stradling, R., 1922, The resistance to fire of concrete and reinforced concrete, Engineering, 114, 2959, 342-344, 380-382
- Li, G.H., Zheng, S.O. and Yang, Y.K, (1993a), Experimental research on the properties of gravel concrete after high temperature, Concrete, 16-17.
- Li, W. and Guo, Z.H., (1993b), Experimental research on the strength and deformation properties on concrete under high temperature, Journal of Building Structure, 14, 1, 8-16.
- Li M., Qian C. Ve Sun W., (2004), Mechanical properties of high-strength concrete after fire, Cement and Concrete Research, sayı 34, sayfa 1001-1005.
- Lin, W.M., Lin, T.D and Power, L.J., 1996, Microstructure of fire damaged concrete, ACI Materials Journal, 93, 3, 199-205.
- 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.
- Morsy, M.S., Galal, A.F. and Abo-El_enein, S.A., 1998, Effect of temperature on phase composition and microstructure of artificial pozzolona-cement pastes containing burnt kaolinite clay, Cement and Concrete Research, 28, 8, 1157-1163.
- Neville, A.M., 1978, Properties of concrete, Pitman Publishing Limited, 687p.
- Neville, A.M., 1992, Properties of concrete, Longman Scientific and Technical, NewYork.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Neville, A.M., 1995, Properties of concrete, Longman Scientific and Technical, New York.
- 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.
- Peng, G.F., Chan, S.Y.N, Song, Q.M. and Yi, Q.X., 2006a, Effect of high temperature on concrete: A literature review, Key Engineering Materials, 302-303, 138-149.
- Peng, G.F., Liu, Y.F., Bian, S.H. , Yi, Q.X. and Zhao, J., 2006b, Explosive spalling and residual mechanical properties of fiber-toughened high-performance concrete subjected to high temperatures, Cement and Concrete Research, 36, 4, 723-727
- 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.
- Riley, M.A., 1991, Possible new method for the assessment of fire damaged concrete, Magazine of Concrete Research, sayı 43, sayı 87-92.
- 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.
- Schrefler, 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.
- Schrefler B.A., Gawin D., Khoury G.A. ve Majorana C.E., (2003), “Physical, Mathematical & Numerical Modelling”, International Centre for Mechanical Sciences, Course on Effect of Heat on Concrete, Udine/Italy.
- Shneider, U., 1976, Behaviour of concrete under thermal steady state and none-steady state conditions, Fire and Materials, 1, 103-115.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- 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., 2006a, Beton teknolojisi, Uğur Ofset A.Ş., 570s.
- Topçu, İ.B., 2006b, Yapı malzemeleri ve beton, 502s.
- Topçu, İ.B. ve Demir, A., 2007, Yüksek sıcaklık uygulama süresinin harç özelliklerine etkisi, 7.
- Topçu, İ.B. and Demir, A., 2007, The effect of high temperature on mortars with different types of cement content, TÇMB, 3rd International Symposium 'Sustainability in Cement Concrete', 717-726.
- TS 3529, 1980, Beton agregaları, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS 706 EN 12629, 2003, Beton agregaları, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 12390-6, 2002, Beton-sertleşmiş beton deneyleri-Bölüm:6 Deney numunelerinin Yarmada çekme dayanımının tayini, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- 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.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- TS EN 12504-2, 2001, Beton-yapıdaki beton deneyleri-Bölüm 2; Tahribatsız deneyler-geri sıçrama sayısının tayini, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- Vodak F., Trtık K., Kapickova O., Hoskova S. ve Demo P., (2004), The effect of temperatures on strength-porosity relationship for concrete, Construction and Building Materials, sayı 18, sayfa 529-534.
- 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., Öztürk L.D. ve Kızılkant A.B., (2003), “Yüksek Sıcaklık Etkisinde Kalan Çimento Harcında Hasar Oranının Renk Ölçümü ile Araştırılması”, TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası 5. Ulusal Beton Kongresi, sayfa 461-470, İstanbul.
- 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.
- Zhang B., Bicanic N., Pearce C.J. ve Philips D.V., (2002), “Relations between Brittleness and Moisture Loss of Concrete Exposed to High Temperatures”, Cement and Concrete Research, sayı 32, sayfa 363-371.

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

EKLER

Ek 1. Çizelgeler

Ek 2. Yapılan Deneysel Çalışma Fotoğrafları

EK.1.
ÇİZELGELER

EK ÇİZELGELER

Çizelge Ek 1.1. Beton numunelerinin 28 günlük birim hacim ağırlıkları (gr/cm³)

Sıcaklık (°C)	CEM I		CEM III	
	H	S	H	S
20	2.31		2.30	
150	2.23	2.28	2.29	2.31
300	2.12	2.16	2.14	2.16
450	2.13	2.15	2.14	2.12
600	2.00	2.09	2.12	2.10

Çizelge Ek 1.2. Beton numunelerinin 56 günlük birim hacim ağırlıkları (gr/cm³)

Sıcaklık (°C)	CEM I		CEM III	
	H	S	H	S
20	2.35		2.40	
150	2.26	2.31	2.32	2.34
300	2.15	2.17	2.15	2.17
450	2.16	2.17	2.16	2.18
600	2.07	2.11	2.13	2.12

Çizelge Ek 1.3. Beton numunelerinin 28 günlük ultrases geçiş hızları (km/sn)

Sıcaklık (°C)	CEM I		CEM III	
	H	S	H	S
20	4.36		4.63	
150	4.42	4.36	4.59	4.64
300	4.03	4.04	4.34	4.25
450	3.45	3.64	2.63	2.72
600	1.90	1.80	1.78	1.60

Çizelge Ek 1.4. Beton numunelerinin 56 günlük ultrases geçiş hızları (km/sn)

Sıcaklık (°C)	CEM I		CEM III	
	H	S	H	S
20	4.46		4.40	
150	4.47	4.56	4.24	4.62
300	3.94	3.97	3.67	3.66
450	3.02	2.73	2.06	1.98
600	2.01	2.10	1.80	1.80

Çizelge Ek 1.5. Beton numunelerinin 28 günlük yüzey sertliği dayanımları (MPa)

Sıcaklık (°C)	CEM I		CEM III	
	H	S	H	S
20	26.73		23.15	
150	29.85	25.55	17.90	22.85
300	25.00	26.00	17.00	21.50
450	24.40	24.95	19.20	16.25
600	21.00	22.00	18.40	16.00

Çizelge Ek 1.6. Beton numunelerinin 56 günlük yüzey sertliği dayanımları (MPa)

Sıcaklık (°C)	CEM I		CEM III	
	H	S	H	S
20	24.05		26.00	
150	26.80	22.60	20.20	23.90
300	28.10	25.35	13.20	23.30
450	20.65	24.40	17.90	21.00
600	22.00	24.20	18.40	20.20

Çizelge Ek 1.7. Beton numunelerinin 28 günlük basınç dayanımları (MPa)

Sıcaklık (°C)	CEM I		CEM III	
	H	S	H	S
20	19.67		36.59	
150	22.24	16.09	34.58	38.42
300	21.78	23.27	31.51	31.33
450	19.89	18.82	33.04	35.07
600	15.00	14.10	18.09	19.00

Çizelge Ek 1.8. Beton numunelerinin 56 günlük basınç dayanımları (MPa)

Sıcaklık (°C)	CEM I		CEM III	
	H	S	H	S
20	32.40		36.00	
150	31.69	32.96	39.87	30.00
300	28.38	26.78	35.29	31.64
450	26.16	24.69	30.18	32.31
600	22.00	21.21	25.05	25.29

Çizelge Ek 1.9. Beton numunelerinin 28 günlük yarmada çekme dayanımları (MPa)

Sıcaklık (°C)	CEM I		CEM III	
	H	S	H	S
20	2.26		2.58	
150	2.79	3.04	1.49	1.84
300	1.59	1.70	1.84	1.63
450	1.38	0.99	0.85	0.85
600	0.60	0.50	0.50	0.35

Çizelge Ek 1.10. Beton numunelerinin 56 günlük yarmada çekme dayanımları (MPa)

Sıcaklık (°C)	CEM I		CEM III	
	H	S	H	S
20	2.41		3.00	
150	2.41	2.16	2.97	2.83
300	1.66	1.80	1.24	1.20
450	1.63	1.41	2.09	1.66
600	1.44	1.24	1.50	1.42

Çizelge Ek 1.11. Beton numunelerinin 28 günlük hacimce su emme değerleri (%)

Sıcaklık (°C)	CEM I		CEM III	
	H	S	H	S
20	8		3	
150	8	7	3	4
300	15	9	10	16
450	14	12	9	5
600	15	11	17	10

Çizelge Ek 1.12 Beton numunelerinin 56 günlük hacimce su emme değerleri (%)

Sıcaklık (°C)	CEM I		CEM III	
	H	S	H	S
20	8		6	
150	7	6	4	2
300	10	9	15	8
450	15	11	19	9
600	19	7	21	12

EK.2.
YAPILAN DENEYSEL ÇALIŞMA FOTOĞRAFLARI



Şekil Ek 2.1. Üretimde kullanılan kalıplar.



Şekil Ek 2.2. Üretimde kullanılan çimento tipleri.



Şekil Ek 2.3. Malzemelerin mikserde karıştırılması.



Şekil Ek 2.4. Beton mikseri ve vibratör masası



Şekil Ek 2.5. Sabit çökme miktarı 12 cm.



Şekil Ek 2.6. Kür havuzunda bekleyen beton numuneleri.



Şekil Ek 2.7. Beton numunelerinin etüvde kurutulması.



Şekil Ek 2.8. Numunelerin fırına yerleştirilmesi.



Şekil Ek 2.9. Patlamalara karşı fırını koruyucu tel kafes.



Şekil Ek 2.10. Yüksek sıcaklık sonrası havada soğumaya bırakılan beton numuneler.



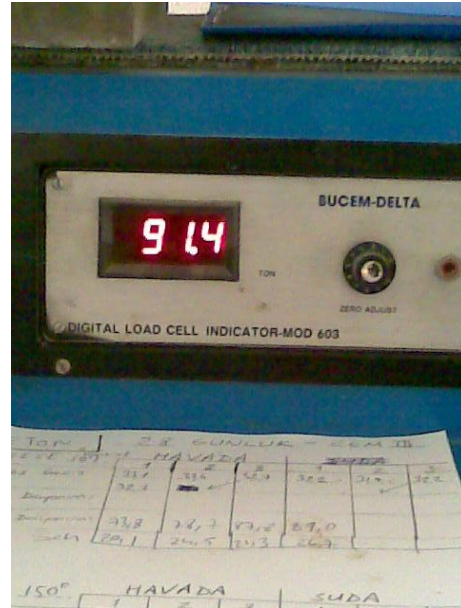
Şekil Ek 2.11. Yüksek sıcaklık sonrası suda soğumaya bırakılan beton numuneler.



Şekil Ek 2.12. Ultrases geçiş deneyi.



Şekil Ek 2.13. Yüzey sertliğinin belirlenmesi.



Şekil Ek 2.14. Basınç deneyi.



Şekil Ek 2.15. Yarma deneyi.



Şekil Ek 2.16. Hacimce su emme deneyi.