

**YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**YÜKSEK SICAKLIK ETKİSİNDE KALAN BETONUN
BASINÇ DAYANIMI RENK DEĞİŞİMİ İLİŞKİSİNİN
ARAŞTIRILMASI**

İnşaat Yük. Müh. Ahmet Beşer KIZILKANAT

**FBE İnşaat Mühendisliği Yapı Programında
Hazırlanan**

DOKTORA TEZİ

Tez Savunma Tarihi : 15 Ekim 2010
Tez Danışmanı : Doç.Dr. Nabi YÜZER (YTÜ)
Jüri Üyeleri : Prof.Dr. Turan ÖZTURAN (BÜ)
Prof.Dr. Leyla Dokuzer ÖZTÜRK (YTÜ)
Prof.Dr. Fevziye AKÖZ (YTÜ)
Prof.Dr. Abdurrahman GÜNER (İÜ)

İSTANBUL, 2010

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
SİMGE LİSTESİ.....	iv
KISALTMA LİSTESİ.....	v
ŞEKİL LİSTESİ.....	vi
ÇİZELGE LİSTESİ.....	ix
ÖNSÖZ	xi
ÖZET.....	xii
ABSTRACT	xiii
1. GİRİŞ.....	1
2. GENEL BİLGİ.....	3
2.1 Yüksek Sıcaklık Kaynakları	3
2.1.1 Yangın.....	3
2.1.2 Endüstri Fırın Bacaları.....	4
2.1.3 Hava Alanı Pistleri.....	4
2.1.4 Nükleer Reaktörler.....	4
2.2 Yüksek Sıcaklığın Betonarme Elemanlara Etkileri	5
2.2.1 Yüksek Sıcaklığın Betonarme Çeliğine Etkileri.....	6
2.2.2 Yüksek Sıcaklığın Betona Etkileri.....	7
2.2.2.1 Çimento Hamuru	9
2.2.2.2 Agregası.....	13
2.2.2.3 Mineral Katkı Malzemeleri.....	15
2.2.2.4 Liflerin Etkisi.....	17
2.2.3 Yüksek Sıcaklığın Betonun Termofiziksel ve Fiziksel Özelliklerine Etkileri.....	18
2.2.3.1 Özgül Isı.....	19
2.2.3.2 Isı İletim Katsayısı	21
2.2.3.3 Isı Yayınlmı	23
2.2.3.4 Genleşme Katsayısı	24
2.2.3.5 Isı Şoku Parametresi	26
2.2.3.6 Buhar Difüzyonu	26
2.2.3.7 Birim Hacim Ağırlığı.....	28
2.2.3.8 Renk.....	29
2.2.4 Yüksek Sıcaklığın Betonun Mekanik Özelliklerine Etkileri	34
2.2.4.1 Basınc Dayanımı.....	34
2.2.4.2 Çekme Dayanımı	36
2.2.4.3 Elastisite Modülü	37
2.3 Yüksek Sıcaklık Etkisinde Beton Özellikleri ile Renk Değişimi İlişkisi	39
3. DENEYSEL ÇALIŞMA.....	44
3.1 Numune Üretiminde Kullanılan Malzemeler	45
3.1.1 Agregası.....	45
3.1.2 Çimento.....	47
3.1.3 Mineral Katkı.....	47
3.1.4 Kimyasal Katkı	48
3.2 Numune Üretimi	48
3.3 Isıtma-Soğutma Süreci.....	48
3.4 Kontrol Deneyleri	49
3.4.1 Renk Ölçümü	50

3.4.2	Ultrases Geçiş Hızının Belirlenmesi.....	50
3.4.3	Birim Ağırlık ve Hacimce Su Emme.....	51
3.4.4	Isı İletim Katsayısının Belirlenmesi	51
3.4.5	Su Buharı Difüzyon Direnç Faktörünün Belirlenmesi	52
3.4.6	Sıcaklığın ve Rengin Derinliğe Bağlı Değişimi	54
3.4.7	Yarmada Çekme Deneyi.....	55
3.4.8	Basınç Deneyi.....	56
4.	DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ ve İRDELENMESİ	57
4.1	Renk Değişiminin Değerlendirilmesi ve İrdelenmesi.....	57
4.1.1	Silis ve Kalker Esaslı Agregası ile Üretilen Betonlar	57
4.1.2	Silis Esaslı Agregası ile Üretilen Betonlar	59
4.1.3	Kalker Esaslı Agregası ile Üretilen Betonlar	62
4.2	Ultrases Geçiş Hızı Değerlerinin Değerlendirilmesi ve İrdelenmesi	65
4.2.1	Silis ve Kalker Esaslı Agregası ile Üretilen Betonlar	65
4.2.2	Silis Esaslı Agregası ile Üretilen Betonlar	66
4.2.3	Kalker Esaslı Agregası ile Üretilen Betonlar	66
4.3	Birim Ağırlık ve Su Emme Sonuçlarının Değerlendirilmesi ve İrdelenmesi	68
4.3.1	Silis ve Kalker Esaslı Agregası ile Üretilen Betonlar	69
4.3.2	Silis Esaslı Agregası ile Üretilen Betonlar	70
4.3.3	Kalker Esaslı Agregası ile Üretilen Betonlar	72
4.4	Isı İletim Katsayısı Değerlerinin Değerlendirilmesi ve İrdelenmesi	73
4.5	Buhar Difüzyonu Direnç Faktörü Değerlerinin Değerlendirilmesi ve İrdelenmesi.....	75
4.6	Sıcaklığın ve Rengin Derinliğe Bağlı Değişiminin Değerlendirilmesi ve İrdelenmesi	78
4.6.1	Sıcaklığın ve Rengin Tür Bileşeninin Derinliğe Bağlı Değişimi	78
4.6.2	Rengin Değer ve Doymuşluk Bileşenlerinin Derinliğe Bağlı Değişimi.....	83
4.7	Yarmada Çekme Dayanımının Değerlendirilmesi ve İrdelenmesi	83
4.7.1	Silis ve Kalker Esaslı Agregası ile Üretilen Betonlar	83
4.7.2	Silis Esaslı Agregası ile Üretilen Betonlar	84
4.7.3	Kalker Esaslı Agregası ile Üretilen Beton için Yarmada Çekme Dayanımının Değerlendirilmesi ve İrdelenmesi	85
4.8	Basınç Dayanımının Değerlendirilmesi ve İrdelenmesi	85
4.8.1	Silis ve Kalker Esaslı Agregası ile Üretilen Betonlar	86
4.8.2	Silis Esaslı Agregası ile Üretilen Betonlar	86
4.8.3	Kalker Esaslı Agregası ile Üretilen Betonlar	87
5.	BASINÇ DAYANIMI-RENK DEĞİŞİMİ İLİŞKİSİNİN ARAŞTIRILMASI.....	89
5.1	Yapay Sinir Ağı Tasarımı.....	90
5.2	YSA'nın Modellenmesi	91
5.3	YSA'nın Eğitimi	94
5.4	YSA'nın Sınanması	95
6.	SICAKLIK-RENK DEĞİŞİMİ İLİŞKİSİNİN ARAŞTIRILMASI	98
7.	SONUÇLAR.....	100
	KAYNAKLAR.....	103
	EKLER	110
	ÖZGEÇMİŞ.....	127

SİMGE LİSTESİ

A	Alan
α	Isı yayılım katsayısı
β	$f(x_i)$ fonksiyonunun eğimini kontrol eden parametre
C	Özgül ısı
C	Rengin doymuşluk bileşeni
d	Deney parçasının ortalama kalınlığı
δ	Su buharı özgeçirgenliği
D	Difüzyon
Δp	Su buharı basınç farkı
Δu	İç enerjideki değişim
ΔT	Sıcaklık farkı
Δx	Kalınlık
E	Elastisite modülü
EPE_{CS}	Basınç dayanımı hata yüzdesi
$f(x_i)$	Logartimik sigmoid fonksiyonu
f_{teo}	Teorik basınç dayanımı
$f_{yç}$	Yarmada çekme dayanımı
$\phi(.)$	Dönüşüm (aktivasyon) fonksiyonu
g	Su buharı geçirgenlik hızı
G	Kütledeki değişim
H	Rengin tür bileşeni
l	Mesafe
λ	Isı iletim katsayısı
m	Kütle
μ	Su buharı difüzyon direnç faktörü
n	Numune sayısı
p	Isı şoku parametresi
P_k	Kırma yükü
Q	Isı geçişi
ρ	Yoğunluk
S	Yüzey alanı
$\sigma_{ç}$	Çekme mukavemeti
t	Zaman
T	Sıcaklık
u_i	i. işlem elemanın çıktısı
V	Rengin değer bileşeni
V_s	Ultrases geçiş hızı
Φ	Güç
w_{ij}	i. işlem elemanına ait sinaptik ağırlıklar
W	Su buharı geçirgenliği
x_i	i. numuneye ait yapay sinir ağı çıktısı
X_i	i. numuneye ait hedef değer
Z	Su buharı direnci

KISALTMA LİSTESİ

ASTM	American Society For Testing Materials
BS	British Standards
CEB	Comité Européen du Béton
TS	Türk Standardları

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1 Standart sıcaklık-zaman eğrisi (TS 1263, 1983)	4
Şekil 2.2 380 mm boyutlu kare kolonda sıcaklık dağılımı (Andrade vd., 2003a).....	5
Şekil 2.3 Çeliğin aderans-sıyrılma ilişkisi (Diederichs ve Schneider, 1981)	6
Şekil 2.4 Farklı tür yapı çeliklerinin akma ve çekme dayanımları (Baradan vd., 2002).....	7
Şekil 2.5 Yangın hasarı görmüş betonun izotermine bağlı özellikleri (Riley, 1991)	8
Şekil 2.6 Boşluk suyu transferi (Andrade vd., 2003b)	9
Şekil 2.7 Harçta sıcaklık etkisi öncesi ve sonrası (600°C) SEM görüntüsü (Kızılkıran ve Yüzer, 2008)	11
Şekil 2.8 Yüksek sıcaklığa maruz kalan çimento hamurunun TGA eğrileri (Ruiz vd., 2005). 12	
Şekil 2.9 Tobermoritin sıcaklığa bağlı dehidratasyonu (Scherefler vd., 2003).....	12
Şekil 2.10 Farklı sıcaklıklara maruz çimento hamuru XRD diyagramları (Peng vd. 2001)	13
Şekil 2.11 Beton basınç dayanımının agrega türüne göre sıcaklıkla değişimi (Khoury, 1992)14	
Şekil 2.12 Polipropilen lif içeriğine bağlı porozite değişimi (Alonso vd., 2003b)	17
Şekil 2.13 Boşluk basıncı-sıcaklık ilişkisi (Phan, 2008)	18
Şekil 2.14 Betonun özgül ısısının sıcaklığa bağlı değişimi (Vodak vd. 1997).....	20
Şekil 2.15 Özgül ısı-sıcaklık ilişkisi (Kodur ve Sultan, 2003)	20
Şekil 2.16 Isı iletimi-sıcaklık ilişkisi (Kodur ve Sultan, 2003)	23
Şekil 2.17 Çeşitli betonlar için α ısı yayılım katsayısı (CEB, 1991).....	24
Şekil 2.18 Isı yayılım katsayısının sıcaklıkla değişimi (Shin vd., 2002).....	24
Şekil 2.19 Betonda sıcaklık deformasyon ilişkisi (Papayianni vd., 2005)	25
Şekil 2.20 Beton ve agreganın ısıl genleşme katsayıları ilişkisi (Bazant ve Kaplan, 1996)	26
Şekil 2.21 Ağırlık kaybının sıcaklıkla değişimi (Anderberg, 2003)	28
Şekil 2.22 Farklı ışıkların tayf eğrileri.....	29
Şekil 2.23 Yüzeylerin tayfsal yansıma çarpanı eğrileri.....	30
Şekil 2.24 Mor bir yüzeyin farklı ışıklar altındaki görünen renkleri (Sirel, 1974).....	30
Şekil 2.25 Munsell Renk Dizgesinde rengin 3 bileşeni.....	31
Şekil 2.26 Munsell Tür Çemberi (ASTM D 1535-08, 2008)	32
Şekil 2.27 Silis esaslı agregalı betonda basınç dayanımı renk ilişkisi (Andrade vd., 2003a) ..	33
Şekil 2.28 Betonda sıcaklığa bağlı dayanım kaybı renk değişimi (Neville, 1990)	34
Şekil 2.29 Beton basınç dayanımına yükleme durumunun etkisi (Neville, 2000)	35
Şekil 2.30 Basınç dayanımının soğutma şekline göre sıcaklıkla değişimi (Lee vd., 2008)	35
Şekil 2.31 Basınç dayanımının sıcaklıkla değişimi (Bazant ve Kaplan, 1996).....	36
Şekil 2.32 Puzolan katkılı ve katkısız betonların çekme dayanımının sıcaklıkla değişimi (Guise vd., 1996).....	37
Şekil 2.33 Eğilme dayanımının sıcaklıkla değişimi (Aköz vd., 1995).....	37
Şekil 2.34 Betonun elastisite modülünün sıcaklıkla değişimi (Neville, 2000).....	38
Şekil 2.35 Farklı beton numuneleri için sıcaklık-elastisite modülü ilişkisi (Savva vd., 2005) 38	
Şekil 2.36 Basınç dayanımının sıcaklıkla değişimi (Yüzer vd., 2001).....	40
Şekil 2.37 Renklerin (tür) sıcaklıkla değişimi (Yüzer vd., 2001).....	40
Şekil 2.38 Yüzeyden itibaren sıcaklığın derinlikle değişimi (Short vd., 2001).....	41
Şekil 2.39 Yüksek sıcaklık etkisinde beton renginin derinlikle değişimi (Short vd., 2001)	41
Şekil 3.1 I. Grup karışım agregası granülometri eğrisi.....	46
Şekil 3.2 II. ve III. Grup karışım agregası granülometri eğrileri.....	46
Şekil 3.3 Yüksek sıcaklığa maruz kalan numuneler.....	49
Şekil 3.4 Havada ve suda soğutulan numuneler	49
Şekil 3.5 Renk analizi	50
Şekil 3.6 Ultrasonik yöntem ile ses geçiş süresinin belirlenmesi.....	51
Şekil 3.7 Tek deney parçalı mahfazalı sıcak plaka cihazı	51
Şekil 3.8 Tek deney parçalı mahfazalı sıcak plaka cihazı	51

Şekil 3.9 Buhar geçirimliliği deney düzeneği	52
Şekil 3.10 Buhar geçirimliliği deney düzeneği	53
Şekil 3.11 Derinliğe bağlı sıcaklık değişimi ölçümü yapılacak numune	54
Şekil 3.12 Derinliğe bağlı sıcaklık ölçüm cihazı	55
Şekil 3.13 Kesilerek dilimlere ayrılan numune	55
Şekil 3.14 Suda soğutulan numunede yarma deneyi	56
Şekil 3.15 Basınç deneyi	56
Şekil 4.1 I. Grup beton numunelerin renk değişimi (tür)-sıcaklık ilişkisi	58
Şekil 4.2 I. Grup beton numunelerin renk değişimi (değer)-sıcaklık ilişkisi	58
Şekil 4.3 I. Grup beton numunelerin renk değişimi (doymuşluk)-sıcaklık ilişkisi	59
Şekil 4.4 II. Grup beton numunelerin renk değişimi (tür)-sıcaklık ilişkisi	60
Şekil 4.5 II. Grup beton numunelerin renk değişimi (değer)-sıcaklık ilişkisi	61
Şekil 4.6 II. Grup beton numunelerin renk değişimi (doymuşluk)-sıcaklık ilişkisi	62
Şekil 4.7 III. Grup beton numunelerin renk değişimi (tür)-sıcaklık ilişkisi	63
Şekil 4.8 III. Grup beton numunelerin renk değişimi (değer)-sıcaklık ilişkisi	63
Şekil 4.9 III. Grup beton numunelerin renk değişimi (doymuşluk)-sıcaklık ilişkisi	64
Şekil 4.10 I. Grup beton numunelerin bağıl ses geçiş hızı-sıcaklık ilişkisi	65
Şekil 4.11 II. Grup beton numunelerin bağıl ses geçiş hızı-sıcaklık ilişkisi	66
Şekil 4.12 III. Grup beton numunelerin bağıl ses geçiş hızı-sıcaklık ilişkisi	67
Şekil 4.13 Yüksek sıcaklık etkisindeki harcın boşluk yapısının değişimi (Alonso vd., 2003b)	68
Şekil 4.14 I. Grup beton numunelerin bağıl birim ağırlık-sıcaklık ilişkisi	69
Şekil 4.15 I. Grup beton numunelerin hacimce su emme-sıcaklık ilişkisi	70
Şekil 4.16 II. Grup beton numunelerin birim ağırlık-sıcaklık ilişkisi	71
Şekil 4.17 II. Grup beton numunelerin hacimce su emme-sıcaklık ilişkisi	71
Şekil 4.18 III. Grup beton numunelerin birim ağırlık-sıcaklık ilişkisi	72
Şekil 4.19 III. Grup beton numunelerin hacimce su emme-sıcaklık ilişkisi	73
Şekil 4.20 I. Grup beton numunelerin ısı iletim katsayısı-sıcaklık ilişkisi	74
Şekil 4.21 II. Grup beton numunelerin ısı iletim katsayısı-sıcaklık ilişkisi	74
Şekil 4.22 III. Grup beton numunelerin ısı iletim katsayısı-sıcaklık ilişkisi	75
Şekil 4.23 I. Grup beton numunelerin buhar difüzyon direnç faktörü-sıcaklık ilişkisi	77
Şekil 4.24 II. Grup beton numunelerin buhar difüzyon direnç faktörü-sıcaklık ilişkisi	77
Şekil 4.25 III. Grup beton numunelerin buhar difüzyon direnç faktörü-sıcaklık ilişkisi	78
Şekil 4.26 I. Grup katkısız seride sıcaklığın ve rengin (tür) derinliğe bağlı değişimi	79
Şekil 4.27 I. Grup silis dumanı katkılı seride sıcaklığın ve rengin (tür) derinliğe bağlı değişimi	79
Şekil 4.28 I. Grup cüruf katkılı seride sıcaklığın ve rengin (tür) derinliğe bağlı değişimi	80
Şekil 4.29 I. Grup uçucu kül katkılı seride sıcaklığın ve rengin (tür) derinliğe bağlı değişimi	80
Şekil 4.30 II. Grup katkısız seride sıcaklığın ve rengin (tür) derinliğe bağlı değişimi	80
Şekil 4.31 II. Grup silis dumanı katkılı seride sıcaklığın ve rengin (tür) derinliğe bağlı değişimi	81
Şekil 4.32 II. Grup cüruf katkılı seride sıcaklığın ve rengin (tür) derinliğe bağlı değişimi	81
Şekil 4.33 II. Grup uçucu kül katkılı seride sıcaklığın ve rengin (tür) derinliğe bağlı değişimi	81
Şekil 4.34 III. Grup katkısız seride sıcaklığın ve rengin (tür) derinliğe bağlı değişimi	82
Şekil 4.35 III. Grup silis dumanı katkılı seride sıcaklığın ve rengin (tür) derinliğe bağlı değişimi	82
Şekil 4.36 III. Grup cüruf katkılı seride sıcaklığın ve rengin (tür) derinliğe bağlı değişimi	82
Şekil 4.37 III. Grup uçucu kül katkılı seride sıcaklığın ve rengin (tür) derinliğe bağlı değişimi	83
Şekil 4.38 I. Grup beton numunelerin çekme dayanımı-sıcaklık ilişkisi	84
Şekil 4.39 II. Grup beton numunelerin çekme dayanımı-sıcaklık ilişkisi	84
Şekil 4.40 III. Grup beton numunelerin çekme dayanımı-sıcaklık ilişkisi	85
Şekil 4.41 I. Grup beton numunelerin basınç dayanımı-sıcaklık ilişkisi	86
Şekil 4.42 II. Grup beton numunelerin basınç dayanımı-sıcaklık ilişkisi	87

Şekil 4.43 III. Grup beton numunelerde basınç dayanımı-sıcaklık ilişkisi	88
Şekil 5.1 Tipik bir YSA modeli.....	90
Şekil 5.2 I. Grup betonun tahmin edilen ile gerçek dayanımların karşılaştırılması	96
Şekil 5.3 II. Grup betonun tahmin edilen ile gerçek dayanımların karşılaştırılması.....	96
Şekil 5.4 III. Grup betonun tahmin edilen ile gerçek dayanımların karşılaştırılması.....	97
Şekil 6.1 I. Grup betonlara ait sıcaklık-renk ilişkisi	98
Şekil 6.2 II. Grup betonlara ait sıcaklık-renk ilişkisi.....	98
Şekil 6.3 III. Grup betonlara ait sıcaklık-renk ilişkisi	99
Ek Şekil 1 I. Grup katkısız seride sıcaklığın ve rengin (değer) derinlikle değişimi.....	119
Ek Şekil 2 I. Grup katkısız seride sıcaklığın ve rengin (doymuşluk) derinlikle değişimi	119
Ek Şekil 3 I. Grup silis dumanı katkılı seride sıcaklığın ve rengin (değer) derinlikle değişimi	119
Ek Şekil 4 I. Grup silis dumanı katkılı seride sıcaklığın ve rengin (doymuşluk) derinlikle değişimi.....	120
Ek Şekil 5 I. Grup cüruf katkılı seride sıcaklığın ve rengin (değer) derinliğe derinlikle	120
Ek Şekil 6 I. Grup cüruf katkılı seride sıcaklığın ve rengin (doymuşluk) derinlikle değişimi.....	120
Ek Şekil 7 I. Grup uçucu kül katkılı seride sıcaklığın ve rengin (değer) derinlikle değişimi	121
Ek Şekil 8 I. Grup uçucu kül katkılı seride sıcaklığın ve rengin (doymuşluk) derinlikle değişimi....	121
Ek Şekil 9 II. Grup katkısız seride sıcaklığın ve rengin (değer) derinlikle değişimi	121
Ek Şekil 10 II. Grup katkısız seride sıcaklığın ve rengin (doymuşluk) derinlikle değişimi....	122
Ek Şekil 11 II. Grup silis dumanı katkılı seride sıcaklığın ve rengin (değer) derinlikle değişimi	122
Ek Şekil 12 II. Grup silis dumanı katkılı seride sıcaklığın ve rengin (doymuşluk) derinlikle değişimi.....	122
Ek Şekil 13 II. Grup cüruf katkılı seride sıcaklığın ve rengin (değer) derinlikle değişimi	123
Ek Şekil 14 II. Grup cüruf katkılı seride sıcaklığın ve rengin (doymuşluk) derinlikle değişimi.....	123
Ek Şekil 15 II. Grup uçucu kül katkılı seride sıcaklığın ve rengin (değer) derinlikle değişimi	123
Ek Şekil 16 II. Grup uçucu kül katkılı seride sıcaklığın ve rengin (doymuşluk) derinlikle değişimi.....	124
Ek Şekil 17 III. Grup katkısız seride sıcaklığın ve rengin (değer) derinlikle değişimi	124
Ek Şekil 18 III. Grup katkısız seride sıcaklığın ve rengin (doymuşluk) derinlikle değişimi .	124
Ek Şekil 19 III. Grup silis dumanı katkılı seride sıcaklığın ve rengin (değer) derinlikle değişimi.....	125
Ek Şekil 20 III. Grup silis dumanı katkılı seride sıcaklığın ve rengin (doymuşluk) derinlikle değişimi.....	125
Ek Şekil 21 III. Grup cüruf katkılı seride sıcaklığın ve rengin (değer) derinlikle değişimi....	125
Ek Şekil 22 III. Grup cüruf katkılı seride sıcaklığın ve rengin (doymuşluk) derinlikle değişimi	126
Ek Şekil 23 III. Grup uçucu kül katkılı seride sıcaklığın ve rengin (değer) derinlikle değişimi	126
Ek Şekil 24 III. Grup uçucu kül katkılı seride sıcaklığın ve rengin (doymuşluk) derinlikle değişimi.....	126

ÇİZELGE LİSTESİ

Çizelge 2.1	Agrega türüne göre betonun ısı iletim katsayısı	22
Çizelge 2.2	Bazı minerallerin yüksek sıcaklıkta renk değişimleri (Uz, 1994).....	32
Çizelge 2.3	Cüruf katkılı numunelerin EDS analizi sonuçları (Yüzer vd., 2007a)	39
Çizelge 3.1	Numune grupları.....	44
Çizelge 3.2	Numune kodları	45
Çizelge 3.3	Agregaların fiziksel özellikleri	46
Çizelge 3.4	I. Grupta kullanılan malzemelerin kimyasal analizi ve fiziksel özellikleri	47
Çizelge 3.5	II. ve III. Grupta kullanılan malzemelerin kimyasal analizi ve fiziksel özellikleri	47
Çizelge 3.6	Gerçek malzeme miktarları ve taze beton özellikleri	48
Çizelge 4.1	Rengin türündeki değişimin büyüklüğü	57
Çizelge 4.2	Rengin değerindeki değişimin büyüklüğü.....	58
Çizelge 4.3	Rengin doymuşluğundaki değişimin büyüklüğü	59
Çizelge 4.4	Rengin türündeki değişimin büyüklüğü	60
Çizelge 4.5	Rengin değerindeki değişimin büyüklüğü.....	60
Çizelge 4.6	Rengin doymuşluğundaki değişimin büyüklüğü.....	61
Çizelge 4.7	Rengin türündeki değişimin büyüklüğü	62
Çizelge 4.8	Rengin değerindeki değişimin büyüklüğü.....	63
Çizelge 4.9	Rengin doymuşluğundaki değişimin büyüklüğü.....	64
Çizelge 5.1	Girdi parametreleri ve değişim aralıkları	91
Çizelge 5.2	I. Grup betonda YSA modelinin kurulmasında kullanılan olaylar.....	92
Çizelge 5.3	II. Grup betonda YSA modelinin kurulmasında kullanılan olaylar	93
Çizelge 5.4	III. Grup betonda YSA modelinin kurulmasında kullanılan olaylar	94
Çizelge 5.5	Yangın hasarı görmüş bir yapıya ait deney sonuçları	96
Ek Çizelge 1	I. Grup beton numunelerin renk değişimi (tür).....	110
Ek Çizelge 2	I. Grup beton numunelerin renk değişimi (değer)	110
Ek Çizelge 3	I. Grup beton numunelerin renk değişimi (doymuşluk).....	110
Ek Çizelge 4	II. Grup beton numunelerin renk değişimi (tür).....	110
Ek Çizelge 5	II. Grup beton numunelerin renk değişimi (değer)	110
Ek Çizelge 6	II. Grup beton numunelerin renk değişimi (doymuşluk)	111
Ek Çizelge 7	III. Grup beton numunelerin renk değişimi (tür)	111
Ek Çizelge 8	III. Grup beton numunelerin renk değişimi (değer).....	111
Ek Çizelge 9	III. Grup beton numunelerin renk değişimi (doymuşluk).....	111
Ek Çizelge 10	I. Grup beton numunelerin ultrases geçiş hızları (mm/μs)	111
Ek Çizelge 11	II. Grup beton numunelerin ultrases geçiş hızları (mm/μs)	112
Ek Çizelge 12	III. Grup beton numunelerin ultrases geçiş hızları (mm/μs).....	112
Ek Çizelge 13	I. Grup beton numunelerin birim ağırlıkları (kg/m ³)	112
Ek Çizelge 14	I. Grup beton numunelerin hacimce su emme değerleri (%)	112
Ek Çizelge 15	II. Grup beton numunelerin birim ağırlıkları (kg/m ³).....	112
Ek Çizelge 16	II. Grup beton numunelerin hacimce su emme değerleri (%).....	113
Ek Çizelge 17	III. Grup beton numunelerin birim ağırlıkları (kg/m ³).....	113
Ek Çizelge 18	III. Grup beton numunelerin hacimce su emme değerleri (%)	113
Ek Çizelge 19	I. Grup beton numunelerin ısı iletim katsayısı değerleri (W/mK).....	113
Ek Çizelge 20	II. Grup beton numunelerin ısı iletim katsayısı değerleri (W/mK).....	113
Ek Çizelge 21	III. Grup beton numunelerin ısı iletim katsayısı değerleri (W/mK)	114
Ek Çizelge 22	I. Grup beton numunelerin buhar difüzyon direnç faktörü değerleri.....	114
Ek Çizelge 23	II. Grup beton numunelerin buhar difüzyon direnç faktörü değerleri	114
Ek Çizelge 24	III. Grup beton numunelerin buhar difüzyon direnç faktörü değerleri	114
Ek Çizelge 25	I. Grup beton numunelerde sıcaklığın ve rengin derinlikle değişimi.....	115

Ek Çizelge 26	II. Grup beton numunelerde sıcaklığın ve rengin derinlikle değişimi	116
Ek Çizelge 27	III. Grup beton numunelerde sıcaklığın ve rengin derinlikle değişimi.....	117
Ek Çizelge 28	I. Grup beton numunelerin yarmada çekme dayanımları (N/mm ²)	117
Ek Çizelge 29	II. Grup beton numunelerin yarmada çekme dayanımları (N/mm ²).....	118
Ek Çizelge 30	III. Grup beton numunelerin yarmada çekme dayanımları (N/mm ²).....	118
Ek Çizelge 31	I. Grup beton numunelerin basınç dayanımları (N/mm ²)	118
Ek Çizelge 32	II. Grup beton numunelerin basınç dayanımları (N/mm ²)	118
Ek Çizelge 33	III. Grup beton numunelerin basınç dayanımları (N/mm ²).....	118

ÖNSÖZ

Yıldız Teknik Üniversitesi Yapı Malzemeleri Anabilim Dalında yapılan çalışma kapsamında yüksek sıcaklığın betonun mekaniksel, fiziksel ve termofiziksel özelliklerine etkileri incelenmiştir. Deneysel çalışma sonuçları irdelenerek, basınç dayanımı ile renk değişimi ve ultrases geçiş hızı arasında ilişki kuruldu. Ayrıca tayfsal ışıkölçer yardımı ile yine derinliğe bağlı olarak renk değişimi ölçüldü, betonun derinliğe bağlı sıcaklık değişimi ile derinliğe bağlı rengin tür bileşeni arasında kullanılan agrega türüne göre üç farklı bağıntı geliştirildi.

Bu araştırmanın yapılmasında çalışmanın yürütücülüğünü üstlenerek, her zaman yakın ilgi ve desteğini gördüğüm Sayın Doç.Dr. Nabi YÜZER’e, konu ile ilgili bilgi ve deneyimlerinden yararlandığım Sayın Prof.Dr. Fevziye AKÖZ’e, 103I040 nolu “Yangına Maruz Kalan Yapılarda Beton Basınç Dayanımı-Renk Değişimi İlişkisinin Araştırılması” adlı projeyi ve 109M008 nolu “Yüksek Sıcaklık Etkisine Maruz Kalan Betonun Termal Özelliklerinin ve Renk Değişiminin Araştırılması” adlı projeyi destekleyerek katkıda bulunan TÜBİTAK Araştırma Destek Programları Mühendislik Araştırma Grubu’na, 22-05-01-03 nolu “Yangına Maruz Yapılarda Beton Basınç Dayanımı – Renk Değişimi İlişkisi” adlı araştırma projesini destekleyen Yıldız Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü’ne, “İz Bırakanlar Bursu” ile destekleyen Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği’ne, deneysel çalışmalarda kullanmak üzere malzemeleri temin eden AKÇANSA ve SET Beton’a ayrıca Yrd.Doç.Dr. Özgür ÇAKIR’a, Yrd.Doç.Dr. Nihat KABAY’a, deneysel çalışmalarında yardımcı olan Tek. Halil YAVAŞÇI’ya ve çalışmalarım boyunca her zaman yanımda olan, yardımlarını ve desteklerini esirgemeyen annem Zübeyde BOZALP’e ve eşim Sinem KIZILKANAT’a sonsuz teşekkür ederim.

ÖZET

Herhangi bir nedenle yüksek sıcaklık etkisine maruz kalan betonarme elemanlarda betonun ve çeliğin mekanik ve fiziksel özelliklerinde değişiklikler meydana gelir. Bu değişikliklerin sonucu olarak betonda çatlama ve parça atma gözlenirken adansta önemli kayıplar oluşmaktadır. Bu nedenle yangın gibi yüksek sıcaklık etkisine maruz kalmış yapıların onarım veya yıkımına karar vermeden önce yapının son durumunun doğru değerlendirilmesi gerekir.

Bu çalışmada yüksek sıcaklığın ve söndürme türünün betonun fiziksel, termofiziksel ve mekanik özelliklerine etkileri deneysel olarak araştırılmıştır. Bu amaçla CEM I 42.5 R çimentosu, silis ve kalker esaslı agregalar ve silis dumanı, uçucu kül, cüruf gibi farklı puzolanlar kullanılarak üretilen oniki seri beton 200, 300, 600 ve 900°C gibi farklı sıcaklıklara maruz bırakılmış, soğutma işlemi havada ve suda olmak üzere iki grupta gerçekleştirilmiştir. Oda sıcaklığına kadar soğutulan numunelerde mekanik, termofiziksel ve fiziksel kontrol deneyleri yapılmıştır. Fiziksel bir özellik olan renk ölçümünde, rengin tür, değer ve doymuşluk bileşenleri, Munsell Renk Dizgesi'nden yararlanılarak tayfsal ışıkölçer ile sayısal olarak belirlenmiştir. Ayrıca tek bir yüzeyden yüksek sıcaklık etkisine maruz kalan betonda sıcaklığın ve rengin derinliğe bağlı değişimi ölçülmüştür.

Deney sonuçlarından betonun termofiziksel özellikleri olan ısı iletim katsayısı ve buhar difüzyon direnç faktörünün TS 825'te verilen hesap değerlerinden farklı olduğu, betonda agrega türünün ve mineral katkıların dikkate alınması gerektiği tespit edilmiştir. Yüksek sıcaklık etkisinde kalan betonun basınç dayanımında meydana gelen değişim ile rengin tür bileşeninde ve ultrases geçiş hızında meydana gelen değişim paralellik göstermiştir. Basınç dayanımı ile renk değişimi ve ultrases geçiş hızı arasında çok katmanlı ileri beslemeli Yapay Sinir Ağları Yöntemi kullanılarak ilişki kurulmuştur. Bu ilişkiden yararlanılarak yüksek sıcaklık etkisine maruz kalan yapılarda renk ölçümü yapılarak ve ultrases geçiş hızı belirlenerek yapı elemanının basınç dayanımında meydana gelen kayıplar hakkında fikir edinilebileceği sonucuna varılmıştır. Ayrıca sıcaklık ile rengin tür bileşeni arasında derinliğe bağlı ilişki kurulmuştur. Bu ilişkiden yararlanılarak donatının maruz kaldığı sıcaklığın tespit edilebileceği kanaatine varılmıştır.

Anahtar kelimeler: Beton, mekanik ve termofiziksel özellikler, renk, yüksek sıcaklık.

ABSTRACT

Investigation of the Relationship between Compressive Strength and Color Change of Concrete Subjected to High Temperatures

The physical and mechanical properties of reinforced concrete structures change when they are exposed to high temperatures. The changes in the properties of the reinforced concrete cause cracks, spalling and also cause weakening of the bond between the bar and the concrete. Therefore, the final state structural safety should be carefully assessed for the adequacy of the decision whether a structure exposed to high temperatures should be repaired or demolished.

In this study, the effects of temperature and cooling regimes on the physical, thermophysical and mechanical properties of the concrete were observed. Total of twelve series of concrete were made with CEM I 42,5 R cement, siliceous and calcareous aggregates, silica fume, fly ash and slag. These concrete samples were exposed to 200, 300, 600 and 900°C and cooled to room temperature in water and in air and subjected to mechanical, thermophysical and physical control test. Within the color measurement, which is physical test, the Munsell Color System components of hue, value and chroma were measured using a spectrophotometer. Additionally, the color and temperature variation of concrete with depth was determined.

Test results indicated that the measured thermal conductivity and vapor diffusion resistance factor are different from those recommendation in TS 825 and that the aggregate type and mineral admixtures in concrete should be taken into consideration. Furthermore a correlation in the variation of compressive strength, ultrasonic pulse velocity and color of concrete exposed to high temperatures was found. A relationship is established between the compressive strength, ultrasonic pulse velocity and the color change of concrete by developing and testing a multi-layered feed-forward Artificial Neural Network trained with the back-propagation algorithm. This relationship is expected to show residual strength of the concrete and the temperature to which it was exposed, based on the color and ultrasonic pulse velocity measurement taken from the concrete structure. Moreover, a relationship was established between the temperature and hue component of the color. Thus, the variation of temperature in concrete with depth and the temperature to which the rebar was exposed could be estimated.

Keywords: Color, concrete, high temperature, mechanical and thermophysical properties.

1. GİRİŞ

Konut, okul, fabrika, işyeri gibi binalar, tünel, köprü, petrol platformu gibi yapılar, işlevleri gereği veya yangın nedeni ile yüksek sıcaklık etkisinde kalabilirler. Yüksek sıcaklığın kaynaklarından biri olan yangının betona ve betonarme yapılara etkisi 1922'den günümüze kadar araştırılmaktadır. 10 yıl öncesine kadarki çalışmalarda yüksek sıcaklığın normal dayanımlı betona etkileri üzerinde odaklanılmıştı (Khoury, 2000; Khoury, 2003a). Ancak günümüzde modern yapılarda, endüstri yapılarında, tünellerde veya özel hizmet amaçlı inşa edilen yapılarda kimyasal ve mineral katkıların kullanımı ile yüksek performanslı ve yüksek dayanımlı betonlar kullanılmaya başlanmıştır. Bu betonların yüksek sıcaklık etkisindeki davranışı iyi bilinmelidir. Çünkü bu betonların boşluk oranı düşük, yapısı daha yoğun olduğu için yüksek sıcaklık etkisinde performansı normal dayanımlı betona göre daha düşüktür (Schrefler vd., 2003). Yapılarda durabilite problemine yol açan başlıca fiziksel etkilerden biri olan yüksek sıcaklık, kalıcı hasarlar oluşturarak yapının servis dışı kalmasına, can ve mal kaybına neden olabilmektedir (Aydın ve Baradan, 2003). Örneğin Danimarka'da bulunan Great Belt Tünelinde ve Channel Tünelde, 1994 ve 1996 yıllarında çıkan yangınlarda, yüksek sıcaklık etkisi ile betonda meydana gelen patlama ve parça atmalar nedeni ile beton kesitindeki azalmalar ağır hasarlara ve New York'taki Dünya Ticaret Merkezi Binalarının çökmesi ile çok sayıda can ve mal kaybına yol açmıştır (Khoury, 2003a; Schrefler vd., 2002; Baradan vd., 2002).

Günümüzde birçok ülkenin yangından koruma yönetmelikleri bulunmaktadır. Bu yönetmelikler bir binada bütün eleman ve bileşenlerin fonksiyonlarına, konum ve taşıyıcı olup olmadıklarına bakılmaksızın belirli süre yangına ve onun etkilerine direnç göstermelerini zorunlu kılmaktadır (Baradan vd., 2002). Yangın nedeni ile yüksek sıcaklık etkisine maruz kalan betonarme bir yapının yıkım ya da onarımına karar vermek için yerinde ve laboratuvarında tahribatlı ve tahribatsız deneyler yapılmalıdır. Yerinde yapılan ilk inceleme görsel incelemedir, bu aşamada betonda çatlakların, dağılmaların, renk değişiminin olup olmadığı araştırılır (Guise vd., 1996). Yüksek sıcaklık etkisinde kalan harç ve betonun mekanik ve fiziksel özelliklerinin araştırıldığı çalışmalarda, basınç dayanımı ile renk değişimi arasında ilişki kurulmuş, tahribatsız bir yöntem olan renk ölçümünden yararlanarak betonun basınç dayanımının tahmin edilebileceği sonucuna varılmıştır (Kızılkant, 2004; Yüzer vd., 2004a; Yüzer vd., 2007).

Tez kapsamında herhangi bir nedenle yüksek sıcaklık etkisine maruz kalan betonda renk ölçümünden yararlanarak, renk ve ultrases geçiş hızı birlikte kullanılarak basınç dayanımının ve renk ile sıcaklığın derinliğe bağlı değişiminin tahmin edilmesi olmak üzere iki ayrı tahribatsız deney yöntemi geliştirilmesi amaçlanmıştır. Bu yöntemlerden ilkinde betonun basınç dayanımı ile rengin tür, değer, doymuşluk bileşenleri ve ultrases geçiş hızı arasında ilişki araştırılmış, basınç dayanımı Yapay Sinir Ağları Yönteminden yararlanılarak tahmin edilmiştir. Geliştirilmesi amaçlanan diğer yöntemde ise betonda sıcaklığın derinliğe bağlı değişimi renk ölçümlerinden yararlanılarak araştırılmıştır. Elde edilen ilişkilerden donatının maruz kaldığı sıcaklığın tahmin edilebilmesi için renk ölçümünden nasıl yararlanılacağı değerlendirilmiştir. Tezin birinci bölümünde yüksek sıcaklığın betona etkileri sorunu ortaya konulmuş, çalışmanın amacı ve kapsamı verilmiştir. Genel bilgilerin verildiği ikinci bölümde konu ile ilgili kaynaklar incelenmiştir. Üçüncü bölümde ise yüksek sıcaklık etkisi, farklı betonlar ve sıcaklıklar için deneysel olarak araştırılmıştır. Dördüncü bölümde yapılan deneylerden elde edilen sonuçlar değerlendirilmiş ve irdelenmiştir. Beşinci bölümde basınç dayanımı ile renk değişimi ve ultrases geçiş hızı arasındaki ilişkiler, altıncı bölümde rengin tür bileşeni ile sıcaklığın derinliğe bağlı değişimi araştırılmıştır. Tezin yedinci bölümünde deneysel çalışmadan ve deney sonuçlarının irdelenmesinden elde edilen sonuçlar ve öneriler verilmiştir.

2. GENEL BİLGİ

2.1 Yüksek Sıcaklık Kaynakları

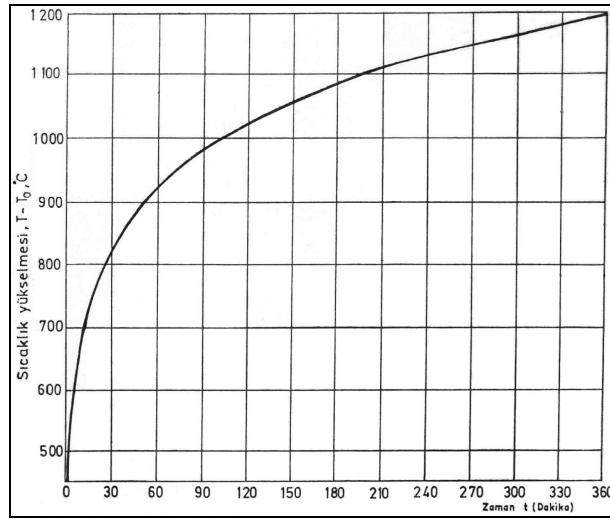
Yapıya ve malzemeye zarar veren, hasara yol açan yüksek sıcaklık kaynakları, yangın, özel üretimlerden dolayı endüstri fırın bacalarında, nükleer reaktörlerde görülen sıcaklık ve hava alanı pistlerinde sürtünmenin sebep olduğu ısınma olarak gösterilebilir (Aköz ve Yüzer, 1994). Bu etkiler aşağıda sırası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

2.1.1 Yangın

Yanma, yakacakların oksijenle hızlı bir şekilde reaksiyona girerek, yakacak içinde depolanmış bulunan enerjinin, ısı enerjisi biçiminde açığa çıktığı kimyasal bir işlemdir. Bu işlem sırasında çıkan enerji, genellikle sıcak gazlar şeklinde olmasına rağmen, çok küçük miktarlarda elektromanyetik (ışık), elektrik (serbest iyonlar ve elektronlar) ve mekanik (ses) enerjiler şeklinde de ortaya çıkmaktadır. Yanma, yanıcı maddelerin oksijen ile kimyasal reaksiyon hızına, oksijen miktarına ve yanma bölgesindeki sıcaklığa bağlıdır (Ashre, 1997). Yüksek sıcaklığa sebep olan yangın ise katı, sıvı ve/veya gaz halindeki maddelerin kontrol dışı yanması olayıdır. Araştırmalar, tabii bir yangının genel olarak ateşleme, yavaş yanma, ısınma ve soğuma olmak üzere dört fazdan oluştuğunu göstermektedir. Ateşleme ve yanma fazları tüm-parlama öncesi (pre-flashover), ısınma ve soğuma fazları ise tüm-parlama sonrası (post-flashover) fazları olarak adlandırılmaktadır. Tüm-parlama öncesi fazı gelişmekte olan yangın, tüm-parlama sonrası fazı ise gelişmiş olan yangın durumunu göstermektedir (Aköz ve Yüzer, 1994). Şekil 2.1’de verilen standart sıcaklık-zaman eğrisinde, sıcaklığın 10 dakika gibi kısa bir zamanda yaklaşık 650°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 2.1 Standart sıcaklık-zaman eğrisi (TS 1263, 1983)

2.1.2 Endüstri Fırın Bacaları

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

2.1.3 Hava Alanı Pistleri

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

2.1.4 Nükleer Reaktörler

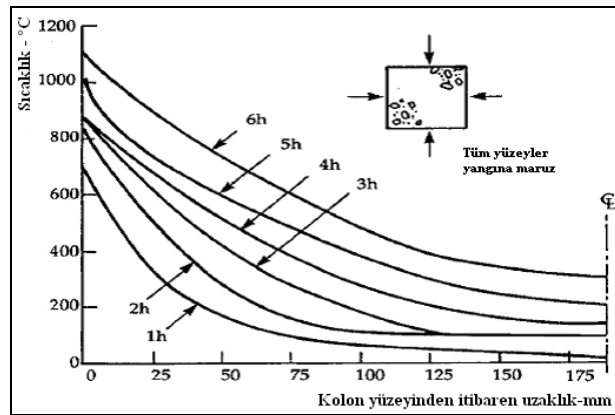
Nükleer reaktörlerde, sistemin sıcak parçalarından transfer olan ısı ve nötron ve gama ışınlarının baskısı ile oluşan sıcaklık nedeni ile reaktörü koruyan beton yüksek sıcaklığa maruz kalır. Radyasyon, koruyucu betona önemli zarar vermez ancak beton sıcaklık nedeni ile daha zayıf hale gelir ve nötron baskısına karşı etkisiz kalır. Hızlı nötron ve gama ışınları yavaşlatılırken reaktör çekirdeğinden açığa çıkan enerji, koruyucu malzemede tutulur ve ısı şeklinde salıverilir. Bu ısı özellikle reaktör çekirdeğine yakın bölgeleri etkiler. Sodyum yakma

havuzlarının etkisi ile tipik bir sodyum-beton reaksiyonu 400°C’de başlar ve yarım saat sonra sıcaklık 800°C’den daha yüksek bir değere ulaşır (Sakr vd., 2005)

2.2 Yüksek Sıcaklığın Betonarme Elemanlara Etkileri

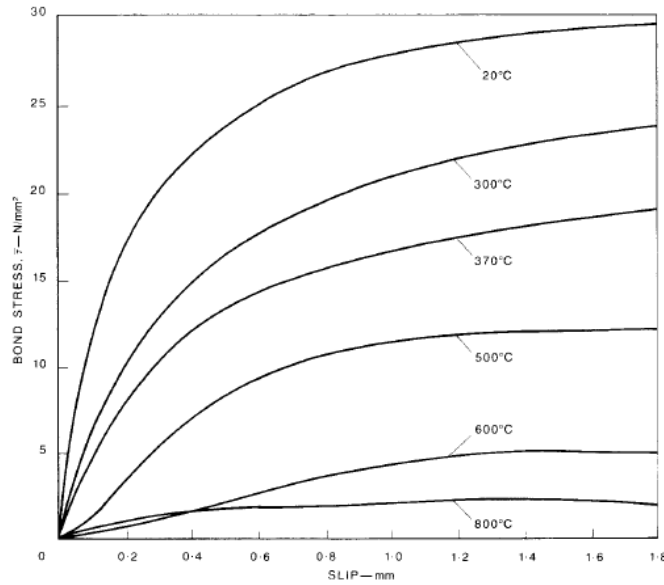
Çelik ve beton yanıcılık açısından A1 sınıfı yani “hiç yanmaz” grubuna girerler. Ancak bu malzemelerin yangın hasarı malzeme kaybı olarak değil, akma sınırı ve elastisite modülündeki azalmalar ve içyapı değişiklikleri olarak ortaya çıkar (Akman, 1992).

Yüksek sıcaklığa maruz kalan betonarme yapının göçmesinde en etkin faktör kolonlardaki ve düğüm noktalarındaki çeliğin hasar görmesidir. Çeliğin ısı iletkenlik katsayısı büyük olduğundan çelikteki sıcaklık artışı dakikada 40°C’den fazladır. Sıcaklık zaman eğrisine göre sıcaklığın 10 dakika gibi kısa bir zamanda 600°C’ye ulaşacağı görülmektedir. Ancak donatı üzerindeki beton örtü çelikte sıcaklığın yükselme hızını engellemektedir. Örneğin 3 cm paspayı olan bir betonarme elemanda 600°C’lik ve 1 saatlik yangın yüklemesinde çeliğin sıcaklığı 350°C’yi aşmamaktadır (Akman, 1992). Nispeten büyük boyutlu beton elemanlar, davranışlarında yapının son durumunu önemli derecede etkileyen iyi bir eğilim gösterirler. Bu nedenle, betonda mikroyapısal değişiklikler göz önüne alındığında malzemenin homojen olmaması ve elemanların geometrisi hesaba katılması gereken iki önemli unsurdur. Gerçek bir yangında beton elemanın geometrisi ve boyutları kritik bir rol oynar. Şekil 2.2’de kare bir kolonda farklı zamanlarda sıcaklık değişimi görülmektedir (Andrade vd., 2003a). Betonarme veya betonarme-çelik kompozit elemanların yangına karşı 2 saat dayanabilmesi için, içindeki çelik profil veya donatının en dışta kalan kısımları olan pas payının, kolonlarda en az 4 cm ve döşemelerde en az 2.5 cm kalınlığında beton ile kaplanmış olması gerekmektedir (Binaların Yangından Korunması Hakkında Yönetmelik, 2002).



Şekil 2.2 380 mm boyutlu kare kolonda sıcaklık dağılımı (Andrade vd., 2003a)

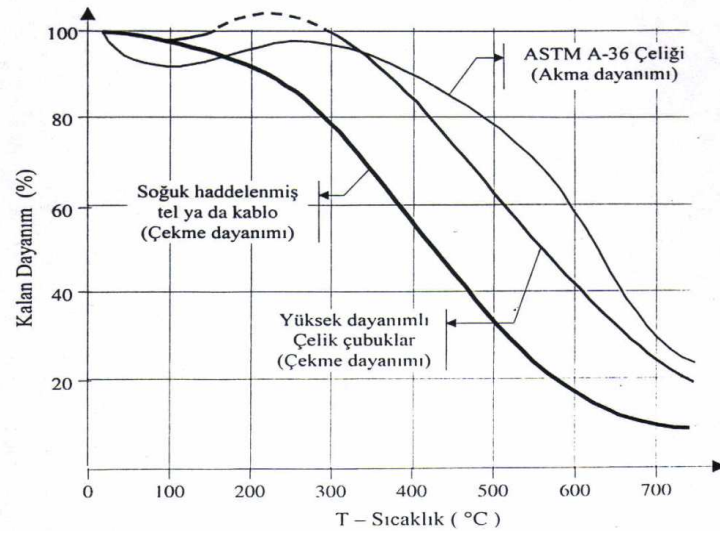
Yapılan deneysel çalışmalar, yüksek sıcaklığa maruz betonarme elemanların aderans dayanımının azaldığını ve betonarme yapıların yüksek sıcaklığa karşı davranışını belirlemedeki temel değişkenin aderans dayanımı olduğunu ortaya koymaktadır. Çünkü kritik beton sıcaklıkları, her zaman kritik aderans sıcaklığından daha büyük olmaktadır. Diederichs ve Schneider tarafından yapılan deneysel çalışmada, 172 mm çapında ve 191 mm yüksekliğindeki silindirik beton numuneler içerisine çeşitli özellikteki donatılar yerleştirilmiş ve bu numunelerde çekip çıkarma deneyleri yapılmış, sıcaklığın yükselmesi ile aderansa belirgin bir düşüş gözlenmiştir (Şekil 2.3). Çeliğin düz veya nervürlü olması da aderansa etki etmektedir (Chiang ve Tsai, 2003; Diederichs ve Schneider, 1981).



Şekil 2.3 Çeliğin aderans-sıyrılma ilişkisi (Diederichs ve Schneider, 1981)

2.2.1 Yüksek Sıcaklığın Betonarme Çeliğine Etkileri

Betonarme elemanlardaki çelik donatı çevresel faktörlerden beton örtü ile korunmaktadır. Yüksek sıcaklık etkisinde çeliğin davranışı incelendiğinde 200°C’de dislokasyonların yoğun olduğu tane sınırlarına azot atomlarının difüzyonu sonucu, çeliğin çekme dayanımında artış görülse de, 300°C’de çekme ve akma sınırlarının düşeceği, 600°C’de çekme dayanımının güvenlik bölgesinin de altına ineceği, yangın esnasında ulaşılabilecek 600-1200°C’de ise plastik deformasyon yapacağı bilinmektedir (Akman, 2000). Farklı tür yapı çeliklerinin akma ve çekme dayanımlarının sıcaklıkla değişimi Şekil 2.4’te verilmiştir.



Şekil 2.4 Farklı tür yapı çeliklerinin akma ve çekme dayanımları (Baradan vd., 2002)

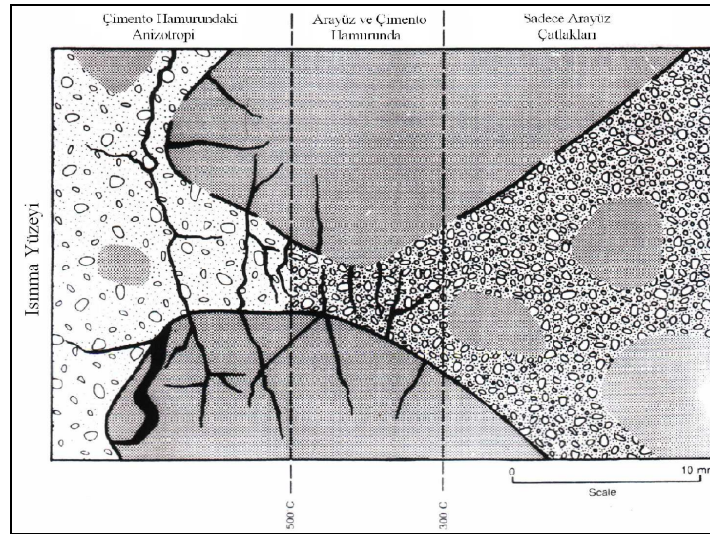
Yüksek sıcaklığa maruz kalan yapı elemanlarında, gerilme altında bulunan çeliğin elastisite modülünde de düşmeler görülmektedir. Çeliğin elastisite modülü, 400°C’de %15, 600°C’de ise %40 mertebelerinde azalmaktadır. Bu azalma termik genleşme ve plastik deformasyonların başlaması sonucu çeliğin aşırı uzamasına sebep olacaktır. Yüksek sıcaklık etkisinden korunması gerekliliği göz önüne alındığında betonun çelik donatıyı yüksek sıcaklık etkisinden de koruduğu görülmektedir. Bu durumda betonun, örtü kalınlığı (pas payı) ve gerekli termik izolasyonu sağlaması önem kazanmaktadır (Akman, 2000; Baradan vd., 2002).

Yüksek sıcaklık etkisinde maksimum sıcaklık, soğuk işlem görmüş çeliklerde 450°C’den ve sıcak haddelenmiş çeliklerde 600°C’den az ise akma dayanımı soğumanın ardından tekrar kazanılır. Öngerilmeli çelikler daha hızlı zarar görürler ve çekme dayanımında büyük azalmalar görülür (Alonso vd., 2003a).

2.2.2 Yüksek Sıcaklığın Betona Etkileri

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). Yüksek sıcaklık etkisi altında betonun kimyasal kompozisyonu, fiziksel yapısı ve su muhtevası değişir. Bu

değişiklikler öncelikle çimento hamurunda olmak üzere agregada da gözlenir (Bazant ve Kaplan, 1996). Beton yüksek sıcaklık etkisinde kaldığında, düşük ısı iletkenliğine sahip yüzey tabakasının oluşması ile ısı yayılımı azalır. Bunun sonucu olarak yüksek sıcaklığa maruz yüzey ile betonun iç kısımları arasında sıcaklık farkları oluşur. Riley (1991) bir deneysel çalışmada, 30 mm çapında 60 mm yüksekliğinde silindir harç numuneleri yüzeyden itibaren ısıtmış ve sıcaklıkları 5 adet termokupul ile ölçerek izotermeleri çizmiş ve bu noktalardan aldığı ince kesitlerin analizi ile betonun fiziksel özelliklerinin bu izotermelere benzer değişimler gösterdiğini belirtmiştir. Şekil 2.5'te görüldüğü gibi çatlak kısım bütün numunelerde, yüksek sıcaklığa maruz kalan yüzeyinden itibaren 25-30 mm içeriye girmiştir. 300°C'den daha düşük sıcaklığa maruz kalan bölgelerde yerel arayüz çatlakları, 300-500°C arasında arayüz ve çimento pastasında, 500°C'nin üzerindeki sıcaklıklarda ise çimento pastasında ve agrega tanelerinde ciddi çatlaklar meydana gelmiştir. Bu da betonun anizotropik özelliğinin başlangıcıdır. Yüksek sıcaklığa maruz kalmış bir betonda anizotropik özellikler gözleniyorsa, sıcaklık 500°C'yi aşmış demektir (Riley, 1991).



Şekil 2.5 Yangın hasarı görmüş betonun izotermine bağlı özellikleri (Riley, 1991)

Beton, günümüzde yüksek dayanımı, uygulama kolaylığı ve diğer önemli mekanik özelliklerinden dolayı yaygın kullanılan bir yapı malzemesidir. Betonun mekanik özelliklerinin performansını arttırmak, porozite ve permeabilitesinin düşük olması ile mümkündür. Ancak bu durum yüksek sıcaklık etkisine maruz kalındığında betonun performansının azalmasına neden olur. Son yıllarda görülen tünel yangınlarında betonda patlama ve parça atmalar görülmüştür. Betonda meydana gelen bu hasara, ısı farkının yükselmesi ile oluşan yüksek termomekanik gerilme ve düşük permeabiliteden dolayı dışarı çıkamayan suyun meydana

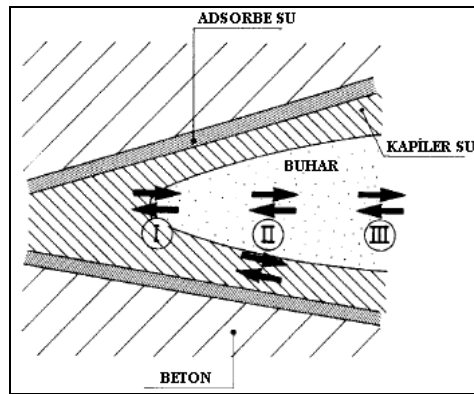
getirdiği su buharı basıncı neden olur (Kanema vd., 2007). Yüksek sıcaklık etkisinde oluşan parça atmalar, yapı elemanının yük taşıma kapasitesini ve bütünlüğünü kaybetmesine neden olur. Parça atmalar sonucu donatılar yüksek sıcaklığa maruz kalırlar. Parça atmaları azaltmak için termal bariyer, polipropilen lif, hava sürükleyici, büyük boyutlu elemanlar ve düşük termal genleşmeye sahip agrega kullanmak gerekir (Khoury, 2003b).

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 (Riley, 1991; Akman, 2000).

Beton, farklı termal karakteristiklere sahip bileşenleri, farklı nem muhtevası ve poroziteden dolayı yüksek sıcaklık karşısında karmaşık bir davranış sergiler (Li vd., 2004). Bu nedenle betonun yüksek sıcaklık etkisindeki davranışı, çimento hamuru, agregalar ve mineral katkı maddeleri gibi bileşenlerini ve özelliklerinin değişimi için aşağıda ayrı ayrı ele alınmıştır.

2.2.2.1 Çimento Hamuru

Çimento hamuru ilk ısıtma boyunca oldukça kararsız bir bileşendir, çünkü sıcaklık etkisi ile önemli fiziksel ve kimyasal dönüşümler geçirir. Bu dönüşümlerde, 100°C ve altındaki sıcaklıklarda serbest suyun buharlaşması, 100°C'den sonra kimyasal bozulma ve bağlı suyun kaybı önemli bir rol oynamaktadır (Khoury, 1992). Şekil 2.6'da basitleştirilmiş boşluk suyu transferi görülmektedir. (I) suyun buharlaşması veya yoğunlaşmasını, (II) betonun içine suyun transferini, (III) ise suyun dış çevreye transferini temsil etmektedir (Andrade vd., 2003b).

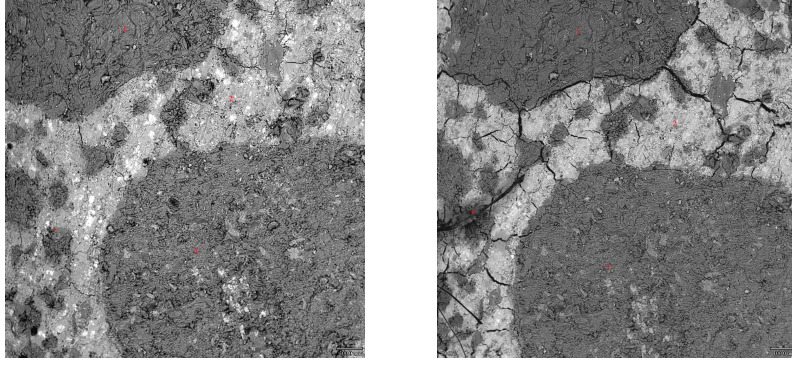


Şekil 2.6 Boşluk suyu transferi (Andrade vd., 2003b)

Bilindiği gibi betonun basınç dayanımı, porozitesi ile ilişkilidir. Betonun porozitesi arttıkça basınç dayanımı azalır (Vodak vd., 2004). Beton bünyesinde boşluklar, jel boşlukları, kapiler boşluklar ve hava boşlukları olmak üzere üç farklı şekilde bulunmaktadır. Betonun katı

fazlarını oluşturan çimento hamuru ve agregası, yüksek sıcaklığa maruz kaldığında betonun 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 genişir. 200°C'nin üstünde farklı yoğunlukların etkisiyle büzülür, bu sırada da agregası genişir. Bütün bu değişiklikler gözenek boyutunu büyütür (Alonso vd., 2003b). 500°C'ye kadar kapiler ve jel suyunun ayrılması toplam boşluk hacminde önemli bir artışa neden olur (Haddad vd., 2004). Kendiliğinden yerleşen betonlar üzerinde yapılan çalışmada 20-150°C arasında porozitenin çok az değiştiği, 150-300°C'ler arasında farklı hidratlardaki suyun bünyeden uzaklaşarak poroziteyi arttırdığı ve ilk çatlakların gözlemlendiği, 300°C'den sonra çatlakların çoğalarak poroziteyi %7 oranında arttırdığı tespit edilmiştir (Fares vd. 2010). 600°C'ye kadar toplam boşluk hacmi artar. Bu artış beklenenden fazladır ve ağırlık kaybıyla benzerlik gösterir. Bunun nedeni katı fazın bozularak boşlukların artması veya oluşan mikro çatlaklar olabilir. Daha yüksek sıcaklıklarda küçük boşlukların oranı azalır, bu da 900°C'nin üzerindeki sıcaklıklarda sinterleşmeye neden olabilir (Alonso vd., 2003b).

Yüksek termal gerilmelere maruz kalmış betonlarda çatlak oluşumunun birçok nedeni vardır. Çimento hamurundaki mikro çatlakların varlığı, sertleşirken oluşan rötrenin 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 mikro çatlaklar 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., 2003b). Silis esaslı kum kullanılarak üretilmiş silis dumanı katkılı harçta yüksek sıcaklık (600°C) etkisi öncesi ve sonrası elektron mikroskoptan alınan görüntülerde (Şekil 2.7) çimento hamurunda, arayüzde ve kısmen agreganın kendisinde de çatlakların oluştuğu görülmektedir (Kızıllıkanat ve Yüzer, 2008).



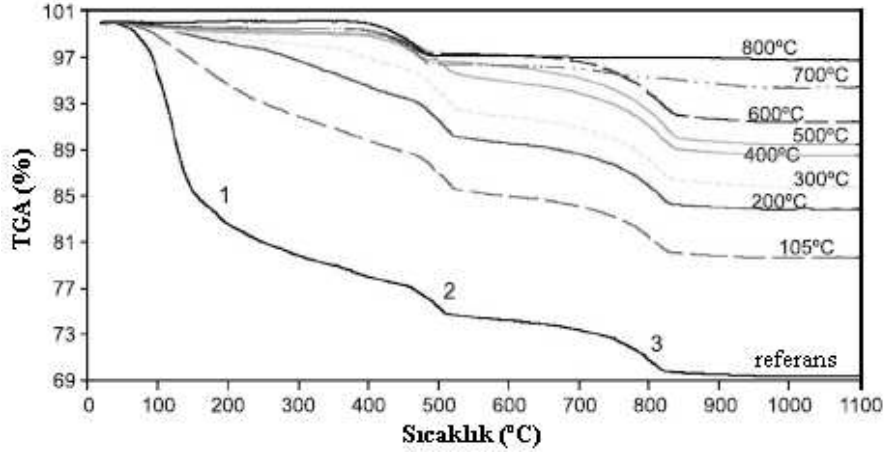
Şekil 2.7 Harçta sıcaklık etkisi öncesi ve sonrası (600°C) SEM görüntüsü (Kızıllkanat ve Yüzer, 2008)

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 örtüsünün tahrip olması sonucu donatı daha yangının başlangıcında sıcak gazla temasa geçer (Akman, 2000).

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 artışına neden olur. Bu hacim değişimleri sonucu bünyede çatlaklar oluşur, beton ufalanır, boşluklu bir yapıya dönüşür. Ca(OH)_2 'nin boşluklardan süzülmesi yangın sonrasında yüzeyde beyaz lekeler oluşturur. Bu lekelerin varlığı yangında sıcaklığın 530°C'nin üzerine çıktığının kanıtıdır. Yüksek fırın cürufu ve alüminli çimentolarla üretilen betonlarda Ca(OH)_2 'nin az olması nedeni ile bu lekeler daha az olabilir (Akman, 2000).

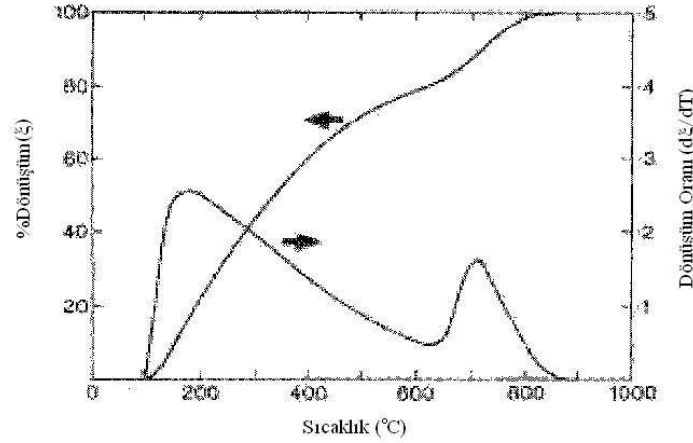
Şekil 2.8'de Ruiz vd. (2005) tarafından yapılan termogravimetrik analizde (TGA) üç önemli ağırlık kaybı görülmektedir. İlk ağırlık kaybı 100-200°C arasında CSH, karboalüminatlar ve etrenjit gibi birçok hidratın dehidratasyonu, ikinci ağırlık kaybı 450-550°C arasında portlanditin dehidroksilasyonu ve üçüncü ağırlık kaybı ise 750-850°C arasında klinker ve filler malzemeden gelen kalsiyum karbonatın dekarbonasyonu ile oluşur. Dehidroksilasyon ve dekarbonasyon reaksiyonları birbirleriyle ilişkilidir. 700-800°C'nin üstünde portlandit

artarken dekarbonasyon reaksiyonları azalır. Bunun ana nedeni portlanditin fırın içinde soğurken yeniden kristalleşmesidir.



Şekil 2.8 Yüksek sıcaklığa maruz kalan çimento hamurunun TGA eğrileri (Ruiz vd., 2005)

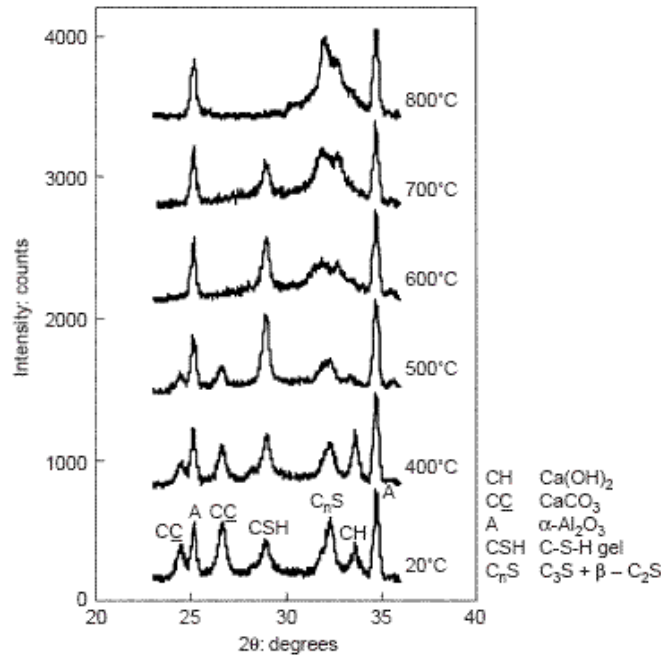
Ca(OH)_2 'in CaO ve H_2O 'ya dönüşümü 500°C civarında olurken, Şekil 2.9'da görüldüğü gibi CSH'nin dehidratasyonu 110°C 'den itibaren başlamaktadır (Scherefller, 2003). Her iki olay da çimento pastasındaki katı madde miktarının azalmasına sebep olur.



Şekil 2.9 Tobermoritin sıcaklığa bağlı dehidratasyonu (Scherefller vd., 2003)

Peng vd. (2001) tarafından, farklı sıcaklıklara maruz kalan çimento hamurunda yapılan XRD (X-ray diffraction) testi sonuçlarına göre, 400°C 'de CSH jelinin, kalsiyum hidroksitin (CH) ve kalsiyum karbonatın (CC) bozunmadığı, sıcaklık 500°C 'ye ulaştığında sadece CH ve CC'nin bozulduğu gözlenmiştir. CSH yapıda bozulmaların ise 600°C ve üzeri sıcaklıklarda meydana geldiği tespit edilmiştir (Şekil 2.10). Bu bozulmalar, CSH'nin dehidrate olarak β -dikalsiyum

silikat, β -wollastonite ve suya dönüşümü ile meydana gelir ve 850°C'de CSH tamamen dehidrate olur (Bazant ve Kaplan, 1996).



Şekil 2.10 Farklı sıcaklıklara maruz çimento hamuru XRD diyagramları (Peng vd. 2001)

2.2.2.2 Agregat

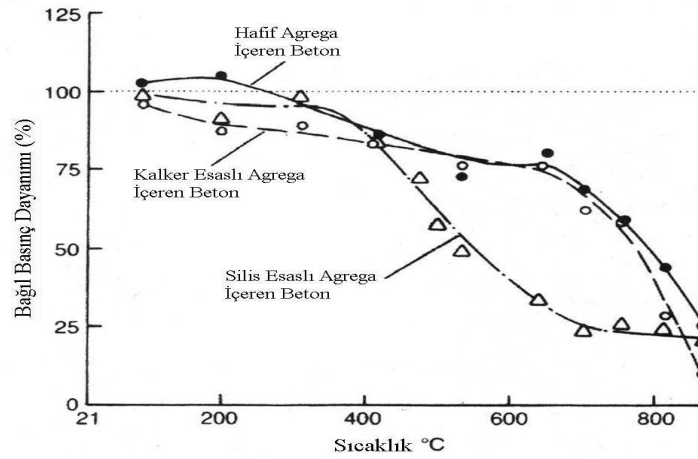
Agregatlar betonda %60-80 arasında bir hacmi doldururlar. Özelliklerindeki farklılıklar ısıtma sırasında betonun termal genleşme katsayısı ve termal iletkenliğini ve performansını önemli derecede etkiler (Alonso vd., 2003a). Agregatların yüksek sıcaklıkta betona etkisi mineral yapılarına ve boşluk oranına bağlıdır (Bazant ve Kaplan, 1996).

Silis esaslı agregatlar için kritik sıcaklıklar 250°C ile 575°C'ler arasındadır (Perkins, 1986). Kumların büyük çoğunluğunu teşkil eden kuvarz, 575°C'de yaklaşık %5.7'lik bir hacim artışı ve endotermik bir reaksiyonla α -kuvarztan (trigonal) β -kuvarza (hexagonal) dönüşür (Alonso vd., 2003a).

Kalker ve dolomitten oluşan agregatlar 700°C'ye kadar kararlıdır (Alonso vd., 2003a). 800-900°C'lerde CaO ve MgO'ya dönüşüm söz konusudur (Akman, 2000). Kalkerin ve dolomitin kalsinasyonu endotermik bir olaydır ve sıcaklığın etkisi ile CO₂'nin ayrışması, MgO ve CaO'nun oluşması büzölmeye neden olur (Khoury, 1992). Gerek soğuma esnasında ortamdaki nemin absorplanması gerekse söndürme anında sıkılan suyun etkisiyle Ca(OH)₂ tekrar oluşur. Bu büzölme ve genleşmeler dayanımda ciddi azalmalar meydana getirir (Perkins, 1986).

Nükleer reaktörlerde kullanılan ağır betonlar 400-800°C arasında sıcaklığa maruz kalırlar. Sakr vd. (2005) tarafından yapılan deneysel çalışmada çakıl (kum), barit (BaSO_4) ve ilmenite (FeTiO_3) agregaları kullanılarak üretilen betonlar 250, 500, 750 ve 950°C'ye maruz bırakılmıştır. Kontrol deneyleri sonunda ilmenite kullanılarak üretilen ağır betonlar fiziksel ve mekanik açıdan en yüksek performansı göstermiştir.

Khoury'nin (1992) yapmış olduğu bir derlemede Abrams'ın çalışmasına yer verilmiş ve bu çalışmada üç farklı tür agreganın kullanıldığı beton numunelere yüksek sıcaklık etkisi araştırılmıştır. Çalışmada 600°C'ye kadar ısıtılan kalker esaslı ve hafif agregalı betonların basınç dayanımlarının silis esaslı agregalara göre daha yüksek olduğunun gözlemlendiği belirtilmiştir (Şekil 2.11).



Şekil 2.11 Beton basınç dayanımının agregat türüne göre sıcaklıkla değişimi (Khoury, 1992)

Granit ve bazalt gibi volkanik kayalar ise 1000°C'ye kadar kararlı yapıda kalabilmektedir. Ancak sıcaklığın aniden artması ve azalması parçalanmalara neden olabilir (Perkins, 1986).

Pomza, sünger cüruf (foamed slag) ve genleştirilmiş kil ürünleri gibi hafif agregaların yangın dirençleri yüksektir. Hafif agregalardan üretilmiş betonların ısı iletkenliği düşüktür (Shoaib vd., 2001).

Allen ve Desai (1967) tarafından yapılan deneysel bir çalışmada farklı tip agregaların kullanıldığı betonlar 300°C sıcaklığa maruz bırakılmış, agregat olarak killi ateş tuğlasının kullanıldığı betonlar, en iyi mekanik özelliği göstermiştir. Genellikle silis içermeyen agregalar, örneğin kalker ve volkanik kökenli agregalar ile üretilen betonlar yüksek sıcaklık etkisine karşı daha dayanıklıdır (Postacıoğlu, 1987).

Günümüzde yüksek sıcaklık etkisi altındaki betonun gerilme-birim şekil değiştirme ana parametreleri, fiziksel ve ısı özellikleri, üretimde kullanılan agrega türüne göre farklı değerler ve bağıntılarla ifade edilmektedir (TS EN 1992-1-2, 2006).

2.2.2.3 Mineral Katkı Malzemeleri

Beton, uygulama alanlarında daha iyi performans göstermesi için son yirmi yılda geliştirilmiş ve gerek kimyasal gerekse mineral katkı malzemelerinin kullanımı ile basınç dayanımları 80 MPa ve üzeri olan betonlar üretilmiştir (Kalifa vd., 2000; Neville 2000).

Yüksek dayanımlı ve dayanıklı beton birçok açıdan üzerinde çalışılan bir konudur. Yüksek performanslı beton, betonarme yapılarda kullanıldığında bir çok açıdan avantaj sağlasa da gevrek yapısı en zayıf yönüdür (Poon vd., 2004). Yüksek sıcaklığa maruz kaldığında yüksek performanslı betonda, normal betona göre özelliğini kaybedip parçalanma, dağılma gibi daha ciddi hasarlar oluşmaktadır. Yüksek sıcaklıkta dağılmaya ve parça atmaya sebep, yüksek performanslı betonun yoğunluğudur. İç yapıdaki sıkılık yangın direncini azaltır ve yüksek dayanımlı betonu normal betona göre yüksek sıcaklık etkisinde daha riskli duruma getirir (Kalifa vd., 2000; Chan vd., 2000). Yüksek sıcaklık etkisinde puzolanlardan beklenen fayda, kalsiyum hidroksitleri tüketerek CSH oluşumuna katkıda bulunmalarındır (Haddad vd., 2004).

Silis dumanı, uçucu kül ve cüruf gibi mineral katkı malzemelerinin kullanımı yüksek performanslı beton hazırlamada en etkin yoldur (Poon vd., 2004). Silis dumanı içeren betonlarda yüksek sıcaklıklara karşı direnç katkı miktarına ve dayanım düzeyine bağlı olarak değişebilmektedir. Silis dumanı %20'nin üzerinde olan yüksek dayanımlı betonların direnci normal betonlara göre daha azdır. Sıcaklık 300°C'yi aştığında jel adsorbe suyu serbest hale geçmekte, yüksek performanslı betonlarda kılcal boşlukların boyutu küçük olduğundan bu boşluklarda buhar basıncı artmakta, betonda büyük gerilmeler oluşmaktadır. Ortaya çıkan basınç etkisi, betonda patlamalara ve dağılmalara neden olmaktadır (Yeğinobalı, 2002; Baradan vd., 2002; Yüzer vd., 2004b). Poon vd. (2001) tarafından, yüksek sıcaklığın yüksek dayanımlı betona etkilerinin araştırıldığı çalışmada, silis dumanı katkılı beton numunelerde yapılan deneysel çalışmalardan örnekler verilmiş, bu örneklerden birinde %14-20 silis dumanı katkılı, basınç dayanımı 170 MPa olan beton numunelerde, 350°C'ye kadar olan sıcaklıklarda basınç dayanımının arttığı, yüksek sıcaklıklarda ise dayanımında ani bir düşüşün olduğu, 650°C'de çatlama, parça atma ve patlama şeklinde hasarlar görüldüğü belirtilmiştir. Aynı çalışmada verilen diğer bir örnekte ise %10 silis dumanı katkılı numunelerde, silis dumanının yüksek sıcaklık etkisinde betona herhangi bir yararının olmadığı ifade edilmiştir. Diğer bir

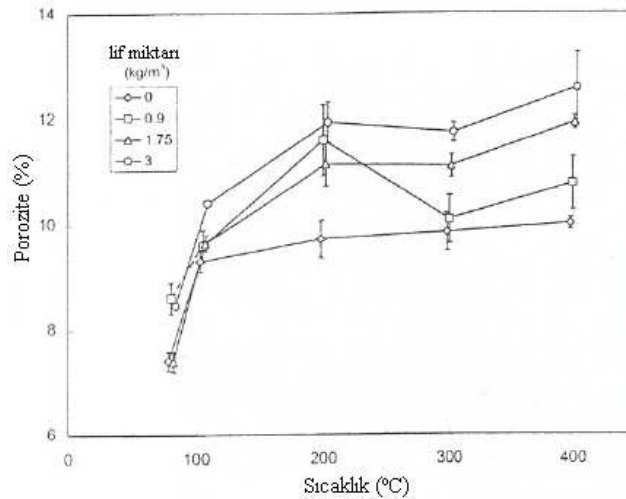
çalışmada %10 oranında silis dumanı katkısının yüksek sıcaklık etkisindeki çimento hamuruna olumlu yönde bir katkısının olmadığı, uçucu kül ve cüruf katkılı numunelerin silis dumanı katkılı ve katkısız göre daha iyi performans gösterdiği, mineral katkılar içerisinde en iyi sonuçların cüruf katkılılarda görüldüğü bildirilmiştir (Sarshar ve Khoury, 1993). Farklı su/çimento oranına sahip ve farklı oranlarda silis dumanı katkılı, yüksek dayanımlı betonların yüksek sıcaklık etkisi altında basınç dayanımındaki değişimin araştırıldığı bir diğer çalışmada, silis dumanı katkı oranının 300°C'ye kadar önemli bir etkisinin olmadığı bu sıcaklıktan sonra ise %10 silis dumanı katkılı betonun basınç dayanımındaki azalmanın, %6 silis dumanı katkılıya oranla daha fazla olduğu tespit edilmiş, yüksek sıcaklık etkisinde kalan betonda optimum su/bağlayıcı oranı ve silis dumanı ikamesi ise sırası ile 0.35 ve %6 olarak bulunmuştur (Behnood ve Ziari, 2008). Benzer çalışmalarda yüksek sıcaklık etkisi sonrası dayanım kaybının %10 oranında silis dumanı katkılı harç ve betonlarda katkısız göre daha fazla olduğu tespit edilmiştir (Aköz vd., 1995; Ghandehari vd., 2010).

Uçucu kül, 121-149°C'ler arasında, sıcaklığın ve basıncın etkisiyle CSH jelinden iki üç kat daha güçlü tobermorit jeli oluşturarak betonun basınç dayanımını %152 oranında arttırmaktadır. Oluşan tobermorit jeli termal uyumsuzluk gösteren agrega ile çimento hamuru arayüzünü güçlendirerek mikro çatlak oluşumunu engeller. Örneğin, uçucu kül katkısız betonlarda 200°C'de basınç dayanımı azalırken, uçucu kül katkılı betonların dayanımının arttığı tespit edilmiştir. Yüksek fırın cürufu ise yüksek sıcaklıkta diğer puzolanlara göre en iyi performansı göstermektedir (Poon vd., 2001; Tang ve Lo, 2009). Mendes vd. (2008) tarafından yapılan çalışmada %35, %50 ve %65 oranlarında, öğütülmüş yüksek fırın cürufu katkılı ve katkısız çimento ile üretilen dört seri çimento pastasının yüksek sıcaklık etkisi altındaki davranışı incelenmiştir. Yapılan thermogravimetric analizlerde cüruf katkılı çimento pastasının katkısız oranla ağırlık kaybının daha az olduğu görülmüştür. Aynı zamanda cüruf katkılı çimento pastasının yüksek sıcaklık etkisi altında mekanik özellikler bakımından da katkısız oranla daha iyi performans gösterdiği sonucuna varılmıştır. Silis dumanı katkılı betonlarda yüksek sıcaklıklara karşı direnç katkı miktarına ve dayanım düzeyine bağlı olarak değişmekle birlikte, %10'un üzerinde silis dumanı katkılı betonlar hariç tüm puzolan katkılılar, katkısız betonlara oranla yüksek sıcaklıklarda daha iyi performans göstermektedir (Poon vd., 2001; Yeğinoğlu, 2002).

2.2.2.4 Liflerin Etkisi

Malzemeler, özellikle çekme, eğilme ve çarpma dayanımları gibi mekanik dayanımlarının iyileştirilmesi, gevrek kırılma özelliğinin kısmen giderilebilmesi amacıyla liflerle donatılmaktadır. Çimento harçları ve betonların donatılmasında, asbest lifi, özel cam lifleri, çelik teller, polipropilen gibi polimer yapılı lifler, karbon lifleri ve selüloz, sisal, hindistancevizi lifleri gibi değişik bitkisel lifler kullanılmaktadır (Ersoy, 2001). Bunlardan en sık kullanılan polipropilen lifler ve çelik tellerin yüksek sıcaklık etkisinde davranışı aşağıda incelenmiştir.

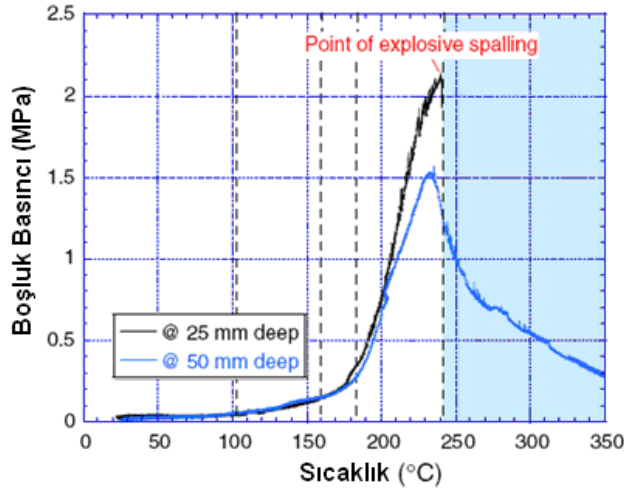
Polipropilen lifler, düşük ergime noktalarından dolayı betonun yüksek sıcaklık etkisi altındaki davranışını şu şekilde etkilerler; sıvılaştıran lif yakınındaki boşlukları doldurur fakat daha sonra organik bileşenlerinin bir kısmının buharlaşması sonucu poroziteyi artırır. Porozitedeki artış kullanılan lif içeriğiyle orantılıdır. Polipropilen lifler, yüksek performanslı betonlara ağırlıkça %0.05-0.1 oranında katıldıklarında parça atmaları engeller, çünkü 160°C civarında eriyerek porozitenin gelişmesini kolaylaştırır ve açık boşluklar oluşturarak buhar basıncını azaltırlar. Şekil 2.12’de porozitedeki artış polipropilen lif içeriğine bağlı olarak verilmiştir (Alonso vd., 2003b). Yangın sırasında yüksek sıcaklık etkisinde bu liflerin eriyerek su buharının sınır bölgelerden çıkabileceği, böylece yüzeylerdeki dökülmelerin engellenebileceği belirtilmektedir (Taşdemir vd., 2005).



Şekil 2.12 Polipropilen lif içeriğine bağlı porozite değişimi (Alonso vd., 2003b)

Phan (2008) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, normal dayanımlı (NSC) ve yüksek dayanımlı betonlarda (HSC) yüksek sıcaklık etkisi altında boşluk basıncı ölçülmüştür. Boşluk basıncının artmasına sebep olan tek etkenin, yapıdaki nemin farklı fazlara dönüşümü ve

taşınımı olduğu belirtilmiştir. Betonun boşluk basıncının 105-160°C’de belirgin bir şekilde oluştuğu 160-180°C’den itibaren ani bir şekilde arttığı ve 220-245°C’lerde en yüksek değerlere ulaştığı (2.1 MPa), bu noktadan sonra betonun parçalandığı ya da boşluk basıncının azaldığı tespit edilmiştir (Şekil 2.13). Lifli betonlarda yüksek sıcaklık etkisinde boşluk basıncının önemli ölçüde azaldığı, NSC betonlarda HSC’ye göre basıncın daha az olduğu sonucuna varılmıştır.



Şekil 2.13 Boşluk basıncı-sıcaklık ilişkisi (Phan, 2008)

Beton üretiminde kullanılan bir diğer lif türü olan çelik lifler yüksek sıcaklıklarda betonda çatlak oluşmasına katkıda bulunurlar. 500°C’nin üstünde okside olurlar. Okside olan çelik liflerin hacmi, çevresindeki dehidrat çimento hamuruna basınç uygular ve çatlakların ilerlemesini kolaylaştırır. Ultra yüksek dayanımlı betonlarda yüksek sıcaklıklarda patlamaların azalmasını sağlarlar (Alonso vd., 2003a; Alonso 2003b).

Betonarme yapıların yüksek sıcaklığa karşı davranışını belirlemedeki temel değişkenin aderans dayanımı olduğu bilinmektedir (Diederichs ve Schneider, 1981). Betonda çelik ve/veya polipropilen lif kullanılması yüksek sıcaklık etkisi altında beton ile çelik donatı arasındaki aderansı olumlu yönde etkilemektedir (Haddad vd. 2008).

2.2.3 Yüksek Sıcaklığın Betonun Termofiziksel ve Fiziksel Özelliklerine Etkileri

Yüksek sıcaklık, betonun ısı yayılımı, ısı iletkenliği, ısıl genleşmesi, özgül ısı ve buhar difüzyonu direnç faktörü gibi termofiziksel, birim ağırlığı ve rengi gibi fiziksel özelliklerine etki eder. Aşağıda yüksek sıcaklık etkisine maruz kalan betonun termofiziksel ve fiziksel özelliklerindeki değişimler ayrı ayrı ele alınmıştır.

2.2.3.1 Özgöl Isı

Bir cismin birim kütesinin sıcaklığını 1°C arttırmak için gerekli olan enerjiye özgöl ısı denir. Bu enerji genelde işlemin nasıl gerçekleştirildiğine bağlıdır. Özgöl ısı için genellikle kullanılan birim kJ/kg°C veya kJ/kgK'dir. Termodinamik, sabit hacimde (C_v) ve sabit basınçta (C_p) olmak üzere iki tip özgöl ısıyı inceler. Sabit basınç altındaki özgöl ısı C_p , sabit hacimdeki özgöl ısı C_v 'den daha büyüktür. Çünkü sabit basınç altında sistemin genişlemesine izin verilir ve bu genişleme işi için daha fazla enerjiye ihtiyaç duyulur (Çengel, 2006).

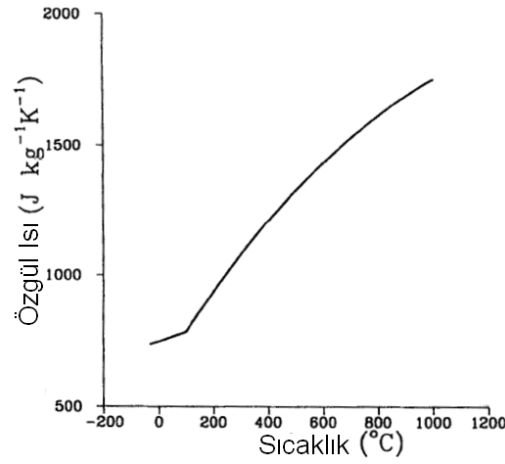
Sıcaklık ve basınç etkisi altında yoğunluğu değişmeyen cisimler sıkıştırılmaz cisim olarak adlandırılır. Katı ve sıvılarda birim kütenin hacmi sıcaklık ve basınç etkisi altında sabit kaldığından sıkıştırılmaz cisimlere benzerler. Sabit hacimdeki ve sabit basınçtaki özgöl ısılar sıkıştırılmaz cisimlerde birbirine eşittir ($C_p \cong C_v \cong C$). Bu cisimlerin özgöl ısıları yalnızca sıcaklığa bağlıdır. Bundan dolayı katı ve sıvıların iç enerjilerindeki değişim (ΔU , j), (2.1) bağıntısı ile belirlenir (Çengel, 2006).

$$\Delta U = m.C.\Delta T \quad (2.1)$$

Bağıntıda m, kütleyi, C, ortalama ölçüm sıcaklığı için özgöl ısıyı, ΔT , sıcaklık farkını temsil etmektedir.

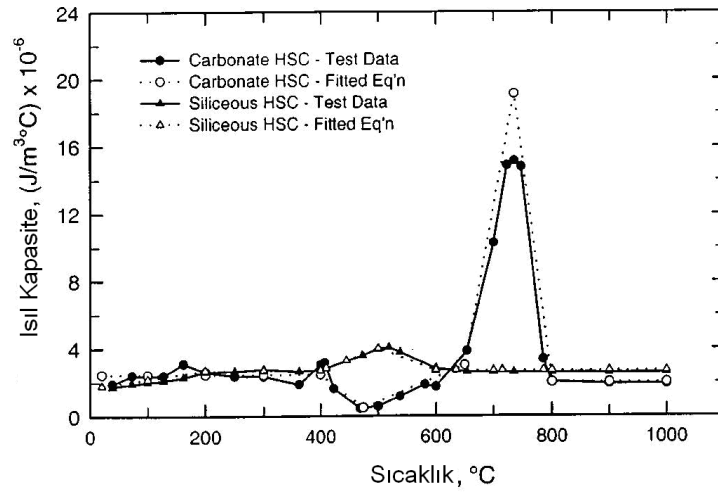
Ortam sıcaklığındaki normal betonun özgöl ısısı 0.50 ile 1.13 kJ/kgK (0.12-0.27 cal/g°C) arasında değişir. Normal sıcaklıklarda kullanılan agrega türü, karışım oranı ve yaşı, betonun özgöl ısısını önemli ölçüde etkilemez. Özgöl ısıyı etkileyen en önemli parametre betonun nem muhtevasıdır (Bazant ve Kaplan, 1996).

Yüksek sıcaklık etkisinde kalan betonun özgöl ısısı maruz kalınan sıcaklığa, kullanılan agrega türüne göre farklılıklar gösterir. Artan sıcaklıkla birlikte serbest suyun uzaklaşması ile özgöl ısı artar. Sıcaklık 100-850°C'ler arasında iken çimento pastasındaki jellerin dehidratasyonu endotermik bir reaksiyon olduğundan özgöl ısı normal değerinin birkaç katı kadar artar (Bazant ve Kaplan, 1996). Fransa'da inşa edilen bir nükleer enerji santraline ait beton numunelerde yapılan deneyler sonucunda yüksek sıcaklık etkisi altında betonun özgöl ısısının arttığı (Şekil 2.14) gözlenmiştir (Vodak vd., 1997).



Şekil 2.14 Betonun özgül ısısının sıcaklığa bağlı değişimi (Vodak vd. 1997)

Kodur ve Sultan (2003) tarafından yapılan çalışmada yüksek sıcaklık etkisinde kalan yüksek dayanımlı betonun (HSC) ısı kapasitesi araştırılmış, artan sıcaklık ile beraber özgül ısı olarak da ifade edilen betonun ısı kapasitesinin arttığı tespit edilmiştir (Şekil 2.15). Kalker esaslı agregâ ile üretilen betonun ısı kapasitesinde 150-400°C’ler arasında artış gözlenirken, bu artış silis esaslı agregânın kullanıldığı betonda 500°C’de görülmüştür. Bu sıcaklıklarda ısı enerjisinin büyük bir kısmı serbest ve kimyasal bağlı suyun bünyeden uzaklaştırılması için harcanmıştır. Malzemenin sıcaklığını arttırmak için harcanan enerji çok azdır. Silis esaslı agregânın kullanıldığı betonda ısı kapasitesindeki ani artışın 500°C’de görülmesi kuartzın bu sıcaklıkta polimorfik dönüşüme uğramasından kaynaklanır. 600°C’den sonraki sıcaklıklarda kalker esaslı agregâ ile üretilen betonun ısı kapasitesinin büyük oranda artması dolomitin ayrışmasından kaynaklanır (Kodur ve Sultan, 2003).



Şekil 2.15 Özgül ısı-sıcaklık ilişkisi (Kodur ve Sultan, 2003)

Yukarıda da açıklandığı üzere, yüksek sıcaklık etkisinde betonda meydana gelen fiziksel ve kimyasal reaksiyonlar ve bu reaksiyonların endotermik olması artan sıcaklıkla beraber betonun özgül ısısının artmasına neden olur (Bazant ve Kaplan, 1996).

2.2.3.2 Isı İletim Katsayısı

Isı, farklı sıcaklıklara sahip sistemler arasında enerji geçişi olarak tanımlanır. Isının birimi enerji birimi olan kJ'dur. Isı geçişi Q ile gösterilir. Birim zamanda geçen ısı ise Q 'nun zamana göre türevidir ve $\dot{Q}$ ile gösterilir, birimi kJ/s veya eşdeğeri kW'tır. Isı geçişi, farklı sıcaklıklardaki iki ortam arasında, yüksek sıcaklıktaki ortamdan düşük sıcaklıktaki ortama doğru olup, konduksiyon (iletim), konveksiyon (taşınım) ve radyasyon (ışınım) olmak üzere üç şekildedir. Konduksiyon (iletim), yüksek enerjili parçacığın kendine komşu daha düşük enerjiye sahip parçacığa enerji transferi ile gerçekleşir (Çengel, 2006).

Isı iletimi sıvılarda ve gazlarda moleküllerin rastgele hareketi esnasında çarpışarak yayılmaları (difüzyonu) ile meydana gelir. Katı cisimlerde ise atomların titreşerek serbest elektronların hareketleri sonucunda enerjinin taşınması ile gerçekleşir. Isı iletimi ortamdaki sıcaklık farkına, malzemeye ve kalınlığa bağlıdır. İki yüzey arasındaki sıcaklık farkı ve yüzey alanı ile ısı iletimi arasında doğru, tabaka kalınlığı ile ters orantı vardır (2.2) (Çengel, 2006).

$$\dot{Q} = \lambda.A.\frac{T_1 - T_2}{\Delta x} = -\lambda.A.\frac{\Delta T}{\Delta x} \quad (2.2)$$

Yukarıdaki bağıntıda λ malzemenin ısı iletim katsayısını, A alanı, ΔT sıcaklık farkını, Δx ise kalınlığı ifade etmektedir. Eşitlikte $\Delta x \rightarrow 0$ durumunda, ilk olarak 1822 yılında J. Fourier tarafından tanımlanan (2.3) bağıntısı elde edilir.

$$\dot{Q} = -\lambda.A.\frac{dT}{dx} \quad (2.3)$$

(2.3) bağıntısındaki $\frac{dT}{dx}$ ifadesi, T - x diyagramında herhangi bir x noktasındaki eğrinin eğimidir ve sıcaklık gradyanını temsil eder. Artan x değerleri için sıcaklık azaldığından eşitliğin başına (-) işareti gelmiştir (Çengel, 2006).

Malzemelerin farklı enerji depolama kapasiteleri (özgül ısı) olduğu gibi ısı iletme kabiliyetleri de farklıdır. Örneğin suyun ısı iletim katsayısı ~ 0.6 W/mK iken demirinki ~ 80.6 W/mK'dir (Çengel, 2006). Betonun ısı iletimi kullanılan agrega türüne ve nem muhtevasına bağlıdır. Farklı agrega türleri ile üretilmiş betonlara ait ısı iletim katsayıları Çizelge 2.1'de verilmiştir.

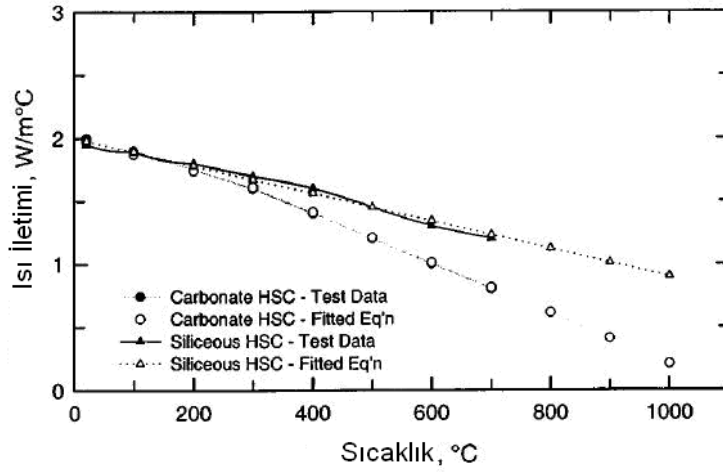
Çimento hamurunun ısı iletim katsayısı 1.1 W/mK ile 1.6 W/mK arasında değişir. Bu değer birçok agrega türünün ısı iletiminden daha düşüktür. Bundan dolayı betonda kullanılan agrega hacmi arttıkça ısı iletimi artar (Bazant ve Kaplan, 1996).

Çizelge 2.1 Agrega türüne göre betonun ısı iletim katsayısı

Agrega türü	Isı iletim katsayısı, (W/mK)
Silisli kayaçlar (quartz)	2.4-3.6
Kristal yapılı volkanik (granit, gnays), Tortul kayaçlar (kalker, dolomit)	1.9-2.8
Amorf yapılı volkanik (bazalt, dolorit)	1.0-1.6

Betonda kullanılan agrega türü ve miktarının yanı sıra nem oranı da ısı iletimine etki eden önemli parametrelerdendir ve nem miktarı arttıkça ısı iletimi artar. Havanın ısı iletim katsayısı 0.0034 W/mK iken bu değer suda 0.515 W/mK'dir. Bu yüzden betonun kuruması ısı iletimini azaltacaktır. Havada kurutulmuş bir betonun nem oranı doymuş haldeki betonun %50'si kadardır ve ısı iletimi doymuş haldeki betona göre %25 daha düşüktür (Bazant ve Kaplan, 1996).

Yüksek sıcaklık etkisinde kalan betonun, gözeneklerinden su kaybettiği, çimentonun dehidratasyonu ile boşluklu bir yapıya dönüştüğü ve ısı iletim katsayısının azaldığı bilinir (Aköz ve Yüzer, 1994). Çimento hamurunda meydana gelen büzülme ve mikro çatlaklar, artan boşluk oranı ısı iletimini düşürür. Agregada da ısı iletimi artan sıcaklıkla beraber azalır (Bazant ve Kaplan, 1996). Yüksek sıcaklık etkisine maruz kalan yüksek dayanımlı betonda yapılan deneysel çalışmada, ısı iletiminin artan sıcaklıkla beraber azaldığı (Şekil 2.16), 200-800°C'ler arasında silis esaslı agrega ile üretilen betonun ısı iletiminin kalker esaslı agregalı betona göre daha yüksek olduğu tespit edilmiştir (Kodur ve Sultan, 2003).



Şekil 2.16 Isı iletimi-sıcaklık ilişkisi (Kodur ve Sultan, 2003)

Shin (2002) vd. tarafından yapılan deneysel çalışmada 900°C'de betonun ısı iletim katsayısının %50 oranında azaldığı tespit edilmiştir.

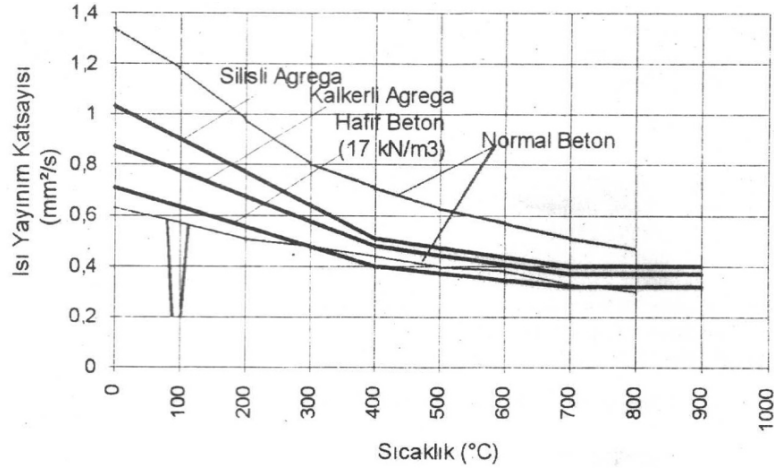
2.2.3.3 Isı Yayınımı

Malzemenin birim kütlede depoladığı ısı miktarı özgül ısı (C , J/kg°C) ile temsil edilirken, birim hacimde depolanan ısı enerjisi yoğunluk ile özgül ısıнын çarpımı ($\rho.C$, J/m³°C) ile hesap edilir. Depolanan ısı, malzemenin ısı iletme yeteneğine göre bünyede yayılacaktır. İletilen ısıнын depolanan ısıya oranı ısı yayınımını (α ,) verir (Çengel, 2006).

$$\alpha = \frac{\lambda}{\rho.c} \quad (2.4)$$

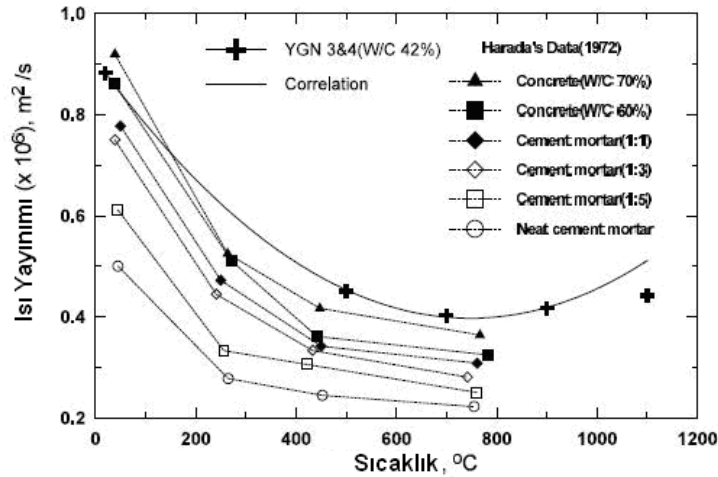
Yukarıdaki bağıntıda α , ısı yayınım katsayısıdır ve birimi m²/s'dir. Isı iletimi yüksek veya özgül ısı düşük malzemelerde ısı yayınımı yüksektir (Çengel, 2006). Betonun ısı yayınımı agregaya bağlıdır. Bazaltın ısı yayınım katsayısı 0.69x10⁻⁶ m²/s iken kuartzınki 2.78x10⁻⁶ m²/s'dir. Çimento pastasının ısı yayınım katsayısı normal agregalara göre daha düşüktür ve 0.31x10⁻⁶ m²/s ile 0.50x10⁻⁶ m²/s arasında değişir. Betonun ısı yayınım katsayısı ise agreganın %85'i kadardır ve 0.69x10⁻⁶ m²/s ile 1.89x10⁻⁶ m²/s arasındadır (Bazant ve Kaplan, 1996).

Isı yayınım katsayısı, Şekil 2.17'den de görüldüğü gibi, sıcaklık arttıkça azalmaktadır. Bu azalma özellikle 100°C civarında bünyedeki suyun buharlaşması nedeniyle daha belirgindir.



Şekil 2.17 Çeşitli betonlar için α ısı yayılım katsayısı (CEB, 1991)

Shin vd. (2002) tarafından yapılan deneysel çalışmada 900°C'de betonun ısı yayılım katsayısının %50 oranında azaldığı tespit edilmiştir (Şekil 2.18).

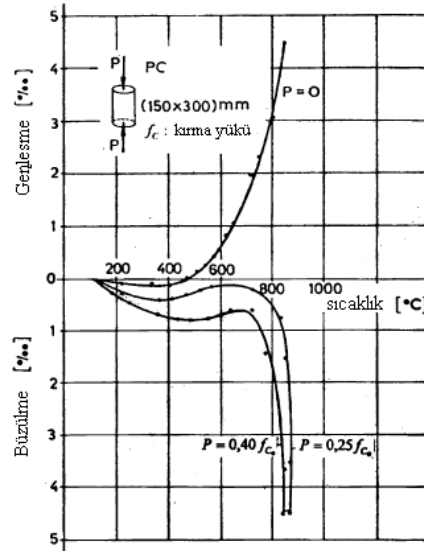


Şekil 2.18 Isı yayılım katsayısının sıcaklıkla değişimi (Shin vd., 2002)

2.2.3.4 Genleşme Katsayısı

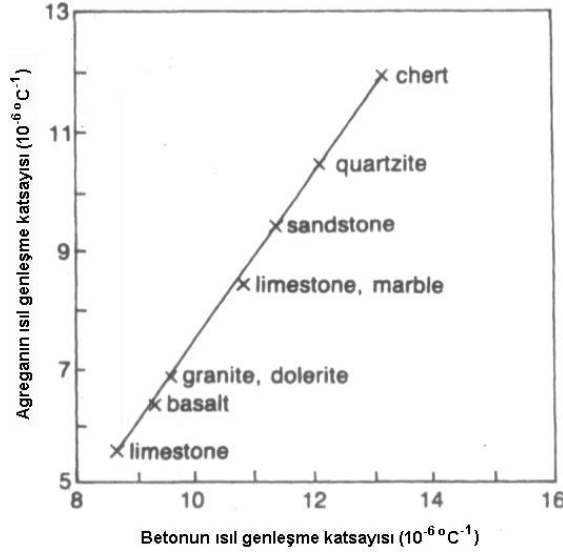
Malzemelerin şekil değiştirmesini de etkileyen ısıya ilişkin bir diğer özelliği de ısı genleşmesidir. Betonun genleşme katsayısı, üretimde %65-80 oranında kullanılan agregaların genleşmesine bağlıdır. Çimento hamurunun ısı genleşme katsayısı ($11 \cdot 10^{-6}$ - $20 \cdot 10^{-6}$ 1/°C) ile agregalarınkinden büyüktür. Agregaların ısı genleşme katsayısı içerdiği silis oranına bağlıdır. Yüksek oranda silika içeren quartz gibi doğal taşların ısı genleşme katsayısı kalkerle göre daha yüksektir. Farklı agregalar ile üretilen betonların ısı genleşme katsayılarındaki değişim Şekil 2.19'da verilmiştir. Yüksek sıcaklık etkisi altında çimento hamurunda 150-300°C

üzerinde büzülme gözlenirse de betonun ısı genleşmesi artar. Bunun sebebi agregada gözlenen genleşmenin çimento hamuru büzülmesine oranla daha baskın olmasıdır (Bazant ve Kaplan, 1996). Papayianni vd. (2005) tarafından Şekil 2.18’de görüldüğü üzere 150 mm çapında 300 mm yüksekliğindeki silindir beton numunelerde yüksek sıcaklık etkisi esnasında yapılan ölçümlerde yüksüz durumda 400°C’ye kadar büzülme daha sonra genleşme gözlenmiştir.



Şekil 2.19 Betonda sıcaklık deformasyon ilişkisi (Papayianni vd., 2005)

Yüksek sıcaklıklarda termik genleşmelerdeki farklılıklardan (Şekil 2.20) dolayı oluşan gerilmeler çimento hamuru ile agregaya arayüzünde çatlamalara neden olur. Kullanılan agreganın türü yüksek sıcaklık etkisi altında kalan betonun genleşmesinde önemli rol oynar. Örneğin 600°C’ye maruz silis esaslı agregaya ile üretilen betonun genleşmesi kalker esaslı agregaya ile üretilen betonun yaklaşık iki katı kadardır. Birçok betonda 600-800°C’den sonra genleşme gözlenmez. Bu sıcaklıklarda çimento hamuru ve agregadaki kimyasal ve fiziksel dönüşümler betonun büzülmesine neden olur (CEB, 1991; Bazant ve Kaplan, 1996; Bonnel ve Harper, 1950; Postacıoğlu, 1987).



Şekil 2.20 Beton ve agreganın ısı genleşme katsayıları ilişkisi (Bazant ve Kaplan, 1996)

2.2.3.5 Isı Şoku Parametresi

Gevrek malzemelerde sıcaklık değişimleri hızlı ve sıcaklık gradyanı yüksek ise büyük ısı gerilmeler ve dolayısıyla çatlamlar oluşabilir. Isıl şoku denilen bu olay ısı iletimine ve ısı genleşmeye büyük ölçüde bağlıdır. Isı iletimi yüksek ve ısı 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 mukavemetlilerde büyük, ısı genleşmesi ve elastisitesi büyük olanlarda ise küçük olur. Bu etkenlere bağlı olarak ısı şoku parametresi (P), λ ısı iletim katsayısına, α ısı genleşme katsayısına, σ_c malzemenin çekme mukavemetine ve E elastisite modülüne bağlı olarak 2.5 bağıntısı ile hesaplanır (Onaran, 1999).

$$P = \lambda \sigma_c / E \alpha \quad (2.5)$$

2.2.3.6 Buhar Difüzyonu

Atomların, iyonların ve diğer parçacıkların sıcaklığa bağlı olarak yer değiştirmeleri istatistiksel bir olaydır ve difüzyon olarak adlandırılır. Difüzyon, özellikle katı malzeme içinde kütle taşınmasını sağlayacak ölçekteki hareketleri tanımlar. Derişiklik farkları, parçacıkların belirli yönde hareket etmelerine neden olur. Bu olay matematiksel olarak (2.6) bağıntısında verilen 1.Fick Kanunu ile ifade edilebilir (Bagel ve Zivica, 1997).

$$dm_A = -D \frac{dc_A}{dx} S dt \quad (2.6)$$

Bağıntıda; dm_A , derişiklik gradyeninin dc_A/dx olması durumunda, dt süresinde ve yayınma yönüne dik S yüzeyinden geçen A maddesi miktarını, D ise difüzyon katsayısını ifade etmektedir.

Her yapı malzemesi için karakteristik olan su buharı difüzyon direnç faktörü, TS EN 12086'ya (2002) göre aşağıda verilen (2.7) bağıntısı ile hesaplanır.

$$\mu = \frac{\delta_{hava}}{\delta} \quad (2.7)$$

Bağıntıda, δ_{hava} , havanın su buharı özgeçirgenliğini, δ ise malzemenin su buharı özgeçirgenliğini ifade eder. Hem havanın, hem de malzemenin su buharı özgeçirgenlikleri barometrik basınca bağılı olduğu için bunların birbirine oranı μ , barometrik basınçtan bağımsız sayılabilir (TS EN 12086, 2002).

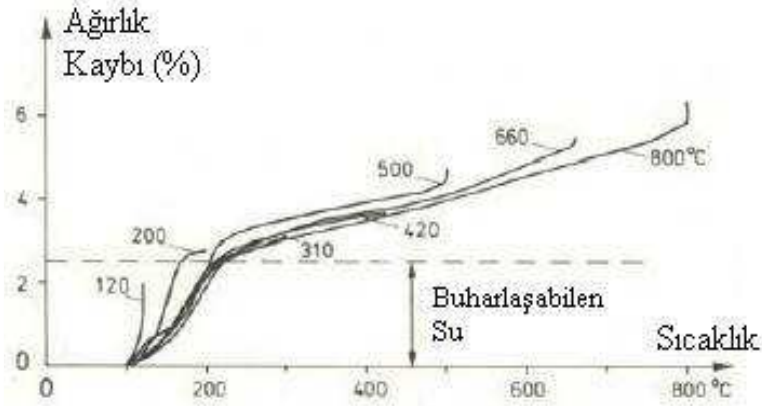
Kearsley ve Wainwright (2001) tarafından yapılan çalışmada yoğunluğun artması ile betonun su buharı geçirirmliliğinin azaldığı dolayısı ile su buharı difüzyon direncinin arttığı ifade edilmiştir. Diğer bir deneysel çalışmada da betona hava sürükleyici katılması durumunda toplam porozite arttıkça su buharı difüzyon direnç faktörünün %30 oranında azaldığı tespit edilmiştir (Kabay, 2009).

Yukarıdaki anlatılan çalışmalardan da anlaşılacağı üzere betonda boşluk oranının artması buhar difüzyonu direnç faktörünün azaltır. Yüksek sıcaklık etkisine maruz kalan betonda gerek çimento hamurunda gerekse çimento hamuru-agrega arayüzünde oluşacak çatlaklar poroziteyi arttıracığından buhar difüzyonu direnç faktörünün azalmasına neden olacaktır. Vejmolikova (2008) vd. tarafından yapılan deneysel çalışmada, yüksek dayanımlı beton numuneler 600°C sıcaklığa maruz bırakılarak numunelerde rastgele çatlaklar oluşturulmuş ve sıcaklık etkisinden dolayı oluşan çatlakların betonun higroskopik, termal ve mekanik özelliklerini önemli ölçüde değiştirdiği sonucuna varılmıştır. Aynı çalışmada betonun su buharı difüzyonunun termal etki sonrası oluşan çatlaklardan dolayı %50 oranında arttığı tespit edilmiştir.

2.2.3.7 Birim Hacim Ağırlığı

Sıcaklığın artması ile boşluklardaki suyun buharlaşması sonucu ağırlık azalır, genleşme nedeniyle hacim artar (Aköz vd., 1995). Porozite ve su içeriği betonun yangından sonraki hasar kontrol parametreleridir (Andrade vd., 2003a). Isıtma sırasında betondaki ağırlık kaybı genellikle porozitenin artmasıyla sonuçlanır. Bu artış normal ve yüksek dayanımlı betonlar için yaklaşık lineer bir artıştır. Buna karşın ultra yüksek dayanımlı betonlar için bu geçerli değildir. Anhidrit çimento tanelerinin çokluğu ve kılcal boşlukların neredeyse olmaması buharın salıverilmesini zorlaştıran nedenlerdir, fakat ağırlık kaybının derecesi arttıkça porozite etkili bir şekilde artar (Alonso vd., 2003b). Ağırlık ve hacimdeki bu değişimler sonucu birim hacim ağırlığı (β) azalır. Ancak bu azalma ihmal edilebilir düzeydedir (Aköz vd., 1995).

Anderberg-Thelanderson sıcaklığın etkisi ile birim ağırlığın azalmasına sebep olan ağırlık kaybını silis esaslı agregası ile üretilen betonda araştırmış, bu çalışma sonucunda ağırlık kaybının sıcaklıkla değişimi Şekil 2.21’de verilmiştir. Schneider ve Bazant yaptıkları çalışmada 1000°C’ye kadar yoğunluğun %11-13 arasında azaldığını belirtmişlerdir (Anderberg, 2003).



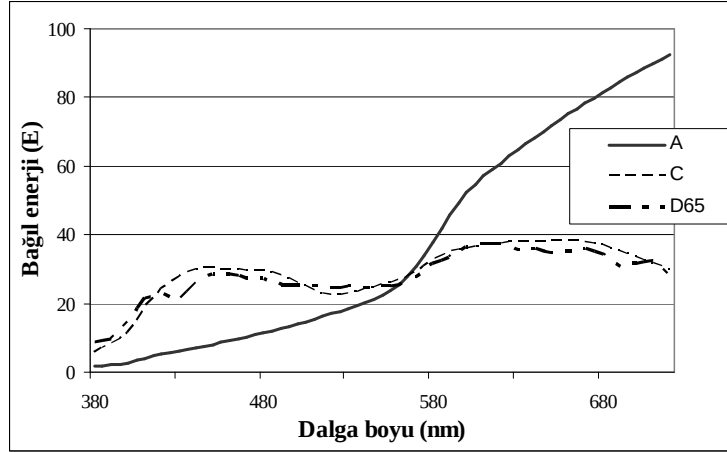
Şekil 2.21 Ağırlık kaybının sıcaklıkla değişimi (Anderberg, 2003)

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, mikroyapının yoğunluğunun artmasına yardımcı olur. Bunu yüksek sıcaklık etkisinden sonra dehidrate olmuş çimento hamuru bileşenlerinin tekrar hidrate olmasını sağlayarak yapar (Alonso vd., 2003b).

2.2.3.8 Renk

Renk cisimlerin fiziksel özelliklerinden biridir. Rengin görülmesi kaynağından çıkan ışığın yüzeyden yansıyarak göze ulaştığında, gözdeki ağtabaka üzerinde oluşturduğu etkinin beyin tarafından algılanması ile olur (Paksoy, 1999). Dolayısı ile rengin algılanması için ışık kaynağına, yüzeye ve bir görme organına ihtiyaç vardır.

Işık ışınları dalga boyu 360-400 nm ile 760-830 nm arasında değişen ışınlardır. Beyaz ışık bütün tek renkli ışıkların eşit oranlarda karışmasından oluşmuştur. Şekil 2.22’de ölçün D65, ölçün C ve ölçün A (akkor lamba ışığı) ışığının tayfsal eğrileri görülmektedir. Grafiğin x ekseninde ışığın dalga boyu (λ , nm), y ekseninde ise bağıl enerji (E, mW/nm) verilmiştir. Grafikten de görüldüğü üzere kuramsal beyaz ışığa en yakın ışık ölçün D65 ışığıdır (Sirel, 1974).

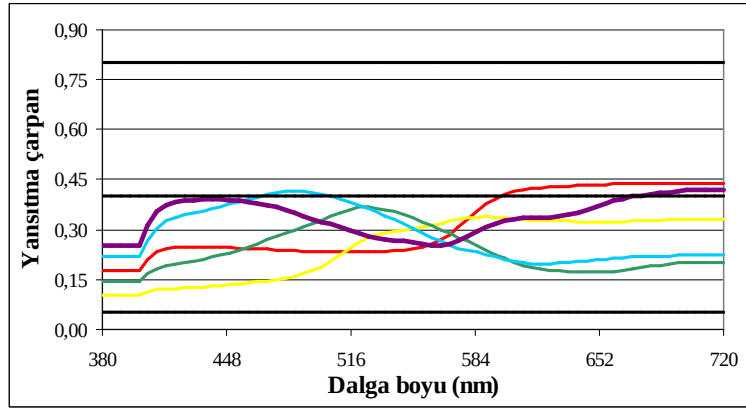


Şekil 2.22 Farklı ışıkların tayf eğrileri

Bir yüzeyin renkli görülmesi o yüzeyi aydınlatan beyaz ışığın bileşimindeki bütün renkli ışınların aynı oranda yansımamaları ve böylece, yansıyarak göze gelen ışığın bileşiminin, beyaz ışığından farklı oluşu, yani yansıyan ışığın renkli oluşu sonucudur. Örneğin bir yüzey kırmızı görünüyorsa, bu, o yüzeyin kırmızı ışıkları ötekilerden daha büyük oranlarda yansıtması, diğer bir deyişle, kırmızı olmayan ve özellikle kırmızıdan uzak renkli ışınları daha büyük oranlarda yutması demektir. Böylece, kırmızı yüzeyden göze gelen ışıktaki kırmızı ışıkların oranı daha büyük olur ve yüzey kırmızı görünür (Sirel, 1974).

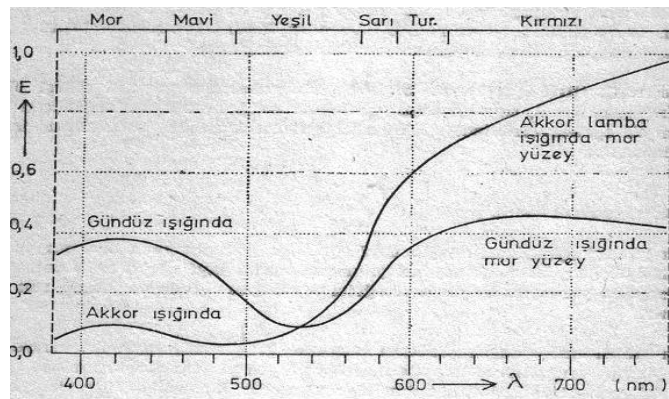
Yüzeylerin, ışığı yansıtma çarpanlarının, dalga boyuna göre değişme özellikleri grafiklerle gösterilir. Şekil 2.23 böyle bir grafiği göstermektedir. x eksenini dalga boylarını, y eksenini ise yüzeyin dalga boyuna göre değişen yansıtma çarpanlarını göstermektedir. Bu grafikten de

görüldüğü üzere gri yüzeyler yansıtma çarpanları ışığın dalga boyuna göre değişmeyen yüzeylerdir. Bu özelliklerinden ötürü üzerine düşen ışığın tayfsal bileşiminde bir değişiklik yapmadan yansıtırlar ve bu nedenle gri, yani renksiz görülürler. Gri yüzeyler, bütün yansıtma çarpanlarına göre, siyahtan beyaza değişen adlar alırlar. Renkli yüzeyler ise ışığın değişik dalga boyuna göre değişik yansıtma çarpanlarına sahip olduklarından dolayı, üzerine düşen ışığın tayfsal bileşimini değiştirir ve bu nedenle renkli görünürler (Sirel, 1974).



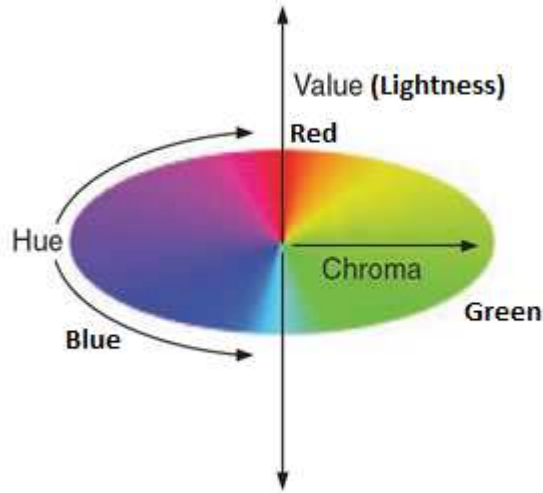
Şekil 2.23 Yüzeylerin tayfsal yansıtma çarpanı eğrileri

Bir yüzeyi aydınlatan ışığın tayf eğrisi, o yüzeyin yansıtma çarpanları eğrisiyle çarpılırsa yüzeyden yansıyan ışığın tayf eğrisi elde edilir. Bir yüzeyden yansıyan ışığın tayf eğrisi o yüzeyin görünen renginin eğrisidir. Bu tanıma göre yüzeyin görünen renginin yüzeyin yansıtma çarpanları eğrisi ve o yüzeyi aydınlatan ışığın tayf eğrisi olmak üzere iki değişkene bağlı olduğu anlaşılmaktadır. Bir yüzeyin görünen rengi, o yüzeyi aydınlatan ışığın tayfsal yapısına bağlıdır. Bu yapı değiştikçe yüzeyin görünen rengi de değişir. Şekil 2.24'te mor yüzeyin gündüz ışığında ve akkor lamba ışığında görünen renkleri gösterilmiştir. Bu çalışmada, renk ölçümünde gün ışığından yararlanılmıştır (Sirel, 1974).

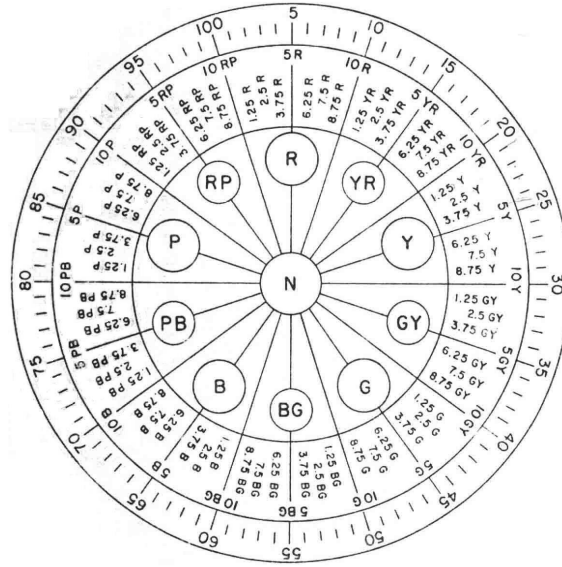


Şekil 2.24 Mor bir yüzeyin farklı ışıklar altındaki görünen renkleri (Sirel, 1974)

Cisimlerin fiziksel özelliklerinden olan renk çeşitli renk dizgeleri ile değerlendirilir. Bunlardan Munsell Renk Dizgesi'nde, rengin tür (hue), değer (value) ve doymuşluk (chroma) bileşeni (Şekil 2.25) yaklaşık olarak eşit algılama adımları ile ondalık sayı dizgesine oturtularak numaralanmıştır. Tür, kırmızı, sarı, yeşil gibi bir rengin öteki renklerden ayırt edilmesini sağlayan bileşendir. 1-100 arasındaki sayılar ile belirtilen bu bileşen Munsell dizgesinde bir tür çemberine yerleştirilmiştir (Şekil 2.26). Tür çemberinde, sırası ile kırmızı 5 (5R), sarı 25 (5Y), yeşil 45 (5G), mavi 65 (5B) ve mor 85 (5P), çemberi beş eşit parçaya bölecek biçimde dizilmiştir. Bu türlerin karışımları olan, kırmızı-sarı 15 (5YR), sarı-yeşil 35 (5GY), yeşil-mavi 55 (5BG), mavi-mor 75 (5PB) ve mor-kırmızı 95 (5RP), çember üzerinde yine eşit uzaklıklarda yerleştirilmiştir. Böylece, tür çemberinde ayrılan 10 bölge de kendi içinde 10 eşit parçaya bölünerek ondalık sayı dizgesi oluşturulmuştur. Rengin açıklık koyuluğunu belirten değer bileşeni ışık yansıtma çarpanı ile eş anlamlıdır ve 0-10 arasındaki sayılar ile belirtilir. Değer, on eşit adıma bölünmüş olup, 0 siyahı, 10 beyazı gösterir. Doymuşluk, bir rengin içindeki gri miktarını belirten bileşendir ve 0-20 arasındaki sayılar ile belirtilir. Grilerin doymuşlukları sıfırdır ve bir renk griden uzaklaştıkça doymuşluğu artar (Sirel, 1974; Luke, 1996; ASTM D 1535-08, 2008; Öztürk, 2002).



Şekil 2.25 Munsell Renk Dizgesinde rengin 3 bileşeni



Şekil 2.26 Munsell Tür Çemberi (ASTM D 1535-08, 2008)

Yüksek sıcaklığın etkisinde kalan betonun renginde bazen önemli değişiklikler meydana geldiği, bu değişikliklere bakılarak kalker ve silis esaslı agregalı betonun maruz kaldığı maksimum sıcaklığın tahmin edilebildiği, özellikle silisli nehir agregaları ile üretilen betonlarda renk değişiminin belirgin olarak görüldüğü, örneğin renk pembe veya kırmızı ise sıcaklığın 300-600°C'ye, gri ise 600-900°C'ye yükseldiği önceki çalışmalarda ifade edilmiştir (Neville, 2000; Cioni vd., 2001).

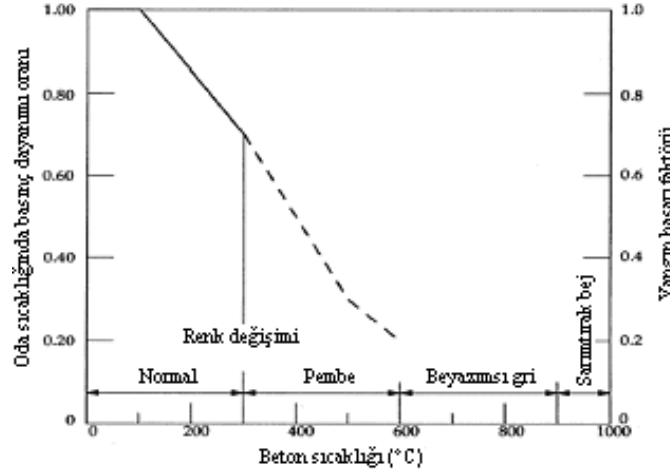
Bazı minerallerin renklerinde Çizelge 2.2'de görüldüğü gibi yüksek sıcaklık etkisiyle değişiklikler meydana gelir. Örneğin Kuvartz'ın (SiO_2) bir türü olan Ametist'in 300°C'de renginin değiştiği, koyu renkli çeşitlerinin ısıtılınca sarı renge dönüştüğü belirtilmiştir (Uz, 1994).

Çizelge 2.2 Bazı minerallerin yüksek sıcaklıkta renk değişimleri (Uz, 1994)

Mineral	Renk	
	Soğuk Halde Gözlenen	Sıcak Halde Gözlenen
Demir	Sarımtırak	Kırmızımsı kahve
Bakır	Mavi	Kirli yeşil
Manganez	Grimsi kirli yeşil	Grimsi kahve (koyu)
Krom	Sarımsı yeşil	Koyu pembe-kırmızı

Silis esaslı agregası ile üretilen betonlarda Şekil 2.27'de görüldüğü gibi 300°C civarında oluşan pembe renk betonun dayanımının ve elastisite modülünün önemli şekilde azaldığını gösterir. Beyazımsı gri veya sarımtırak bej renkli beton zayıf ve gevrek. Renkteki değişime limonite,

goethite gibi demir bileşenlerinin varlığı neden olur. Bu değişim betonun ulaştığı maksimum sıcaklığın ve eşdeğer yangın süresinin belirlenmesinde kullanılabilir (Andrade vd., 2003a; John, 1998).

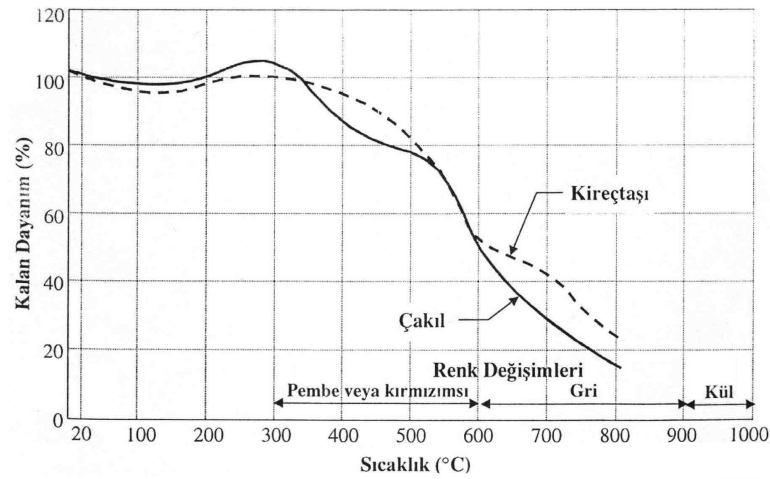


Şekil 2.27 Silis esaslı agregalı betonda basınç dayanımı renk ilişkisi (Andrade vd., 2003a)

Agrega olarak nehir kumu ve bazalt kullanılarak üretilmiş yüksek dayanımlı betonlar üzerinde yapılan diğer bir çalışmada 200°C'de renkte bir değişim olmazken, 400, 800 ve 1000°C'de sırasıyla, açık sarı, kirli beyaz ve kırmızı renkleri gözlenmiştir. Renkteki değişimin betonun yapısında ve bileşimindeki değişikliklerin bir sonucu olduğu ve basınç dayanımındaki azalmaya bir referans olabileceği söylenmiştir (Li vd., 2004).

Chang vd. (1993) tarafından yapılan bir çalışmada normal dayanımlı beton kullanılan bir binadan örnekler alınmış, 800, 900, 1000, 1100, 1200, 1300 ve 1400°C'ye on dakika ve bir saat maruz bırakılmıştır. Betonların rengi 800 ve 900°C'de soluk kırmızı, 1000°C'de parlak kırmızı, 1100°C'de gri, 1200°C'de on dakikada grimsi sarı, bir saatte kısmen grimsi sarı kısmen kahverengi, 1300°C'de kahverengi ve 1400°C'de koyu kahverengi olarak gözlenmiştir.

Betonun basınç dayanımının ve renginin sıcaklığa bağlı değişiminin gösterildiği Şekil 2.28'de görüldüğü üzere, sıcaklık 600°C'ye ulaştığında beton, dayanımının %50'sini, 800°C'ye ulaştığında ise yaklaşık %80'ini kaybettiği göz önüne alınırsa (Baradan vd., 2002), renk incelemesi ile betonun hangi sıcaklığa maruz kaldığı, dolayısı ile basınç dayanımındaki değişim hakkında fikir edinilebilir. Buradan yüksek sıcaklık etkisinde kalan betondaki renk değişiminin önemli bir parametre olduğu anlaşılmaktadır (Yüzer vd., 2003; Yüzer vd. 2004a; Kızılkant ve Yüzer, 2008).



Şekil 2.28 Betonda sıcaklığa bağlı dayanım kaybı renk değişimi (Neville, 1990)

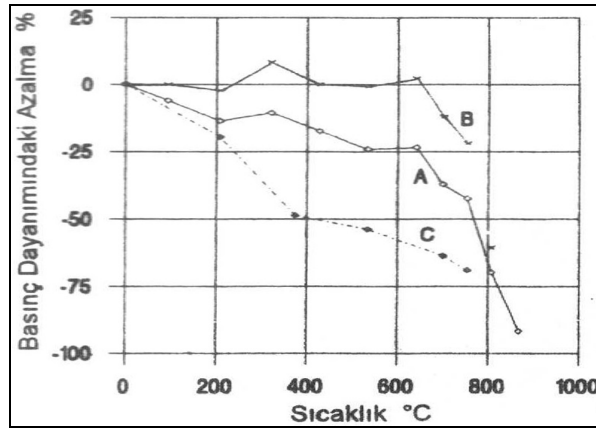
2.2.4 Yüksek Sıcaklığın Betonun Mekanik Özelliklerine Etkileri

Betonarme yapılar, yangın, termal şok, endüstriyel uygulamalar vb. durumlarda yüksek sıcaklığa maruz kalmaktadır. Çoğu durumda yüksek sıcaklık beton elemanlarda ve taşıyıcı duvarlarda önemli hasarlara yol açmaktadır (Cülfik ve Özturan, 2001). Betonarme yapılarda ana taşıyıcının beton olduğunu düşünürsek, betonun yüksek sıcaklıklardaki mekanik özelliklerinin iyi bilinmesi gerekmektedir. Yüksek sıcaklığın betonun basınç dayanımı, çekme dayanımı ve elastisite modülü gibi mekanik özelliklerine etkisi ayrı ayrı incelenecektir.

2.2.4.1 Basınç Dayanımı

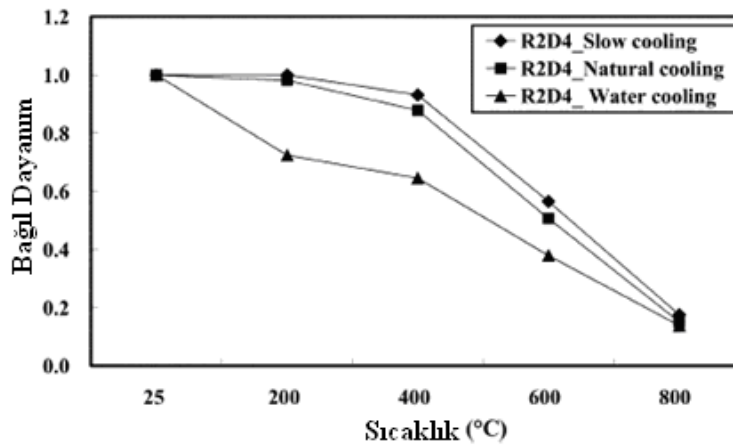
Yüksek sıcaklığa maruz kalan betonun basınç dayanımına, çimento tipi, agrega türü, su/çimento oranı gibi kullanılan malzeme özellikleri ve sıcaklığa maruz kalınan süre, nem durumu, ısınma ve soğuma hızı, yükleme durumu gibi çevresel faktörler etken olmaktadır (Neville, 2000).

Yükleme durumuna göre basınç dayanımındaki değişim Şekil 2.29'da verilmiştir. Şekilde verilen A grubu numuneler herhangi bir yüklemeye maruz kalmadan ısıtılan, B grubu numuneler, basınç dayanımlarının %40'ı kadar bir gerilme altında iken ısıtılan, C grubu numuneler ise ısıtılıp 7 gün 21°C 'de bekletilen numunelerin basınç deneyi sonuçlarını temsil etmektedir. Şekilden de görüldüğü üzere yüklü numunelerde 600°C'de basınç dayanımı kaybı görülmemiş, yüksüz numunelerde %25, ısıtmadan 7 gün sonra basınç deneyi yapılan grupta ise %60 dayanım kaybı olmuştur (Neville, 2000). Şekil 2.31'deki basınç deneyi sonuçları, C grubu numunelerin temsil ettiği, yüksüz durumda ısıtılıp soğutulduktan sonra basınç dayanımlarının belirlenmesi yönteminin daha güvenli bölgede kaldığını göstermektedir.



Şekil 2.29 Beton basınç dayanımına yükleme durumunun etkisi (Neville, 2000)

Soğutma türü de yüksek sıcaklığa maruz betonun basınç dayanımına etkiler. Su ile soğutulan numunelerin basınç dayanımlarındaki azalma (Şekil 2.30) havada soğutulan numunelere nazaran daha fazladır (Lee vd. 2008; Yüzer vd. 2004b).

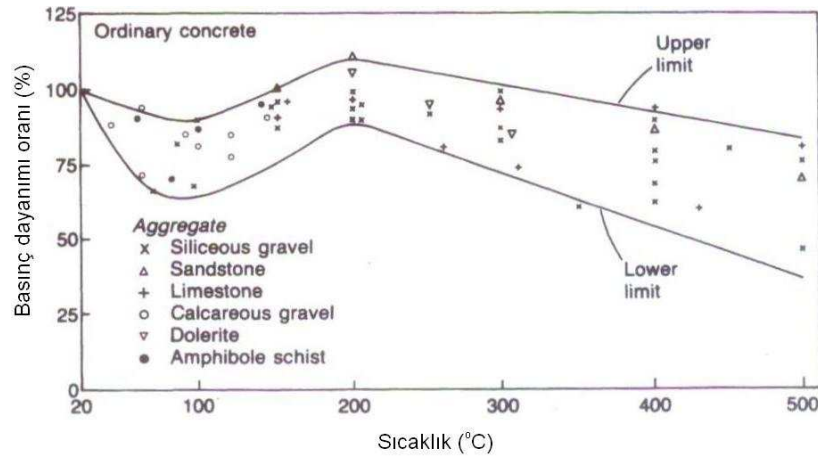


Şekil 2.30 Basınç dayanımının soğutma şekline göre sıcaklıkla değişimi (Lee vd., 2008)

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).

Yüksek sıcaklığın betonun basınç dayanımına etkisi şu şekilde özetlenebilir; basınç dayanımı 90°C'de azalır, bu azalma %10-35 oranındadır. Bu sıcaklıktan sonra 200°C'ye kadar dayanımda artış gözlenirken bu sıcaklıktan sonra beton dayanımı sürekli olarak azalır (Şekil 2.31). 800°C'de dayanım kaybı %20-50 arasındadır. Dayanımdaki bu değişimi beton üretiminde kullanılan agrega türü ve oranı doğrudan etkiler. Kalker esaslı agrega ile üretilen

betonlar yüksek sıcaklık etkisi altında, silis esaslı agregra ile üretilen betonlardan daha iyi performans gösterirler. Agregra türünün yanı sıra beton karışımına giren agregra oranı da basınç dayanımındaki değişime etki eder ve bu oran arttıkça betonun dayanıklılığı artar. Farklı su/çimento oranlarının yüksek sıcaklığa maruz kalan betonun basınç dayanımındaki değişime önemli bir etkisi yoktur. Isıtma ve soğutma hızı da basınç dayanımına etki eder ve soğutma hızı arttıkça dayanımdaki kayıp oranı artar. Deneysel çalışmalar sonucunda yüklü durumda yüksek sıcaklığa maruz kalan betondaki dayanım kaybının yüksüz olarak ısıtılan betonlardan daha az olduğu tespit edilmiştir. Dayanıma numune boyut ve biçimi de etki eder. Küp numunelerin etki sonrası dayanımları prizma şeklindeki numunelere göre daha fazladır. Aynı zamanda numune boyutu küçüldükçe dayanım kaybı artar. Agregra boyut ve biçimi de yüksek sıcaklığa maruz kalan betonların basınç dayanımını etkiler (Bazant ve Kaplan, 1996).

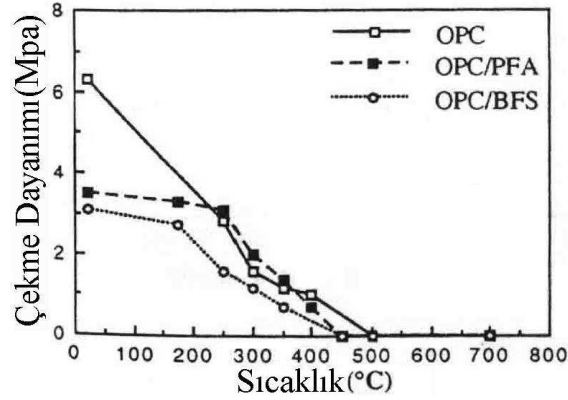


Şekil 2.31 Basınç dayanımının sıcaklıkla değişimi (Bazant ve Kaplan, 1996)

2.2.4.2 Çekme Dayanımı

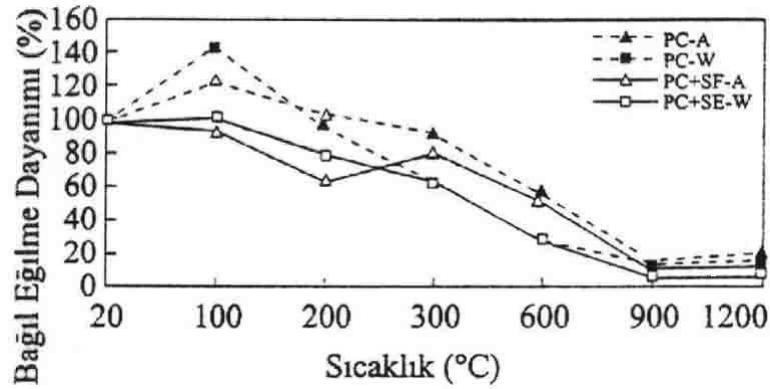
Betonun çekme dayanımı, eğilmede çekme ve yarma deneyi sonuçları ile araştırılır. Silindirik numunelerde değişik sıcaklık etkisinde iken ve soğutulduktan sonra yapılan yarma deneyi ile elde edilen çekme dayanımlarında 100°C'den itibaren önemli düşüşler olmakta ve 600°C'de kayıp %70'e varmaktadır (CEB,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

Guisse vd. (1996) tarafından yapılan deneysel çalışma sonucu yüksek sıcaklık etkisinde, uçucu kül ve yüksek fırın cürufu katkılı ve katkısız beton numunelerde, 200 ve 300°C'de eğilmede çekme dayanımında önemli ölçüde azalma olduğu görülmüştür (Şekil 2.32).



Şekil 2.32 Puzolan katkılı ve katkısız betonların çekme dayanımının sıcaklıkla değişimi (Guise vd., 1996)

Yüksek sıcaklık etkisinin araştırıldığı silis dumanı katkılı ve katkısız harçlar üzerinde yapılan diğer bir deneysel çalışmada, harçların eğilme dayanımı (Şekil 2.33) 100°C'den itibaren bütün gruplarda azalmaya başlamış, suda soğutulanlardaki kayıp, 300°C'de yaklaşık %40'a varmıştır (Aköz vd., 1995).



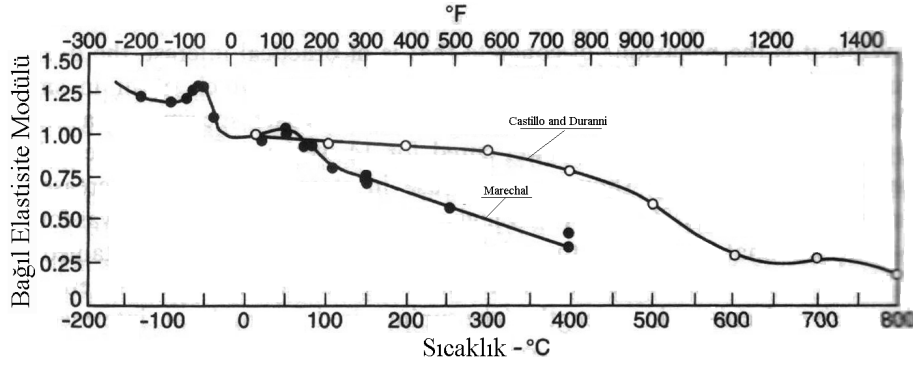
Şekil 2.33 Eğilme dayanımının sıcaklıkla değişimi (Aköz vd., 1995)

Yüksek sıcaklık etkisine maruz kalan harcın mekanik özelliklerindeki değişimin araştırıldığı çalışmada, silis esaslı agrega ile üretilen harçlardaki dayanım kaybının kalker esaslı agrega ile üretilen numunelerden daha fazla olduğu, suda soğutmanın havada soğutmaya göre daha zararlı olduğu tespit edilmiştir (Kızıllıkanat, 2004).

2.2.4.3 Elastisite Modülü

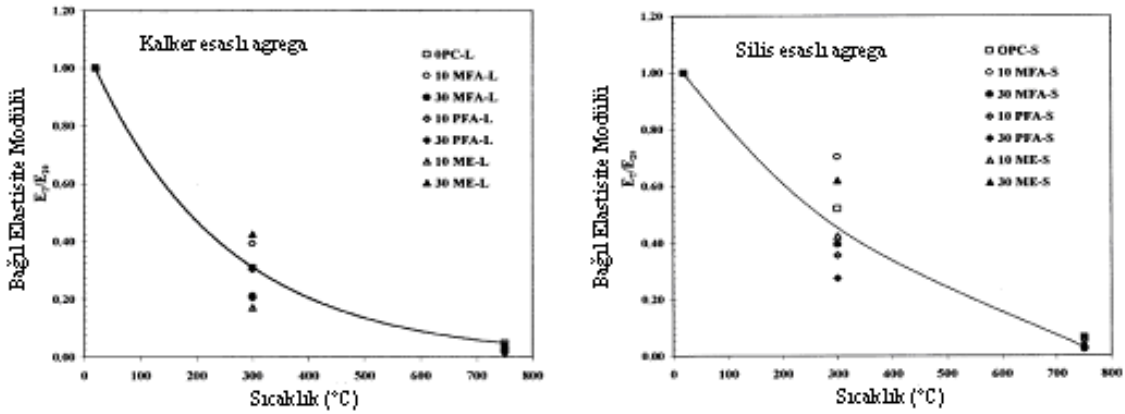
Betonarme yapıların davranışı betonun elastisite modülüne bağlıdır ve bu modül sıcaklıktan oldukça etkilenir. Sıcaklığın betonun elastisite modülüne etkisi Şekil 2.34'te verilmiştir. Kütle halinde kür edilmiş betonlarda 21 ile 96°C'ler arasında elastisite modülünün değerinde

herhangi bir değişiklik yoktur. Ancak sıcaklık 121°C'ye ulaştığında elastisite modülünün değeri azalmaktadır. Su betondan uzaklaştığında, 50 ile 800°C'ler arası elastisite modülündeki azalma giderek artmaktadır. Genel olarak dayanımdaki azalma ile elastisite modülündeki azalma benzer eğilim göstermektedir (Neville, 2000).



Şekil 2.34 Betonun elastisite modülünün sıcaklıkla değişimi (Neville, 2000)

Savva vd. (2005) tarafından yapılan deneysel çalışmada farklı tür ve oranda puzolan katkılı silis esaslı ve kalker esaslı agrega ile üretilen betonlarda tüm sıcaklıklarda elastisite modülünde devamlı bir azalma gözlenmiştir. Bu azalma kalker esaslı agrega ile üretilen gruplarda daha fazladır (Şekil 2.35). Puzolanların elastisite modülüne etkisi açıkça görülmemekle birlikte betonun kırılması daha az gevrek davranış gösterir.



Şekil 2.35 Farklı beton numuneleri için sıcaklık-elastisite modülü ilişkisi (Savva vd., 2005)

Uçucu kül kullanılarak yapılan diğer bir çalışmada 150 mm çapında 300 mm yüksekliğindeki silindir beton numunelerde yüksek sıcaklık etkisinden sonra elastisite modülündeki azalmanın uçucu kül içeren betonlarda daha fazla olduğu görülmüştür (Papayianni vd., 2005).

2.3 Yüksek Sıcaklık Etkisinde Beton Özellikleri ile Renk Değişimi İlişkisi

Tekstil ve boya sanayinde kalite kontrol testlerinde, UV ışınlarının polimerlere etkisinin belirlenmesinde tahribatsız bir deney yöntemi olan renk ölçümünden yararlanılmaktadır. Harç ve beton numuneler üzerinde yapılan deneysel çalışmalarda tahribatsız bir deney yöntemi olan renk ölçümünün, yüksek sıcaklık etkisinde kalan betonun basınç dayanımının tahmininde kullanılması 2001 yılından bu yana araştırılmaktadır (Short vd., 2001; Yüzer vd., 2001; 2004a; 2005; 2007a; 2007b; Yüzer ve Kızılkant, 2008).

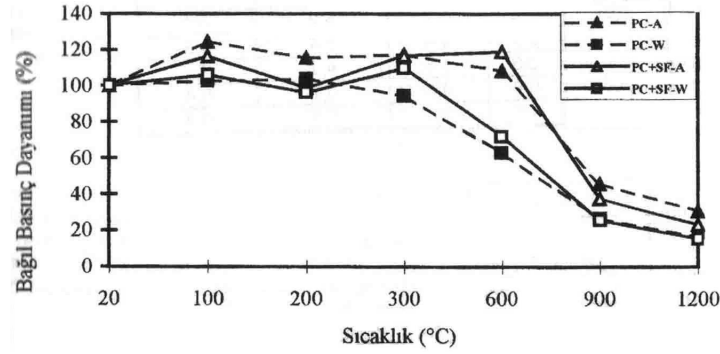
Yüzer vd. (2007a) tarafından, yangına maruz kalan yapılarda beton basınç dayanımı-renk değişimi ilişkisinin araştırılması amacı ile yapılan çalışmada puzolan katkılı ve katkısız çimento hamurlarında yüksek sıcaklık etkisi öncesi ve sonrası taramalı elektron mikroskobunda EDS (Energy Dispersion Spectrum) analizleri yapılmış ve SEM (Scanning Electron Microscope) görüntüleri alınmıştır. 600°C ve 900°C sıcaklıklara maruz kalan numuneler havada ve suda olmak üzere iki farklı şekilde ortam sıcaklığına kadar soğutulmuştur. Bu çalışmadan örnek olarak alınan cüruf katkılı çimento hamuruna ait deney sonuçları Çizelge 2.3'te verilmiştir. Proje kapsamında yapılan çalışmada yüksek sıcaklık etkisi sonrası çimento hamurundaki C-S-H jellerin ve oksitlerin bünyesinde bulunan kalsiyum, silisyum, oksijen gibi elementlerin oranlarının değiştiği, bu değişimin betonun yüzey renginin değişmesine neden olduğu; renkte meydana gelen değişim ile basınç dayanımındaki değişim arasında paralellik gözlemlendiği renk incelemesi ile betonun hangi sıcaklığa maruz kaldığı hakkında fikir edinilebileceği sonucuna varılmıştır. Renkteki değişimin nedeninin demirli bileşenlerin varlığı olduğunu ifade eden Andrade vd. (2003a) de bu değişim ile yangın esnasında maruz kalınan maksimum sıcaklığın tespit edilebileceğini belirtmişlerdir. Ayrıca Li vd. (2004)'nin belirttiği gibi betonun yapısında ve bileşiminde meydana gelen değişikliklerin bir sonucu olan renk değişimi, basınç dayanımındaki azalmaya da referans olabilecektir.

Çizelge 2.3 Cüruf katkılı numunelerin EDS analizi sonuçları (Yüzer vd., 2007a)

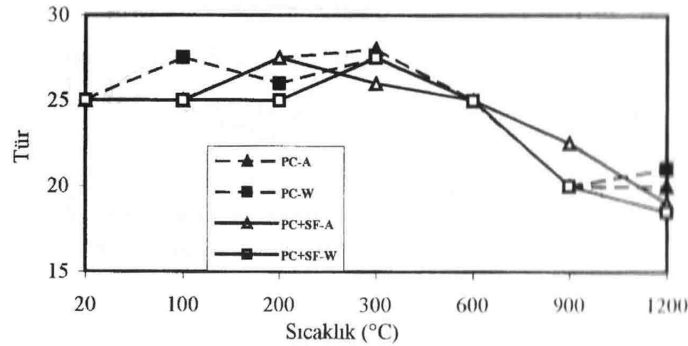
Numune	C	O	Mg	Al	Si	Ca	Fe
Kontrol	2.61	40.92	0.54	1.93	7.78	43.97	2.26
600°C/havada soğutulan	2.84	33.23	0.53	2.26	8.93	49.60	2.61
600°C/suda soğutulan	2.37	38.56	0.56	2.33	8.03	45.83	2.33
900°C/havada soğutulan	2.81	34.61	0.60	2.05	7.61	49.10	3.23
900°C/suda soğutulan	2.52	36.79	0.55	2.39	7.87	46.88	3.01

Luo ve Lin (2007) tarafından yapılan benzer çalışmada atık çamur katkılı harçta yüksek sıcaklık etkisi araştırılmış, 600°C ve 1000°C'ye maruz kalan numunelerde EDS analizi yapılmıştır. Yapılan analizlerde silisyum, oksijen ve kalsiyum elementlerinin oranlarının önemli ölçüde değiştiği tespit edilmiştir.

Yüzer vd. (2001) tarafından yüksek sıcaklık etkisi altında kalan harçların mekanik ve fiziksel özelliklerinin araştırıldığı deneysel çalışmada, harçların maruz bırakıldığı her sıcaklık için yüzey rengi ve basınç dayanımları belirlenmiş, rengin tür bileşeni ile basınç dayanımı arasında bir ilişki kurulabileceği sonucuna varılmıştır. Şekil 2.36 ve 2.37'de sıcaklığın etkisi ile harcın, basınç dayanımında ve renginde benzer değişikliklerin olduğu görülmektedir. Bu değişiklikler betonun hangi sıcaklığa maruz kaldığı ve dayanımdaki kayıp oranı hakkında fikir verebilmektedir (Yüzer vd., 2001). Silis ve kalker esaslı agregalar ayrı ayrı kullanılarak üretilen beton numuneler üzerinde yapılan diğer çalışmalarda da benzer sonuçlar elde edilmiştir. Bu çalışmalarda rengin tür, değer ve doymuşluk bileşenleri ile ultrases geçiş hızı olmak üzere 4 girdi parametresi kullanılarak oluşturulan Yapay Sinir Ağı modelleri ile yüksek sıcaklık etkisi sonrası betonun basınç dayanımı teorik olarak belirlenmiştir (Yüzer vd., 2005, Yüzer vd., 2007a; Yüzer vd., 2007b).

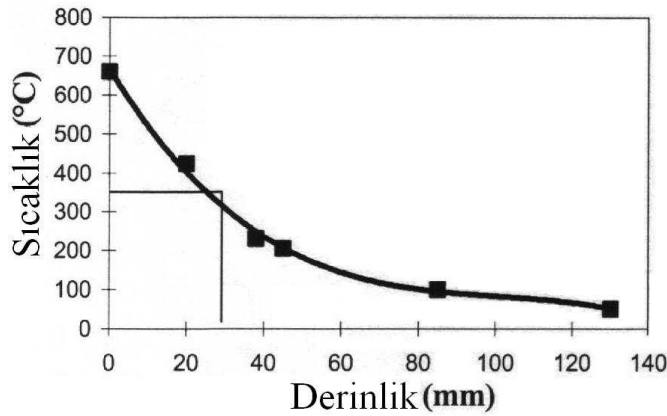


Şekil 2.36 Basınç dayanımının sıcaklıkla değişimi (Yüzer vd., 2001)

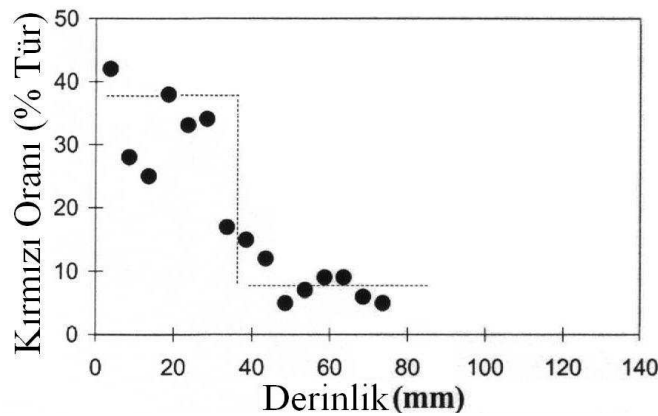


Şekil 2.37 Renklerin (tür) sıcaklıkla değişimi (Yüzer vd., 2001)

Farklı bir renk dizgesinin kullanıldığı diğer bir çalışmada beton numunelerde farklı sıcaklıklar için basınç dayanımları ve yüzey renkleri ölçülmüş, silis esaslı agregada kullanıldığında renk ile basınç dayanımı arasında bir ilişki kurulabileceği açıkça görülürken, farklı agregada türleri kullanıldığında herhangi bir ilişki kurulamamıştır. Bundan dolayı yüzey renginin agregadan bağımsız olmasını sağlamak amacıyla renk ölçümünün harç fazında yapılması gerekliliği belirtilmiştir. Bu çalışmadan alınan grafiklerde, yüksek sıcaklığa maruz silis esaslı agregada ile üretilen betonun sıcaklığının derinlikle değişimi (Şekil 2.38) ve farklı derinliklerde ölçülen yüzey renkleri (Şekil 2.39) verilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre yüzeyden yaklaşık 30 mm derinlikteki rengin kırmızı oranı yüksek iken, 35 mm derinlikte sıcaklığın henüz 300°C'nin altına düştüğü bölgede kırmızı oranının hızla azaldığı, hatta 45 mm derinlikte yüzeydeki kırmızılığın tamamen kaybolduğu görülmüştür. Bu çalışma neticesinde yüksek sıcaklığa maruz kalan betonun farklı derinliklerde yüzey renginin incelenmesi ile betonun yüzeyden itibaren hangi sıcaklıklara maruz kaldığının belirlenebileceği sonucuna varılmıştır (Short vd., 2001).



Şekil 2.38 Yüzeyden itibaren sıcaklığın derinlikle değişimi (Short vd., 2001)



Şekil 2.39 Yüksek sıcaklık etkisinde beton renginin derinlikle değişimi (Short vd., 2001)

Lin vd. (2007) tarafından yapılan deneysel çalışmada yangın hasar tespiti dijital görüntü analizi ile araştırılmış, bu amaçla yüksek sıcaklık etkisine belirli süre maruz kalan harçların renk bileşenlerindeki değişim belirlenmiştir. Renk ölçümünde RGB (red, green, blue) ve HSI (hue, saturation, intensity) dizgelerinden yararlanılmış, çalışma sonunda yüksek sıcaklık etkisine maruz kalan harçlarda kırmızı rengin diğer renklere oranla daha baskın olduğu tespit edilmiştir. Yangında ulaşılan maksimum sıcaklık ve yangın süresi renk değişimini etkileyen parametreler olduğu tespit edilmiş, aynı zamanda rengin tür ve doymuşluk bileşenleri ile sıcaklık arasında bir ilişki olduğu sonucuna varılmıştır (Lin vd., 2007).

Farklı agrega ve mineral katkıları ile üretilen harçların 1200°C sıcaklığa kadar ısıtıldığı ve havada ve/veya suda soğutulması ile kalan dayanımların belirlendiği bir diğer çalışmada, harçların yüzey renkleri de belirlenerek agrega türüne bağlı olarak basınç dayanımı-renk değişimi ilişkisi araştırılmıştır (Kızılkant, 2004). Farklı sıcaklıkların araştırıldığı deneysel çalışma sonucunda silis esaslı agrega ile üretilen harçlar için (2.8) bağıntısı, kalker esaslı agrega ile üretilen harçlar için (2.9) bağıntısı elde edilmiştir.

$$f_{teo} = e^{4,30 + 0,06H - 0,20V - 1,21C} \quad (2.8)$$

$$f_{teo} = e^{7,33 - 0,06H - 0,22V - 1,44C} \quad (2.9)$$

Mahsanlar (2006) tarafından, silis esaslı agrega ve farklı mineral katkıları ile üretilen betonlara yüksek sıcaklığın etkisinin araştırıldığı çalışmada, basınç dayanımı-renk değişimi ilişkisi incelenmiştir. 1200°C'ye kadar farklı sıcaklıkların araştırıldığı bu deneysel çalışmada ise (2.10) bağıntısı elde edilmiştir.

$$f_{teo} = e^{4,151 - 0,014H + 0,0018V - 0,609C} \quad (2.10)$$

Bağıntılarda f_{teo} , yüksek sıcaklık etkisine maruz kalan harcın veya betonun teorik basınç dayanımını, H, V ve C, sırası ile harcın ve betonun yüzey renginin Tür, Değer ve Doymuşluk bileşenlerini göstermektedir. Bu bağıntılardan, yüksek sıcaklık etkisinde kalan betonun yüzey rengi ölçülerek, betonun basınç dayanımının tahmin edilebileceği yargısına varılmıştır.

Yukarıda özetlenen literatür kapsamında farklı agreganın ve puzolanların betonun fiziksel ve mekanik özelliklerine etkileri ortaya konulmuştur. Ancak yüksek sıcaklık etkisinde kalan betonların basınç dayanımı-renk değişimi ilişkisi tarafımızdan yapılan çalışmalar ile sürdürülmektedir. Bu çalışma kapsamında silis ve kalker esaslı agrega kullanılarak üretilen ve

yüksek sıcaklık etkisinde kalan farklı oranlarda puzolan katkılı ve katkısız beton numunelerin termofiziksel, fiziksel ve mekanik özelliklerinin belirlenmesi, basınç dayanımı ile renk değişimi arasında ilişkinin kurularak çalışmanın tamamlanması hedeflenmiştir. Ayrıca betonun derinliğe bağlı sıcaklık değişimi ile rengin tür bileşeni arasında ilişki bu çalışma kapsamında ele alınmış, rengin tahribatsız bir deney yöntemi olarak kullanılabilirliğini araştırmak amacı ile aşağıdaki deneysel çalışma gerçekleştirilmiştir.

3. DENEYSEL ÇALIŞMA

Bu çalışma kapsamında silis ve kalker esaslı agregası ve farklı puzolan türleri kullanılarak üretilen ve yüksek sıcaklık etkisine maruz bırakılan beton numunelerin termofiziksel, fiziksel ve mekanik özelliklerinde meydana gelen değişimler, sıcaklığın ve rengin derinliğe bağlı değişimi incelenmiş, basınç dayanımı-renk değişimi ile sıcaklık-renk değişimi arasındaki ilişkiler araştırılmıştır.

Deneysel çalışma, numune üretimi, kürü, ısıtma-soğutma süreci ve kontrol deneyleri olmak üzere dört aşamada gerçekleştirilmiştir. Numune üretiminde maksimum dane çapı 16 ve 22 mm olan silis ve kalker esaslı agregası, CEM I 42.5 R çimentosu, silis dumanı, uçucu kül ve cüruf kullanılmıştır. Numuneler üretimde kullanılan agregası türü ve mineral katkı oranı ve sıcaklık etki süresi dikkate alınarak üç gruba ayrılmıştır (Çizelge 3.1). Bu gruplardan ilkinde beton üretiminde uygulamada yaygın olarak kullanılan karışım oranları ile “Binaların Yangından Korunması Hakkında Yönetmelik”te belirtilen yangın etki süresi dikkate alınmıştır. II. ve III. Grup numunelerde ise sıcaklık etki süresinden bağımsız olarak mineral katkıları ve agregası türü karşılaştırılmıştır.

Çizelge 3.1 Numune grupları

Grup	Agregası türü	Puzolan türü ve oranı (%)
I	Silis esaslı kum Kalker esaslı kırma kum Kalker esaslı kırmataş	Katkısız
		Silis dumanı (%5)
		Cüruf (%40)
		Uçucu kül (%20)
II	Silis esaslı kırma kum Silis esaslı kırmataş	Katkısız
		Silis dumanı (%10)
		Cüruf (%10)
		Uçucu kül (%10)
III	Kalker esaslı kırma kum Kalker esaslı kırmataş	Katkısız
		Silis dumanı (%10)
		Cüruf (%10)
		Uçucu kül (%10)

I. Grupta, uygulamada kullanılan malzeme miktarlarına karar verebilmek için hazır beton sektöründeki verilerden yararlanılmış; ince agregası olarak silis esaslı kum ve kalker esaslı kırma kum, iri agregası olarak kalker esaslı kırmataşın birlikte kullanıldığı %5 oranında silis

dumanı, %20 oranında uçucu kül ve %40 oranında yüksek fırın cürufu katkılı ve katkısız dört seri beton üretilmiştir. İri ve ince agregalar olarak sadece silis ve sadece kalker esaslı agregaların kullanıldığı II. ve III. gruplarda ise %10 puzolan katkılı ve katkısız sekiz seri beton üretilmiştir. Toplam oniki seri beton üretiminde, puzolanlar çimento ile ikame edilmek üzere yaklaşık 350 kg/m^3 bağlayıcı kullanılmış, su/bağlayıcı oranı 0.5 ile sabit tutulmuş, çökmenin sabit tutulması amacı ile farklı oranlarda akışkanlaştırıcı kimyasal katkı maddesi kullanılmıştır. Mekanik ve fiziksel özelliklerin yüksek sıcaklık etkisi altındaki değişiminin belirlenmesi için 1080 adet 100 mm çapında 200 mm yüksekliğinde silindir, 128 adet 300x300x40 mm boyutlarında plak, 12 adet 100x100x200 mm boyutlarında prizma beton numuneler üretilmiştir. TS EN 206-1'e uygun olarak üretilen betonlar 24 saat sonra kalıptan çıkarılmış, 28. güne kadar $20 \pm 2^\circ\text{C}$ sıcaklıktaki suda saklanmıştır. Numuneler, kullanılan puzolan türü, agregalar türü ve soğutma şekline göre Çizelge 3.2'de gösterildiği gibi kodlanmıştır.

Çizelge 3.2 Numune kodları

Soğutma türü	Havada (A)			Suda (W)		
Agrega türü Puzolan türü	Silis (S)	Kalker (K)	Silis+Kalker (SK)	Silis (S)	Kalker (K)	Silis+Kalker (SK)
Katkısız (N)	NSA	NKA	NSKA	NSW	NKW	NSKW
Silis Dumanı (Ms)	MsSA	MsKA	MsSKA	MsSW	MsKW	MsSKW
Cüruf (C)	CSA	CKA	CSKA	CSW	CKW	CSKW
Uçucu Kül (F)	FSA	FKA	FSKA	FSW	FKW	FSKW

3.1 Numune Üretiminde Kullanılan Malzemeler

Beton üretiminde özellikleri aşağıda verilen agregalar, çimento, puzolan, süper ve yeni nesil süper akışkanlaştırıcı katkı maddesi kullanılmıştır.

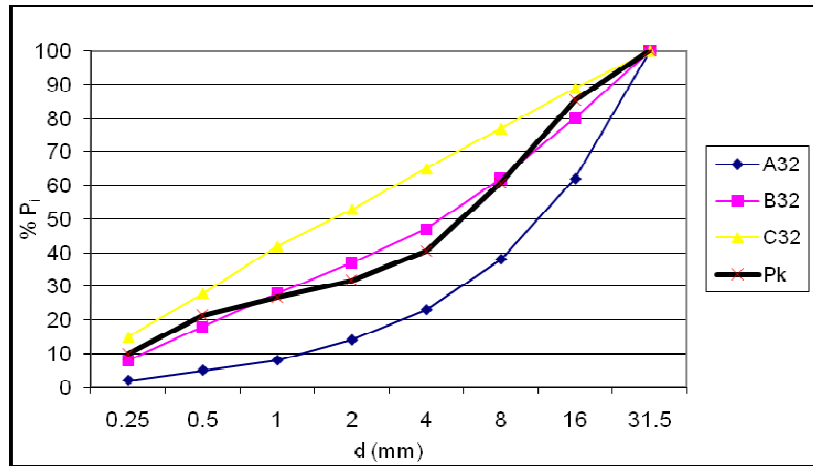
3.1.1 Agregalar

Beton üretiminde, fiziksel özellikleri Çizelge 3.3'te verilen maksimum dane çapı 22 mm olan, Cendere/İstanbul bölgesinden temin edilen silis esaslı agregalar, Cebeci/İstanbul bölgesinden temin edilen kalker esaslı agregalar ve Akpınar/Eyüp-İstanbul bölgesinden temin edilen silis esaslı kum kullanılmıştır. Grup II ve III'e ait beton karışımlarında kullanılan agregalar elek göz açıklığı 16 mm olan elekten elenerek, maksimum dane çapı 16 mm'ye

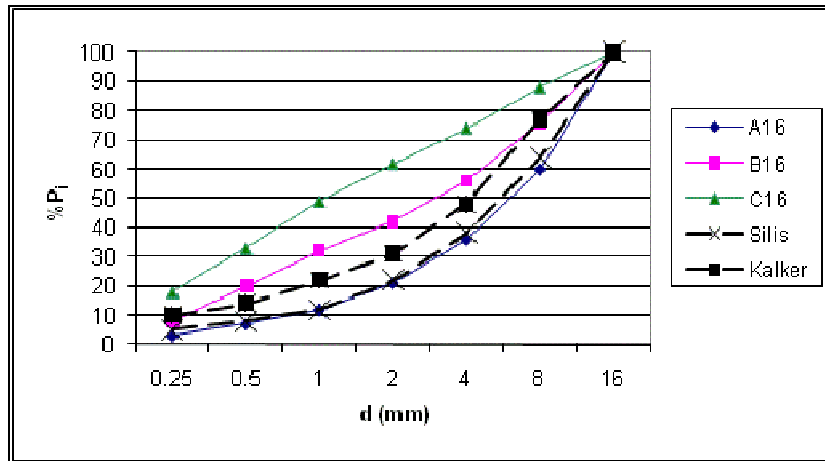
düşürülmüştür. Üç gruba ait karışım agregası granülometri eğrileri Şekil 3.1 ve 3.2’de verilmiştir.

Çizelge 3.3 Agregaların fiziksel özellikleri

Agrega Türü	Tane Büyüklüğü	Birim Ağırlık (kg/m^3)	Özgül Ağırlık (kg/m^3)
Silis	Kum	1388	2630
	Kırma Kum	1470	2680
	Kırmataş I	1370	2610
	Kırmataş II	1370	2730
Kalker	Kırma Kum	1610	2730
	Kırmataş I	1360	2670
	Kırmataş II	1302	2780



Şekil 3.1 I. Grup karışım agregası granülometri eğrisi



Şekil 3.2 II. ve III. Grup karışım agregası granülometri eğrileri

3.1.2 Çimento

Beton üretiminde, fiziksel ve kimyasal özellikleri Çizelge 3.4 ve 3.5'te verilen, CEM I 42.5 R çimentosu kullanılmıştır.

3.1.3 Mineral Katkı

Mineral katkı olarak, beton üretiminde Norveç Elkem tesislerinden elde edilen silis dumanı, İskenderun Demir-Çelik Fabrikasından ve Ereğli Demir Çelik Fabrikasından elde edilen yüksek fırın cürufu ve Zonguldak Çatalağzı Termik Elektrik Santralinden ve Akdeniz Madencilik Tunçbilek santralinden temin edilen uçucu kül olmak üzere üç tür puzolan malzeme kullanılmıştır. I. Grup beton serilerinde kullanılan puzolanların fiziksel ve kimyasal özellikleri Çizelge 3.4'te, II. ve III. Grup beton serilerine ait puzolanların fiziksel ve kimyasal özellikleri Çizelge 3.5'te verilmiştir.

Çizelge 3.4 I. Grupta kullanılan malzemelerin kimyasal analizi ve fiziksel özellikleri

Kimyasal Özellikler (%)	CEM I 42,5 R	Silis D.	Y.F. Cürufu	U. Kül
CaO	63,59	1,42	33,25	1,17
SiO ₂	20,64	92,73	44,55	60,20
Al ₂ O ₃	4,59	1,30	11,18	24,57
Fe ₂ O ₃	3,48	0,28	0,74	5,88
MgO	1,28	0,75	7,03	2,16
SO ₃	2,99	0,19	1,56	0,14
Kızdırma Kaybı	1,32	1,44	<0,01	0,81
Çözünemeyen Kalıntı	0,47	---	---	---
Özgül Ağırlık (g/cm ³)	3,15	2,33	2,91	2,21
Özgül Yüzey (Blaine, cm ² /g)	3710	---	3335	3545

Çizelge 3.5 II. ve III. Grupta kullanılan malzemelerin kimyasal analizi ve fiziksel özellikleri

Kimyasal Özellikler (%)	CEM I 42,5 R	Silis D.	Y.F. Cürufu	U. Kül
CaO	64,05	1,42	34,20	1,90
SiO ₂	20,95	92,73	41,11	60,13
Al ₂ O ₃	4,98	1,30	13,74	19,00
Fe ₂ O ₃	3,24	0,28	1,16	8,98
MgO	1,29	0,75	5,81	4,77
SO ₃	2,59	0,19	2,23	0,95
Kızdırma Kaybı	1,35	1,44	0,00	1,69
Çözünemeyen Kalıntı	0,44	---	---	---
Özgül Ağırlık (g/cm ³)	3,19	2,33	2,91	2,21
Özgül Yüzey (Blaine, cm ² /g)	3620	---	3335	3545

3.1.4 Kimyasal Katkı

İstenen çökmenin sağlanması amacı ile katkı oranı %0.5-1.15 arasında değişen, katı madde miktarı %35.8 olan polikarboksilat esaslı yeni nesil süper akışkanlaştırıcı ve katı madde miktarı %41 olan naftalin sülfonat esaslı süper akışkanlaştırıcı kimyasal katkı maddesi kullanılmıştır.

3.2 Numune Üretimi

TS EN 206-1'e uygun olarak 1080 adet 100 mm çapında 200 mm yüksekliğinde silindir, 128 adet 300x300x40 mm boyutlarında plak, 12 adet 100x100x200 mm boyutlarında prizma beton numuneler üretilmiştir. 1 m³ beton için gerekli gerçek malzeme miktarları ve taze beton birim ağırlıkları Çizelge 3.6'da verilmiştir.

Çizelge 3.6 Gerçek malzeme miktarları ve taze beton özellikleri

Grup	Numune kodu	Çimento (kg)	Mineral katkı (kg)	Agrega (kg)	Akışkan. (%)	Taze beton birim ağırlığı (kg/m ³)	Çökme sınıfı
I	NSK	346	--	2005	1,7	2522	S4 (170±10 mm)
	MsSK	328	17	2001	1,8	2507	
	CSK	204	136	1971	1,8	2507	
	FSK	270	68	1961	1,8	2488	
II	NS	355	--	1907	1,1	2503	S2 (60±10 mm)
	MsS	315	35	1943	1,15	2507	
	CS	315	35	1943	1,15	2507	
	FS	313	35	1929	1,15	2488	
III	NK	350	--	1908	0,5	2451	
	MsK	321	36	1881	0,7	2419	
	CK	326	36	1908	0,6	2451	
	FK	330	37	1934	0,6	2483	

3.3 Isıtma-Soğutma Süreci

Isıtma ve soğutma süreci, numunelerin yüksüz olarak istenilen sıcaklık derecesine kadar ısıtılması ve oda sıcaklığına kadar soğutulduktan sonra kontrol deneylerinin yapılması prensibine göre planlanmıştır. Numuneler, 28. günde sudan çıkarılmış, önce etüvde 100±5°C'de 48 saat bekletilmiş, sonra ısınma hızı 8±4°C/dak. olan fırında 200, 300, 600 ve 900°C sıcaklıklara kadar ısıtılmıştır (Şekil 3.3). Fırın içi sıcaklık istenilen değere ulaşıldığında I. Grup numuneler, Binaların Yangından Korunması Hakkında Yönetmelik'te yangın etki süresinin 2 saat olması hali göz önüne alınarak bazı şartlar arandığından, 2 saat boyunca

sıcaklık etkisine maruz bırakılmış, II. ve III. Grup numuneleri ise hedef sıcaklığa ulaşıldıktan hemen sonra fırından çıkarılmıştır.



Şekil 3.3 Yüksek sıcaklığa maruz kalan numuneler

Fırından çıkarılan numuneler Şekil 3.4'te görüldüğü gibi, havada soğutmada bütün yüzeylerinin hava ile teması sağlanmıştır. Suda soğutmada ise numuneler, içinde oda sıcaklığında durgun su bulunan deney kaplarına konulmuş, su değiştirilmek sureti ile oda sıcaklığına kadar soğutulmuştur.



Şekil 3.4 Havada ve suda soğutulan numuneler

3.4 Kontrol Deneyleri

Numuneler, yüksek sıcaklık etkisine maruz bırakılmadan önce etüvde $100\pm 5^{\circ}\text{C}$ sıcaklıkta 48 saat bekletilmiştir. Yüksek sıcaklık etkisinde kalan betonun termofiziksel, fiziksel ve mekanik özelliklerindeki değişimleri incelemek amacıyla, betonların sırasıyla yüzey renkleri ve ultrases geçiş süreleri ölçülmüş, basınç ve yarma deneyleri yapılmış, birim ağırlık, hacimce su emme, ısı iletim katsayısı ve su buharı difüzyonu direnç katsayısı değerleri ile sıcaklığın ve rengin derinliğe bağlı değişimi belirlenmiştir. Aşağıda termofiziksel, fiziksel ve mekanik özelliklerin araştırıldığı deneyler, yapılış sırasına göre açıklanmıştır.

3.4.1 Renk Ölçümü

Yüksek sıcaklık etkisinden sonra havada ve suda soğutulan beton numunelerin yüzey renkleri, ISO 7724/1'e uygun tayfsal ışıkölçer ile Munsell Renk Dizgesi esas alınarak belirlenmiştir (Şekil 3.5). Rengin tür, değer ve doymuşluk bileşenleri her numunede 6 ölçüm sonunda belirlenmiş, ortalama değerler Ek Çizelge 1-9'da, yüksek sıcaklığa bağlı değişimler Şekil 4.1-4.9'da verilmiştir.

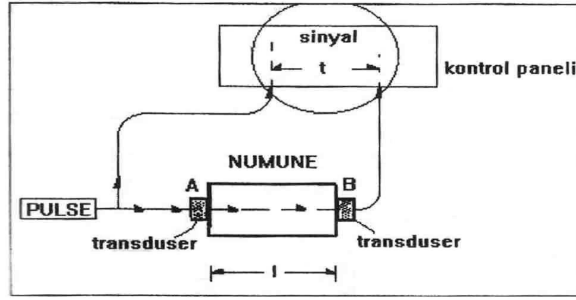


Şekil 3.5 Renk analizi

3.4.2 Ultrases Geçiş Hızının Belirlenmesi

Beton numunelerde, ASTM C 597 – BS 1881'e uygun 0,1 μ s duyarlıklı ultrases aleti ile (t, μ s) ses geçiş süreleri ölçülmüştür. Ses geçiş sürelerinin ölçülmesinde mala yüzeyindeki pürüzlerin oluşturduğu boşlukları doldurmak amacı ile numunelerin alt ve üst yüzeylerine vazelin sürülmüş 55 kHz'lik ses dalgaları gönderen ve alan iki transduser Şekil 3.6'da 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 faydalanarak ses geçiş hızı (V_s , mm/ μ s) hesaplanmış, sonuçlar Şekil 4.10-4.12 ve Ek Çizelge 10-12'de verilmiştir.

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



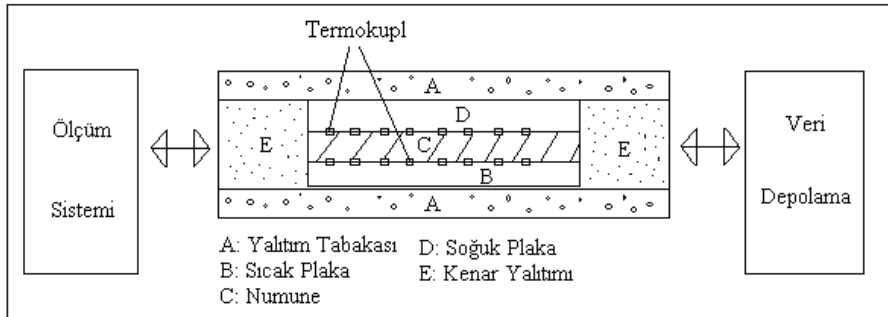
Şekil 3.6 Ultrasonik yöntem ile ses geçiş süresinin belirlenmesi

3.4.3 Birim Ağırlık ve Hacimce Su Emme

Değişmez ağırlığa kadar kurutulan numuneler, suya doygun hale getirilmiş, hacimce su emme miktarları ve Arşimet prensibinden yararlanılarak hacimleri ve birim ağırlıkları belirlenmiştir. Deney sonuçları Şekil 4.14-4.19 ve Ek Çizelge 13-18’de verilmiştir.

3.4.4 Isı İletim Katsayısının Belirlenmesi

Isı iletim katsayısının belirlenmesi için TS ISO 8302’ye uygun, Şekil 3.7 ve 3.8’de gösterilen tek deney parçalı mahfazalı sıcak plaka cihazı imal edilmiş, bu cihaz yardımı ile deney numunelerinin ısı iletim katsayıları belirlenmiştir.



Şekil 3.7 Tek deney parçalı mahfazalı sıcak plaka cihazı



Şekil 3.8 Tek deney parçalı mahfazalı sıcak plaka cihazı

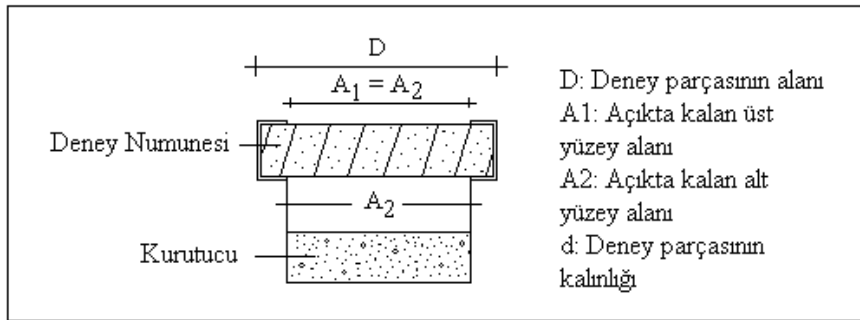
Deney 300x300x40 mm boyutlu plak numunelerde, kararlı hal şartları dikkate alınarak yapılmış, ısı iletim katsayısı (3.2) bağıntısı ile hesaplanmıştır.

$$\lambda = \frac{\Phi d}{A(T_1 - T_2)} \quad (3.2)$$

Bu bağıntıda, Φ (W) ısıtma ünitesinin ölçme kısmına sağlanan gücü, d (m) deney parçasının ortalama kalınlığını, T_1 (K) deney parçasının sıcak yüzeyinin, T_2 (K) deney parçasının soğuk yüzeyinin ortalama sıcaklığını, A (m²) deney parçasının ölçme alanını ifade etmektedir. Isı iletim katsayısının belirlenmesinde her bir parametre için 2 numunenin ortalaması alınmış, deney sonuçları Şekil 4.20-4.22 ve Ek-Çizelge 19-21’de verilmiştir.

3.4.5 Su Buharı Difüzyon Direnç Faktörünün Belirlenmesi

Su buharı difüzyon direnç faktörü (μ), havanın su buharı özgeçirgenliğinin, malzemenin su buharı özgeçirgenliğine oranı olarak tanımlanır. Bu faktör, aynı zamanda su buharı direncinin, aynı sıcaklıkta ve aynı kalınlıktaki durgun bir hava tabakasına göre büyüklüğünü ifade eder. Su buharı difüzyon direnç faktörünün belirlenmesi için, içinde kurutucu tuz bulunan kaba numune yerleştirilmiş (Şekil 3.9), $23 \pm 1^\circ\text{C}$ sıcaklık ve $\%85 \pm 3$ neme sahip nem kabine (Şekil 3.10) konulmuştur. Nem kabini ile deney hücresi arasında kısmi buhar basıncının farklı olması nedeni ile numuneden buhar geçişi sağlanmış, belirli zaman aralıklarında tartımlar yapılarak betonun buhar difüzyonu direnç faktörü (3.3-3.8) bağıntıları yardımıyla belirlenmiştir (TS EN 12086, 2002).



Şekil 3.9 Buhar geçirimsizliği deney düzeneği



Şekil 3.10 Buhar geçirirmliliği deney düzeneği

Seçilen zaman aralığında, her bir deney parçasının kütlesindeki değişme ($G_{1,2}$, mg/h) (3.3) bağıntısı ile hesaplanmıştır.

$$G_{1,2} = (m_2 - m_1) / (t_2 - t_1) \quad (3.3)$$

Bağıntıda m_2 ve m_1 deney düzeneğinin t_2 ve t_1 zamanlarındaki kütlesini (mg) ifade eder. Su buharı geçirgenlik hızı (g , mg/m².h) (3.4) bağıntısı ile hesap edilmiştir.

$$g = G / A \quad (3.4)$$

Bu bağıntıdaki A , m² cinsinden deney parçasının açıkta kalan alanıdır. Su buharı geçirgenliği (W , mg/m².h.Pa) (3.5) bağıntısı ile hesaplanmıştır.

$$W = G / (A \times \Delta p) \quad (3.5)$$

Bağıntıda verilen Δp su buharı basınç farkıdır (Pa). Geçirgenliğin tersi (3.6) su buharı direncidir (Z , m².h.Pa/mg).

$$Z = 1 / W \quad (3.6)$$

Su buharı özgeçirgenliği (δ , mg/m.h.Pa) (3.7) bağıntısı yardımı ile hesap edilir.

$$\delta = W \times d \quad (3.7)$$

Havanın su buharı özgeçirgenliğinin (δ_{hava} , mg/m.h.Pa), malzemenin su buharı özgeçirgenliğine oranı (3.8) su buharı difüzyon direnç faktörünü (μ , birimsiz) verir.

$$\mu = \delta_{hava} / \delta \quad (3.8)$$

Buhar difüzyon direnç faktörünün belirlenmesinde her bir seri için 5 numunenin ortalaması alınmış, deney sonuçları Şekil 4.23-4.25 ve Ek-Çizelge 22-24'te verilmiştir.

3.4.6 Sıcaklığın ve Rengin Derinliğe Bağlı Değişimi

Yüksek sıcaklık etkisi altında betonda sıcaklığın derinliğe bağlı değişiminin belirlenmesi için -karışım oranları Bölüm 3'te belirtilen- boyutları 100x100x200 mm olan, kalker ve silis esaslı agregaların ayrı ve birlikte kullanıldığı puzolan katkılı ve katkısız oniki seri beton üretilmiştir. Beton taze haldeyken mala yüzeyinden 50 mm derinliğe kadar, yüksek sıcaklık etkisine maruz kalacak olan yüzeyden itibaren 2, 10, 20, 40, 80, 150 ve 200 mm mesafelere 7 adet K tipi ısı çifti (thermocouple) batırılarak özenle yerleştirilmiştir (Şekil 3.11).



Şekil 3.11 Derinliğe bağlı sıcaklık değişimi ölçümü yapılacak numune

Üretimi ve kuru tamamlanan numuneler Şekil 3.12'de gösterilen deney düzeneğine yerleştirilerek tek bir yüzeyden yüksek sıcaklık etkisine maruz bırakılmıştır. Isı transferinin tek doğrultuda gerçekleşmesi için numune yan yüzeyleri ısı yalıtım malzemesi kullanılarak yalıtılmıştır. Fırın ortalama 3°C/dk ısınma hızı ile 600°C'ye kadar ısıtılmış ve bu sıcaklıkta 2 saat bekletilmiştir. Isıtma süreci sonunda numune deney düzeneğinden alınarak, havada ortam sıcaklığına kadar soğutulmuştur.



Şekil 3.12 Derinliğe bağlı sıcaklık ölçüm cihazı

Yüksek sıcaklık etkisi sonrası numuneler yüzeyden itibaren 10-40-80-150 mm mesafelerden kesilerek dilimlere ayrılmıştır (Şekil 3.13). Kesilen yüzeylerde tayfsal ışık ölçer ile Munsell Renk Dizgesi kullanılarak renk ölçümü yapılmıştır. Deney sonuçları Şekil 4.26-4.37, Ek Şekil 1-24 ve Ek-Çizelge 25-27’de verilmiştir



Şekil 3.13 Kesilerek dilimlere ayrılan numune

3.4.7 Yarmada Çekme Deneyi

Yarmada çekme deneyi TS EN 12390-6’ya uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Bunun için numuneler 0.04-0.06 MPa/sn yükleme hızı ile kırılmıştır (Şekil 3.14). Çekme dayanımları (3.9) bağıntısından hesaplanmış, sonuçlar Şekil 4.38-4.40 ve Ek Çizelge 28-30’da verilmiştir.

$$f_{ys} = \frac{2 \times P_k}{\pi \times d \times l} \quad (3.9)$$



Şekil 3.14 Suda soğutulan numunede yarma deneyi

3.4.8 Basınç Deneyi

Numuneler, TS EN 12390-3'e uygun olarak tek eksenli basınç deneyine tabi tutulmuştur. Deney, 3000 kN kapasiteli basınç aletinde 0.2-1.0 MPa/s yükleme hızı ile gerçekleştirilmiş, sonuçlar Şekil 4.41-4.43 ve Ek Çizelge 31-33'te verilmiştir.



Şekil 3.15 Basınç deneyi

4. DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ ve İRDELENMESİ

Üretimi ve kürü tamamlanan, sonrasında yüksek sıcaklık etkisine maruz bırakılan beton numunelerde yapılan kontrol deneyleri sonuçları Ek Çizelge 1-33'te verilmiş, bu sonuçlar Bölüm 4.1-4.9'da değerlendirilmiş ve irdelenmiştir.

4.1 Renk Değişiminin Değerlendirilmesi ve İrdelenmesi

Yüksek sıcaklık etkisinden sonra havada ve suda soğutulan beton numunelerin renk değişimleri yüzeyde ölçülmüş, aşağıda ayrı ayrı değerlendirilmiştir.

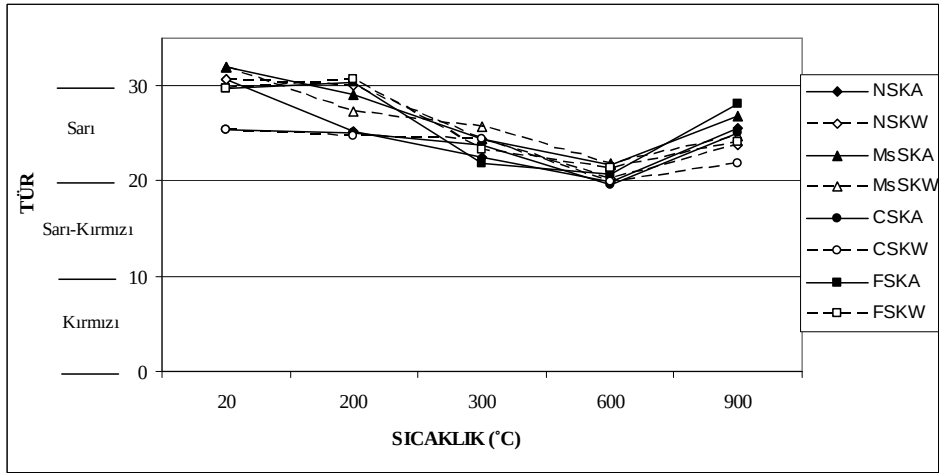
4.1.1 Silis ve Kalker Esaslı Agregalar ile Üretilen Betonlar

Sıcaklık değişimine bağlı olarak, üretimde silis ve kalker esaslı agregaların birlikte kullanıldığı I. Grup beton numunelerin yüzey renklerinde ortaya çıkan değişimler, rengin tür, değer ve doymuşluk bileşenleri için aşağıda değerlendirilmiş, deney sonuçları Ek Çizelge 1-3'te verilmiştir.

Renk türü oda sıcaklığında cüruf katkılı numunelerde sarı (~25) diğerlerinde ise yeşilimsi sarıdır (~31). Sıcaklık 300°C'ye ulaştığında, tüm serilerde rengin tür bileşeni kırmızı doğrultusunda değişmiş, 600°C'de rengin tür bileşeninin turuncumsu sarı (~21), 900°C'de ise tekrar sarı (~25) olduğu gözlenmiştir (Çizelge 4.1, Şekil 4.1).

Çizelge 4.1 Rengin türündeki değişimin büyüklüğü

Sıcaklık (°C)	Rengin Tür Bileşeni
20–300	5.69 adım kırmızıya doğru
300–600	3.09 adım kırmızıya doğru
600–900	4.34 adım sarıya doğru

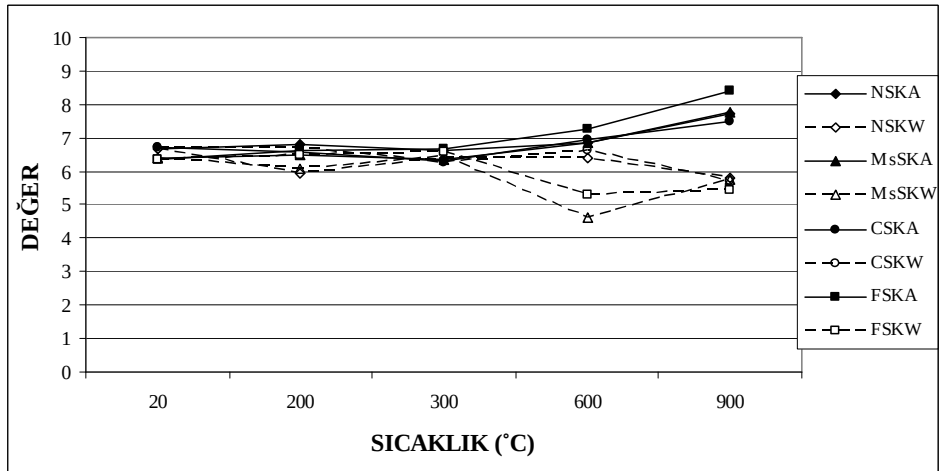


Şekil 4.1 I. Grup beton numunelerin renk değişimi (tür)-sıcaklık ilişkisi

Rengin değeri, oda sıcaklığında orta koyulukta olup ~6.5 büyüklüğündedir. Numune renklerinin açıklık koyuluğu 600°C'ye kadar belirgin bir değişim göstermemekle birlikte bu sıcaklıktan sonra havada soğutulan numunelerin renkleri açıklaşırken suda soğutulanların renkleri koyulaşmaktadır (Çizelge 4.2, Şekil 4.2).

Çizelge 4.2 Rengin değerindeki değişimin büyüklüğü

Sıcaklık (°C)	Rengin Değer Bileşeni
20–600	Havada soğutulanlar 0.46 adım ↑ Suda soğutulanlar 0.80 adım ↓
600–900	Havada soğutulanlar 0.85 adım ↑ Suda soğutulanlar 0.07 adım ↓

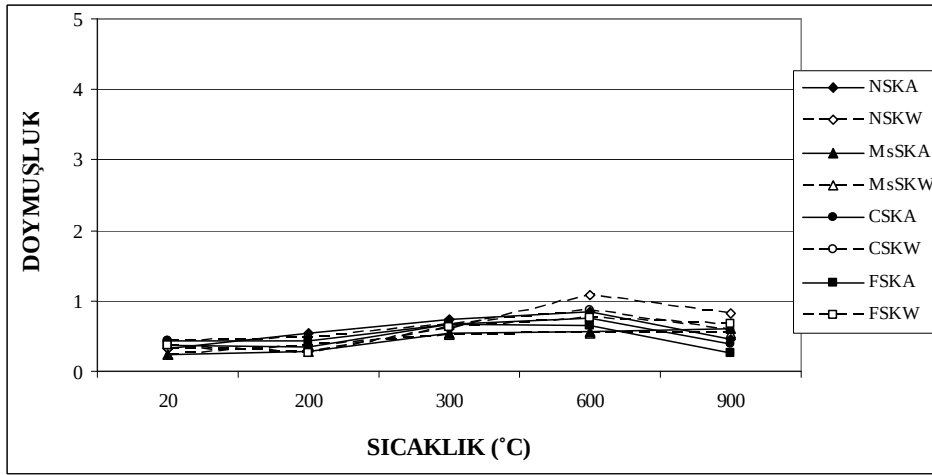


Şekil 4.2 I. Grup beton numunelerin renk değişimi (değer)-sıcaklık ilişkisi

Rengin doymuşluk bileşeni açısından yapılan incelemede, numunelerin oda sıcaklığında çok az doymuş (~0.3) olduğu saptanmıştır. Tüm serilerde numune renklerinin doymuşluğu 300°C'ye kadar hemen hemen hiç değişmemektedir. Bu sıcaklıktan sonra, sıcaklığın yükselmesi ile doymuşluk bileşeninde çok az bir artış olduğu görülmüştür. Sıcaklık 900°C'ye ulaştığında rengin doymuşluk bileşeni azalmıştır (Çizelge 4.3, Şekil 4.3).

Çizelge 4.3 Rengin doymuşluğundaki değişimin büyüklüğü

Sıcaklık (°C)	Rengin Doymuşluk Bileşeni
20–300	0.29 adım ↑
300–600	0.12 adım ↑
600–900	0.21 adım ↓



Şekil 4.3 I. Grup beton numunelerin renk değişimi (doymuşluk)-sıcaklık ilişkisi

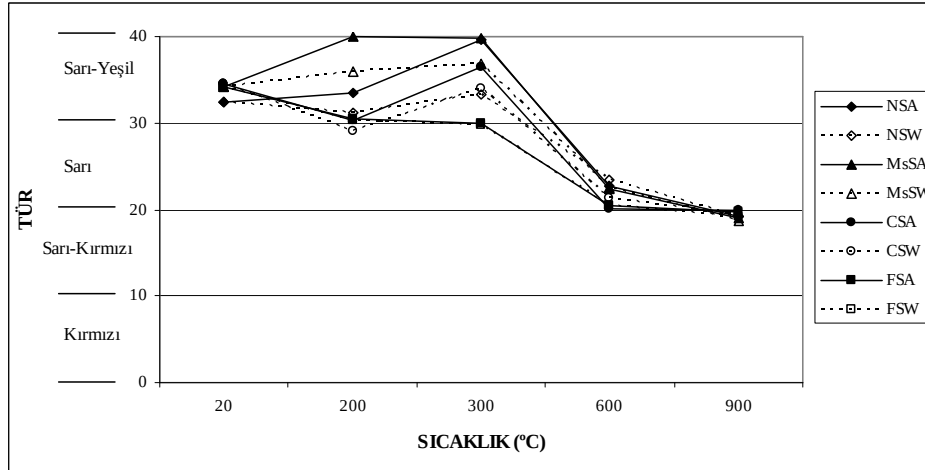
4.1.2 Silis Esaslı Agrega ile Üretilen Betonlar

Sıcaklık değişimine bağlı olarak, silis esaslı agregaya ile üretilen II. Grup beton numunelerin renklerinde ortaya çıkan değişimler, rengin tür, değer ve doymuşluk bileşenleri için aşağıda değerlendirilmiş, deney sonuçları Ek Çizelge 4-6'da verilmiştir.

Renk türü her seri için oda sıcaklığında yeşilimsi sarıdır ~34. Söz konusu koşullar için sıcaklık 20°C'den 300°C'ye doğru yükseldikçe, uçucu kül katkılı beton numuneler dışındaki tüm serilerde rengin tür bileşeninde yeşile doğru değişim gözlenmiştir. Bu sıcaklıktan sonra, 600°C'de rengin tür bileşeninin değişerek turuncumsu sarı (~22), 900°C'de ise sarımsı turuncu (~19) olduğu gözlenmiştir (Çizelge 4.4, Şekil 4.4).

Çizelge 4.4 Rengin türündeki değişimin büyüklüğü

Sıcaklık (°C)	Rengin Tür Bileşeni
20–300	1.14 adım sarıya doğru
300–600	13.35 adım kırmızıya doğru
600–900	2.34 adım kırmızıya doğru

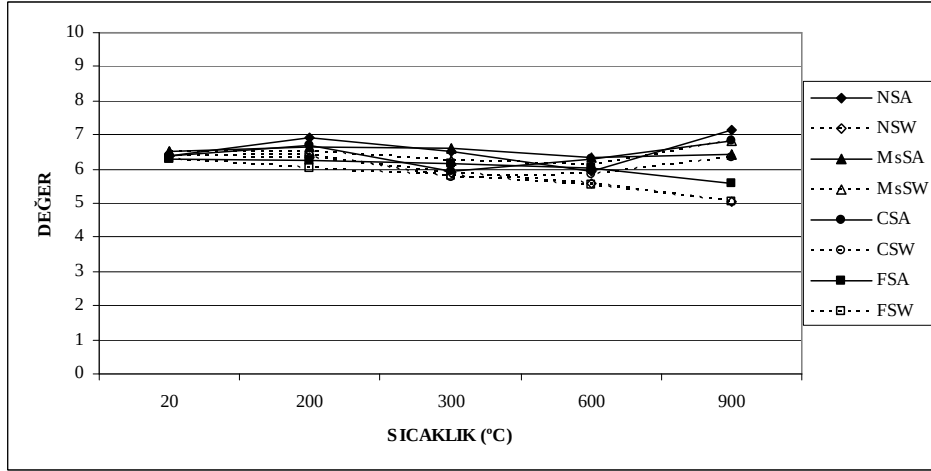


Şekil 4.4 II. Grup beton numunelerin renk değişimi (tür)-sıcaklık ilişkisi

Rengin değeri, oda sıcaklığında orta koyulukta olup ~6.4 büyüklüğündedir. Sıcaklık yükseldikçe, numune renklerinin açıklık koyuluğu genel olarak sıcaklık 20°C–600°C arasında iken belirgin bir değişim göstermemekle birlikte biraz koyulaşmakta, bu koyulaşma 600°C’den sonra azalmaktadır. Rengin değer boyutundaki değişim, tür boyutundaki değişimden farklı olarak, ele alınan tüm numunelerde her bir değişik sıcaklık için aynı doğrultuda değildir (Çizelge 4.5, Şekil 4.5).

Çizelge 4.5 Rengin değerindeki değişimin büyüklüğü

Sıcaklık (°C)	Rengin Değer Bileşeni
20–600	0.46 adım ↓
600–900	0.21 adım ↑

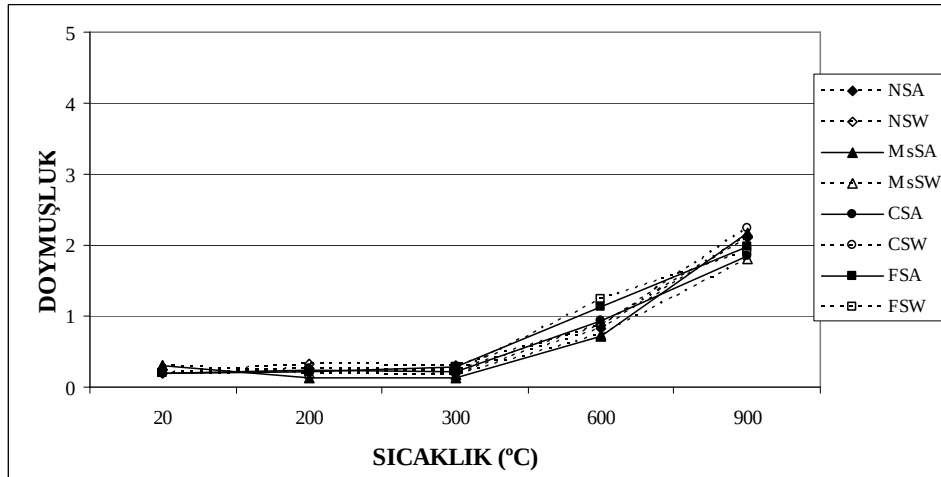


Şekil 4.5 II. Grup beton numunelerin renk değişimi (değer)-sıcaklık ilişkisi

Rengin doymuşluk bileşeni açısından yapılan incelemede, numunelerin oda sıcaklığında gri kabul edilebilecek ölçüde çok az doymuş olduğu saptanmıştır. 20°C sıcaklıkta doymuşluğun büyüklüğü ~0.2 olarak belirlenmiştir. Tüm serilerde numune renklerinin doymuşluğu 300°C'ye kadar hemen hemen hiç değişmemektedir. Bu sıcaklıktan sonra, sıcaklığın yükselmesi ile doymuşluk bileşeninde artış görülmüştür. Çizelge 4.6 ve Şekil 4.6'da görüldüğü gibi, sıcaklığın yükselmesine bağlı olarak rengin doymuşluk bileşeni ve betonun basınç dayanımında ortaya çıkan değişimler arasında ters orantı olduğu görülmüştür. Kritik sıcaklık olarak bilinen 600°C'deki ani değişim, yüksek sıcaklık etkisine maruz kalan betonda, hasar oranının belirlenmesi için rengin doymuşluk bileşeninin önemli bir parametre olduğunu göstermektedir.

Çizelge 4.6 Rengin doymuşluğundaki değişimin büyüklüğü

Sıcaklık (°C)	Rengin Doymuşluk Bileşeni
20–300	0.004 adım ↓
300–600	0.69 adım ↑
600–900	1.11 adım ↑



Şekil 4.6 II. Grup beton numunelerin renk değişimi (doymuşluk)-sıcaklık ilişkisi

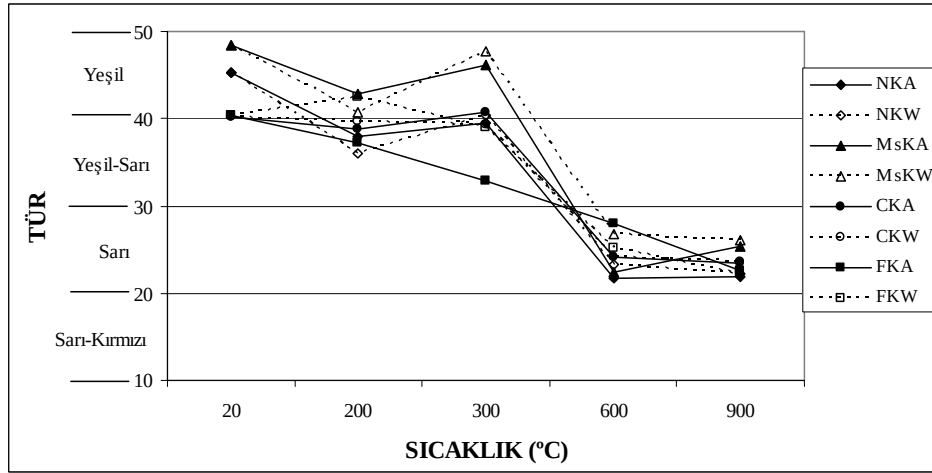
4.1.3 Kalker Esaslı Agrega ile Üretilen Betonlar

Sıcaklık değişimine bağlı olarak, kalker esaslı agregaya ile üretilen beton numunelerin renklerinde ortaya çıkan değişimler, rengin tür, değer ve doymuşluk bileşenleri için aşağıda değerlendirilmiş, deney sonuçları Ek Çizelge 7-9'da verilmiştir.

Renk türü her grup için oda sıcaklığında yeşildir (~44). Söz konusu koşullar için sıcaklık 20°C'den 300°C'ye doğru yükseldikçe, tüm serilerde rengin tür bileşeninde sarıya doğru (~41) değişim gözlenmiştir. 600°C'de rengin tür bileşeninin değişerek sarı (~25), 900°C'de ise turuncumsu sarı (~23) olduğu gözlenmiştir (Çizelge 4.7, Şekil 4.7).

Çizelge 4.7 Rengin türündeki değişimin büyüklüğü

Sıcaklık (°C)	Rengin Tür Bileşeni
20–300	2.79 adım sarıya doğru
300–600	16.35 adım sarıya doğru
600–900	1.08 adım kırmızıya doğru

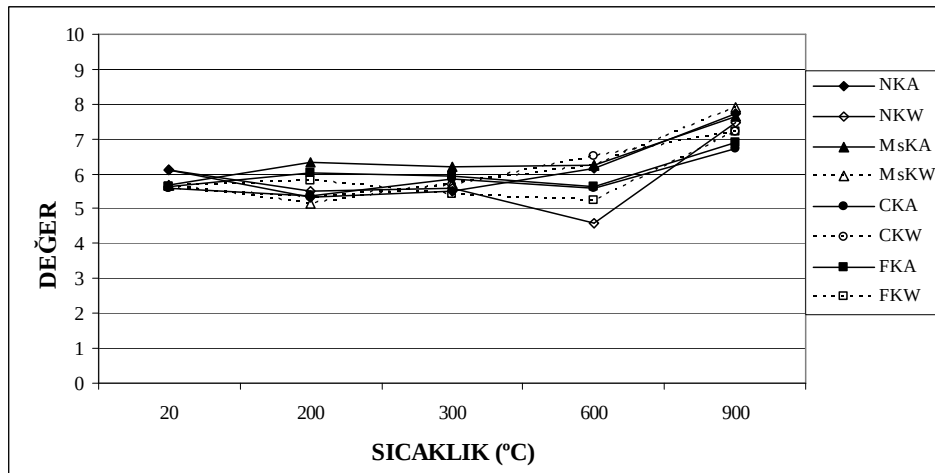


Şekil 4.7 III. Grup beton numunelerin renk değişimi (tür)-sıcaklık ilişkisi

Rengin değeri, oda sıcaklığında orta koyulukta olup 5.75 büyüklüğündedir. Sıcaklık yükseldikçe, numune renklerinin açıklık koyuluğu genel olarak sıcaklık 20–200°C arasında iken belirgin bir değişim göstermemektedir. 200°C’den sonra ise yüzey renkleri açığa çıkmaktadır. Rengin değer boyutundaki yükselme 200–600°C arasında 0.21 adım iken, 600–900°C arasında bir miktar daha artarak 1.56 adım olmaktadır (Çizelge 4.8, Şekil 4.8).

Çizelge 4.8 Rengin değerindeki değişimin büyüklüğü

Sıcaklık (°C)	Rengin Değer Bileşeni
20–200	0.16 adım ↓
200–600	0.21 adım ↑
600–900	1.56 adım ↑

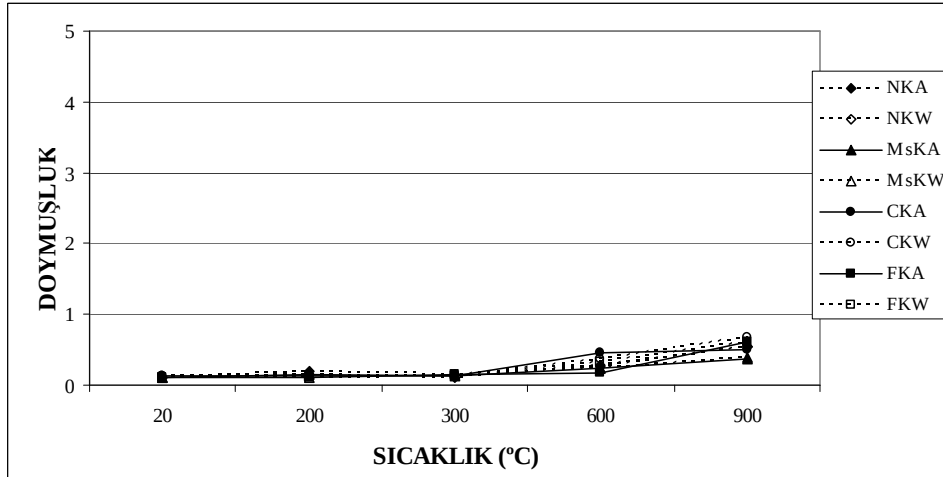


Şekil 4.8 III. Grup beton numunelerin renk değişimi (değer)-sıcaklık ilişkisi

Rengin doymuşluk bileşeni açısından yapılan incelemede, numunelerin oda sıcaklığında çok az doymuş olduğu saptanmıştır (0.11). Tüm serilerde numune renklerinin doymuşluğu 300°C'ye kadar hemen hemen hiç değişmemektedir. 300°C'den sonra sıcaklığın yükselmesi ile doymuşluk bileşeninde artışlar görülmüştür. Rengin doymuşluk bileşenindeki artış 300–600°C arasında 0.16 adım, 600–900°C arasında ise 0.23 adım büyüklüğündedir (Çizelge 4.9, Şekil 4.9).

Çizelge 4.9 Rengin doymuşluğundaki değişimin büyüklüğü

Sıcaklık (°C)	Rengin Doymuşluk Bileşeni
20–300	0.02 adım ↑
300–600	0.16 adım ↑
600–900	0.23 adım ↑



Şekil 4.9 III. Grup beton numunelerin renk değişimi (doymuşluk)-sıcaklık ilişkisi

Her üç gruptaki betonların renk değişimi karşılaştırıldığında oda sıcaklığında betonun yüzey renginin kullanılan agrega türüne göre önemli ölçüde değiştiği tespit edilmiştir. Kullanılan puzolan türünün %40 oranında cüruf katılması durumu dışında yüzey rengine önemli bir etkisi olmamıştır. Oda sıcaklığında yüzey renkleri farklılık gösterse de yüksek sıcaklık etkisi altında betonun yüzey renginin sarı-kırmızı doğrultusunda değiştiği bu değişimin özellikle 600°C'de daha belirgin hale geldiği görülmüştür. Rengin değer bileşeninde yüksek sıcaklık etkisinde önemli bir değişiklik olmazken, doymuşluk bileşeni tüm gruplarda 600°C'de rengin tür bileşeninde olduğu gibi değişiklik göstererek artmıştır. Deney sonuçlarından görüldüğü üzere, beton için kritik sıcaklık olarak bilinen 600°C'deki bu ani renk değişimi yüksek

sıcaklık etkisine maruz kalan betonun tahribatsız bir deney yöntemi olan renk ölçümü ile maruz kaldığı sıcaklık hakkında fikir sahibi olunacağı anlaşılmaktadır.

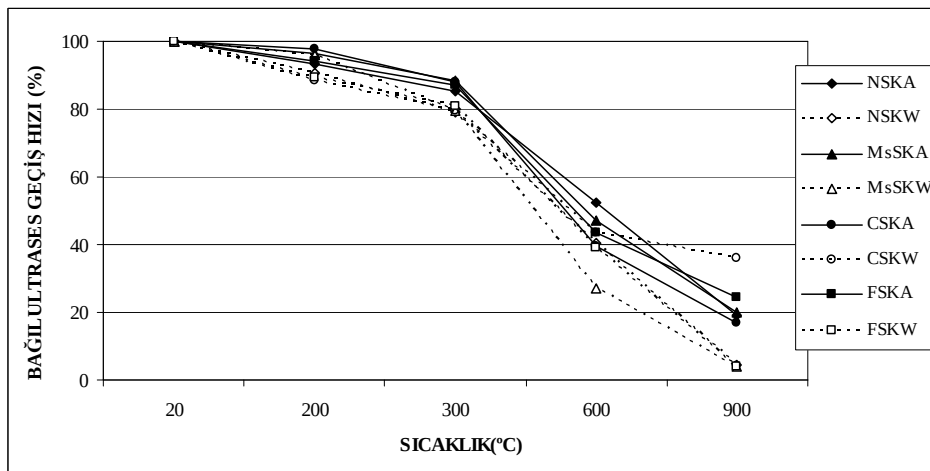
4.2 Ultrases Geçiş Hızı Değerlerinin Değerlendirilmesi ve İrdelenmesi

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 10-12’de verilmiştir.

4.2.1 Silis ve Kalker Esaslı Agregas ile Üretilen Betonlar

Silis ve kalker esaslı agreganın birlikte kullanıldığı I. Grup beton serilerinde bağıl ses geçiş hızının sıcaklıkla değişimi Şekil 4.10’da verilmiştir. Bu gruptaki kontrol numunelerinden en düşük ses geçiş hızı 4.4 mm/μs ile kalker ve silis esaslı agreganın birlikte kullanıldığı katkısız (NSK) seride, en büyük değer ise 4.6 mm/μs ile yine kalker ve silis esaslı agreganın birlikte kullanıldığı cüruf katkılı (CSK) seride elde edilmiştir (Ek Çizelge 10).

Deney sonuçlarına göre ses geçiş hızının artan sıcaklıkla birlikte azaldığı tespit edilmiştir (Şekil 4.10). Bu azalma 300°C’de maksimum %21 oranındadır. Sıcaklık 600°C’ye ulaştığında ultrases geçiş hızlarındaki azalma daha belirgindir. 900°C’de bu azalma cüruf katkılılar hariç suda soğutulanlarda %96’ya ulaşmıştır. Havada soğutulanlarda ise bu oran ortalama %80’dir.

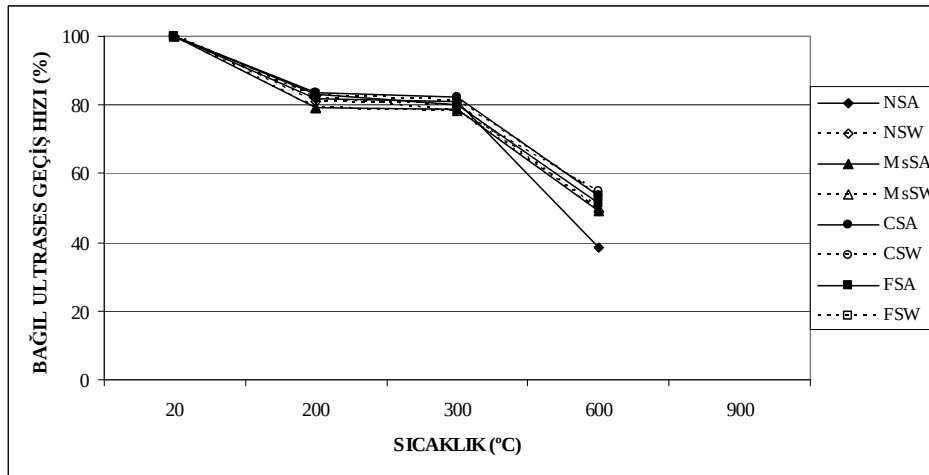


Şekil 4.10 I. Grup beton numunelerin bağıl ses geçiş hızı-sıcaklık ilişkisi

4.2.2 Silis Esaslı Agregaya ile Üretilen Betonlar

Silis esaslı agregaya ile üretilen beton numuneler (II. Grup) için bağıl ses geçiş hızının sıcaklıkla değişimi Şekil 4.11’de verilmiştir. Bu gruptaki kontrol numunelerinden en düşük ses geçiş hızı 5.0 mm/μs ile CS serisinde, en büyük değer ise 5.3 mm/μs ile MsS serisindedir (Ek Çizelge 11).

Ultrases deneyi sonuçlarına göre ses geçiş hızlarında 200°C’de yaklaşık %18.4 kadar azalmıştır (Şekil 4.11). 200-300°C arasında önemli bir değişiklik olmamış, 600°C’de tüm serilerde belirgin bir şekilde azalma gözlenmiştir. 900°C’de ise ses geçiş hızı ultrasonik test aletinin kapasitesini aştığı için değer okunamamıştır. 600°C’ye kadar kullanılan mineral katkının ve soğutma şeklinin yüksek sıcaklık nedeni ile ses geçiş hızına önemli bir etkisi olmazken, bu sıcaklıkta katkısız numunelerin havada soğutulan grubundaki kayıp yaklaşık %60 ile en yüksek değere ulaşmıştır.



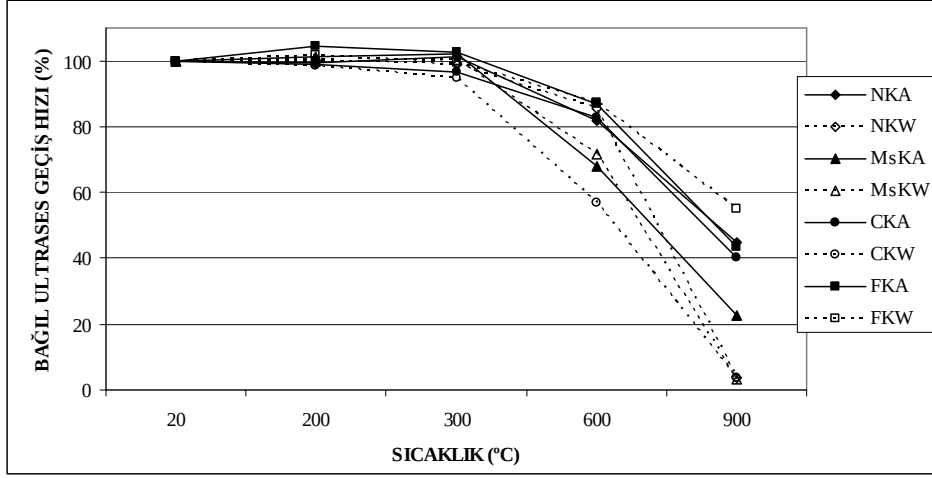
Şekil 4.11 II. Grup beton numunelerin bağıl ses geçiş hızı-sıcaklık ilişkisi

4.2.3 Kalker Esaslı Agregaya ile Üretilen Betonlar

Kalker esaslı agregaya ile üretilen beton numuneler (III. Grup) için bağıl ses geçiş hızının sıcaklıkla değişimi Şekil 4.12’de verilmiştir. Bu gruptaki kontrol numunelerinden en düşük ses geçiş hızı 4.2 mm/μs ile FK serisinde, en büyük değer ise 4.5 mm/μs ile MsK serisinde elde edilmiştir (Ek Çizelge 12).

Ultrases deneyi sonuçlarına göre ses geçiş hızlarında 300°C’ye kadar önemli bir değişiklik olmazken, sıcaklık 600-900°C’lere ulaştığında tüm serilerde belirgin bir şekilde azalma gözlenmiştir (Şekil 4.12). Bu azalma genelde havada soğutulanlara göre suda soğutulanlarda

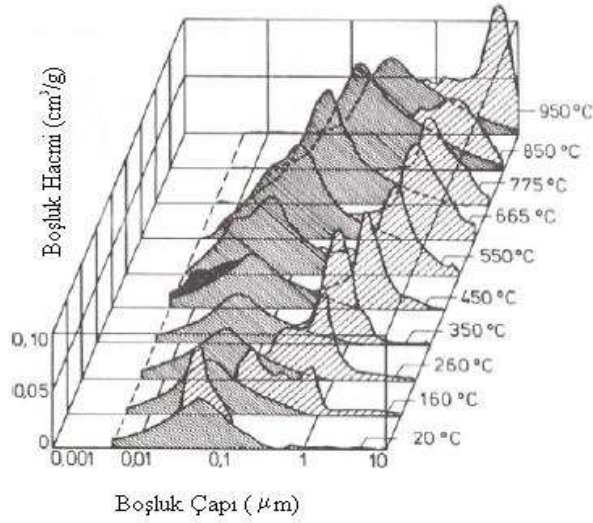
daha fazladır. Silis dumanı katkılı serinin ultrases geçiş hızındaki azalma 600°C ve 900°C’de diğerlerinden daha fazla olmuştur.



Şekil 4.12 III. Grup beton numunelerin bağıl ses geçiş hızı-sıcaklık ilişkisi

Oda sıcaklığında betonların ultrases geçiş hızına kullanılan agrega türünün önemli bir etkisi olmazken, günümüzde beton üretiminde kullanımı giderek yaygınlaşan puzolanların kalsiyum hidroksit ile reaksiyona girerek CSH jelleri oluşturması gerek çimento hamurunda gerekse çimento hamuru-agrega ara yüzünde poroziteyi önemli ölçüde azaltarak (Mehta ve Monteiro, 2006) ultrases geçiş hızlarının katkısız göre daha yüksek olmasını sağlamıştır.

Şekil 4.10-12’de görüldüğü üzere tüm gruplarda sıcaklık artışıyla ultrases geçiş hızı azalmış, sıcaklık etki süresinin bu değişime önemli bir etkisi olmamıştır. Bu durum sıcaklığın etkisiyle betondaki boşluk oranının artması ile açıklanabilir. Alonso vd. (2003b) tarafından yapılan bir çalışmada boşluk çap ve hacminin sıcaklık etkisi ile değişimi gösterilmiştir (Şekil 4.13). Şekilde çimento hamurundaki poroziteyi gösteren koyu renkli bölgede, 450°C’ye kadar önemli bir biçim ve hacim değişikliği olmadığı, sadece boyutunun değiştiği, bu sıcaklıktan sonra ise hidrate olmuş çimento ürünlerinin dehidratasyonu ile boşlukların şeklinin ve konumunun değiştiği belirtilmiştir.



Şekil 4.13 Yüksek sıcaklık etkisindeki harcın boşluk yapısının değişimi (Alonso vd., 2003b)

Şekil 4.13'te agrega ile çimento hamuru ara yüzündeki boşlukları temsil eden açık renkli bölgede, artan sıcaklıkla birlikte boşlukların büyüdüğü ve maksimum porozitede önemli bir değişiklik görüldüğü belirtilmiştir. Agrega ile çimento hamuru arasındaki termal uyumsuzluk sonucu sıcaklığın etkisi ile çatlaklar oluşmuş ve toplam boşluk miktarı artmıştır (Alonso vd., 2003b).

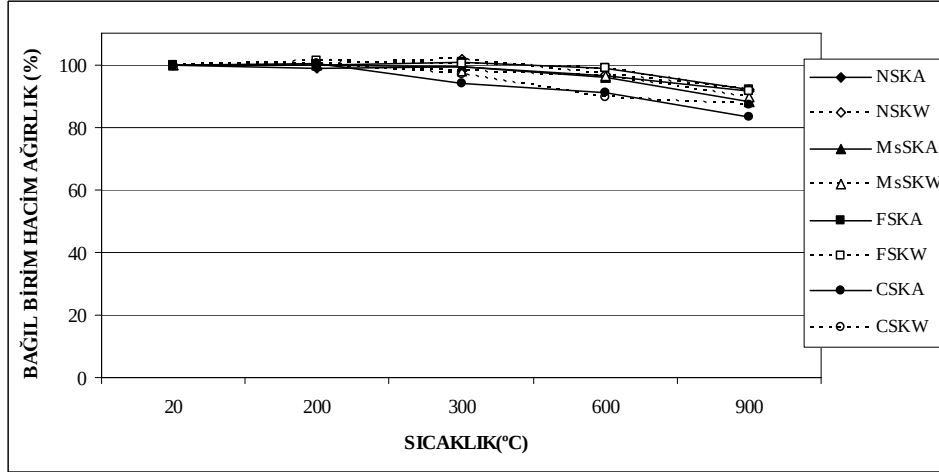
Ultrases geçiş hızındaki azalma tüm gruplarda 300°C'de en fazla %20 iken, sıcaklık 600°C'ye ulaştığında bu azalma %60'a varmıştır. Betonun ultrases geçiş hızındaki önemli değişimin görüldüğü sıcaklık (600°C) ile yüzey rengindeki ani değişimin görüldüğü sıcaklığın (600°C) aynı olması iki ölçüm sonucunun birbirini destekler nitelikte olduğunu göstermektedir. Bu durum göz önüne alındığında, yangın gibi yüksek sıcaklık etkisine maruz kalan betonun son durumunun belirlenmesi ve değerlendirilmesi amacı ile yapılacak tahribatsız ölçümlerde ultrases geçiş hızının yanı sıra renk ölçümünden de yararlanılabileceği anlaşılmaktadır. Ayrıca yüksek sıcaklık etkisi altında beton yüzeyinin normalden daha fazla karbonatlaşması ve bu durumun yüzey sertliğini arttırması, yüzey sertliği ölçümü yerine renk ölçümü sonuçlarından yararlanılmasının betonun mevcut durumunun tespitinde daha doğru sonuçlar vereceğine işaret etmektedir.

4.3 Birim Ağırlık ve Su Emme Sonuçlarının Değerlendirilmesi ve İrdelenmesi

Bu bölümde yüksek sıcaklığın betonun birim ağırlık ve dışa açık boşluklarını temsil eden hacimce su emme değerlerine etkisi değerlendirilmiş, deney sonuçları Ek Çizelge 13-18'de verilmiştir.

4.3.1 Silis ve Kalker Esaslı Agrega ile Üretilen Betonlar

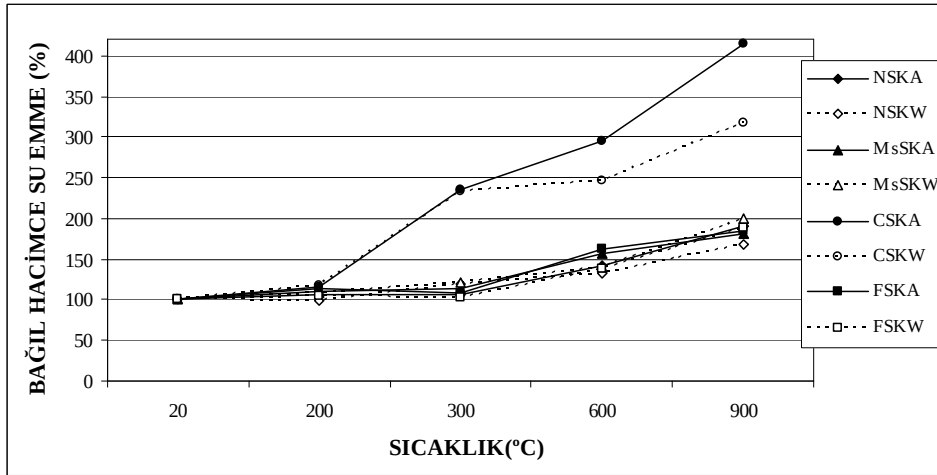
Silis ve kalker esaslı agrega ile üretilen I. Grup beton serileri kontrol numunelerinde en düşük birim ağırlık 2284 kg/m^3 ile uçucu kül katkılılarda gözlenirken en yüksek 2455 kg/m^3 ile cüruf katkılılarda gözlenmiştir (Ek Çizelge 13).



Şekil 4.14 I. Grup beton numunelerin bağıl birim ağırlık-sıcaklık ilişkisi

Deney sonuçlarına göre, birim ağırlık, önemli bir değişiklik olmamasına karşın tüm serilerde sıcaklık arttıkça azalmaktadır (Şekil 4.14). Sıcaklığın etkisi ile serbest ve kimyasal bağlı suyun buharlaşarak bünyeden uzaklaşması, malzemenin genişerek hacminin artması birim ağırlığın azalmasına sebep olmaktadır (Aköz vd., 1995; Anderberg, 2003). Belirgin azalmalar özellikle 900°C 'de tespit edilmiştir. Bu sıcaklıkta birim ağırlıktaki azalma en fazla %17 ile cüruf katkılı havada soğutulan numunelerde, en az ise %8 ile katkısız suda soğutulan ve uçucu kül katkılı havada soğutulan numunelerde gözlenmiştir.

Hacimce su emme deneyi sonuçlarına göre, kontrol numunelerinde %40 oranında cüruf katkılı seri %5.6 ile en düşük hacimce su emme oranına sahiptir (Ek Çizelge 14). Diğer kontrol numunelerinde ise hacimce su emme oranları birbirlerine çok yakın değerlerde olup, bu oranlar %10.2 ile %11.2 arasında değişmektedir.



Şekil 4.15 I. Grup beton numunelerin hacimce su emme-sıcaklık ilişkisi

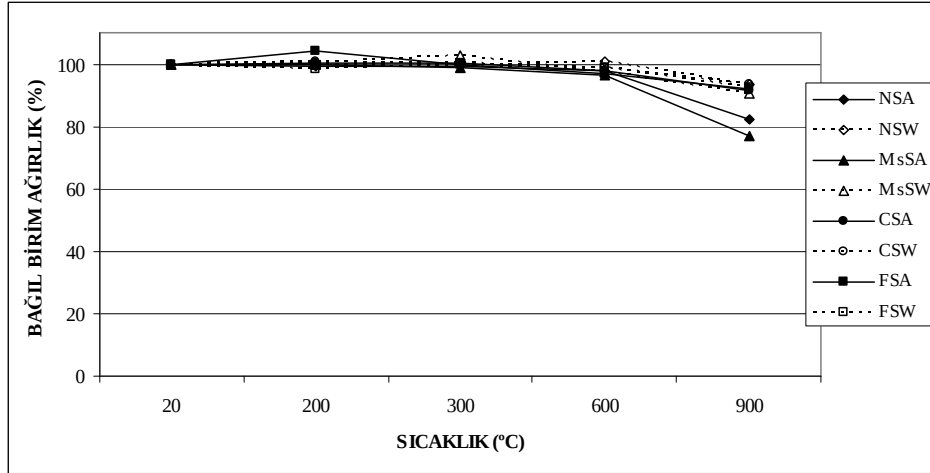
Yüksek sıcaklık etkisinde tüm serilerde hacimce su emme oranları artmıştır. Cüruf katkılılarda diğer beton serilerine göre su emme oranındaki artış daha fazladır, 300°C’de hacimce su oranı 20°C’deki değerin iki katından daha fazladır. Maksimum sıcaklık olan 900°C’de su emme değeri cüruf katkılılarda dört katına kadar çıkarken, diğer serilerde en fazla silis dumanı katkıli suda soğutulan numunelerde olmak üzere yaklaşık iki kat kadar artmıştır.

4.3.2 Silis Esaslı Agrega ile Üretilen Betonlar

Silis esaslı agregası ile üretilen II. Grup beton serileri kontrol numunelerinde en düşük birim ağırlık 2350 kg/m³ ile yüksek fırın cürufu katkılılarda gözlenirken en yüksek 2390 kg/m³ ile silis dumanı katkılılarda gözlenmiştir (Ek Çizelge 15).

Sıcaklık etkisi altında birim ağırlıkta önemli bir değişiklik olmamasına karşın tüm serilerde sıcaklık arttıkça azalmaktadır (Şekil 4.16). Belirgin azalmalar özellikle 900°C’de gözlenmiştir. Genel olarak soğutma şeklinin etkisi pek görülmemekle birlikte suda soğutulan numunelerin birim ağırlığındaki azalma havada soğutulanlara göre daha düşüktür.

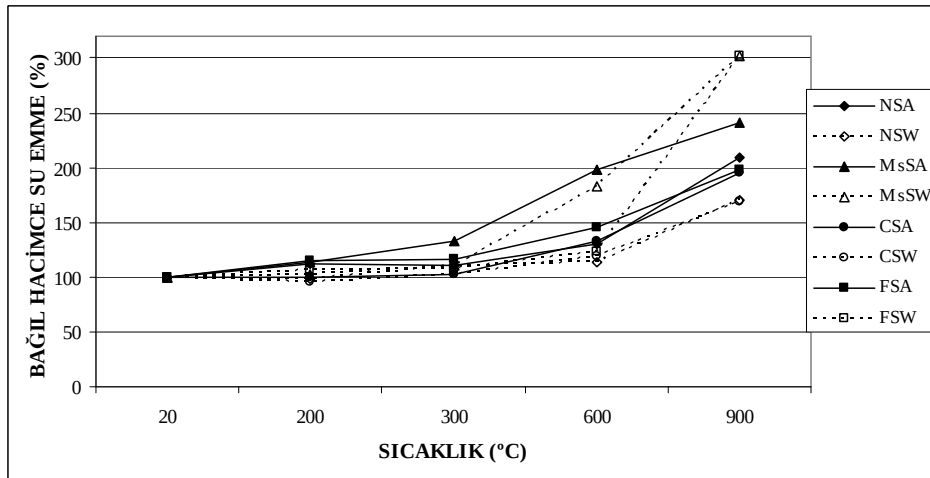
Tüm serilerde birim ağırlıktaki ortalama azalma 600°C’de %2.2, 900°C’de %8.2’dir. Birim hacim ağırlıktaki en fazla azalma silis dumanı katkıli seride görülürken, en iyi performansı havada soğutulanlarda uçucu kül katkıli, suda soğutulanlarda ise katkısız numuneler göstermiştir.



Şekil 4.16 II. Grup beton numunelerin birim ağırlık-sıcaklık ilişkisi

Hacimce su emme deneyi sonuçlarına göre, kontrol numunelerinde silis dumanı katkıları %7.3 ile en düşük hacimce su emme oranına sahiptir. Diğer kontrol numunesi gruplarında ise hacimce su emme oranları birbirlerine çok yakın değerlerde olup oranlar %10.3 ile %11.3 arasında değişmektedir (Ek Çizelge 16).

Yüksek sıcaklık etkisinde silis dumanı katkılı tüm serilerde diğer serilere nazaran su emme oranındaki artış daha fazladır. Örneğin 600°C’de silis dumanı katkılı seride artış oranı %83 ile %98 arasında değişirken, diğer serilerde bu oran %14 ile %45 arasındadır. Tüm sıcaklıklarda yüksek fırın cürufu katkılı suda soğutulan numuneler hacimce su emme bakımından en iyi performansı göstermiştir. 900°C’de silis dumanı ve uçucu kül katkılı numunelerin suda soğutulan gruplarında hacimce su emmedeki artış oranı % 300’ü bulmuştur.

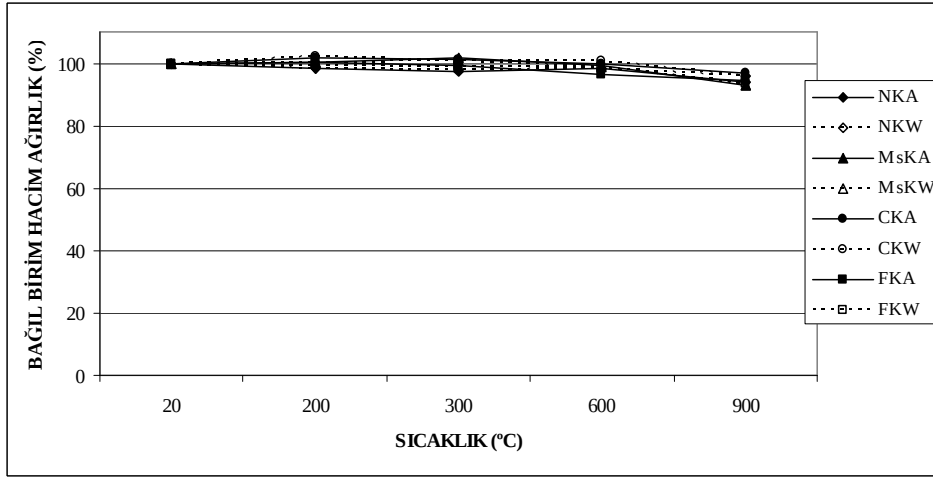


Şekil 4.17 II. Grup beton numunelerin hacimce su emme-sıcaklık ilişkisi

4.3.3 Kalker Esaslı Agrega ile Üretilen Betonlar

Birim ağırlığın ve su emme oranlarının sıcaklıkla değişimi kalker esaslı agrega ile üretilen III. Grup beton serileri için incelenmiş, deney sonuçları Ek Çizelge 17-18’de verilmiştir. Kontrol numunelerinde en düşük birim ağırlık 2300 kg/m^3 ile yüksek fırın cürufu katkılılarda gözlenirken en yüksek 2350 kg/m^3 ile uçucu kül katkılılarda gözlenmiştir.

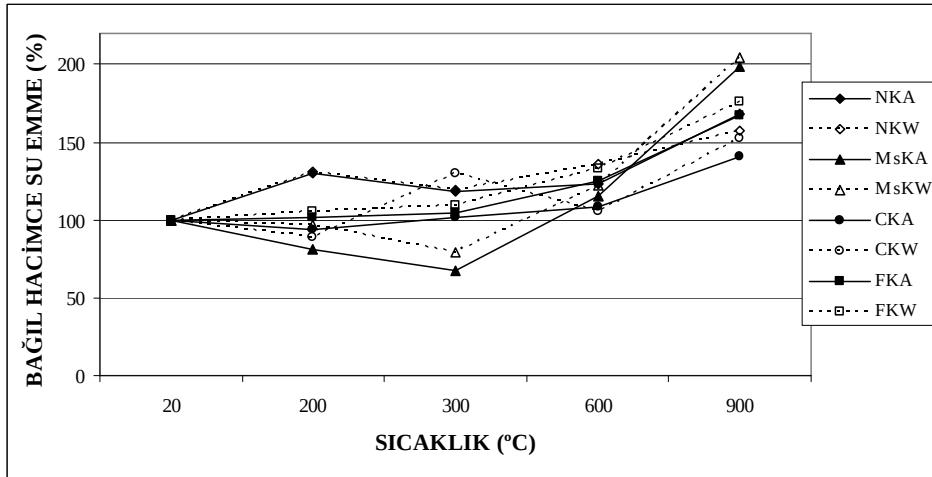
Deney sonuçlarına göre, I. ve II. Grup beton serilerine benzer şekilde, birim ağırlık, önemli bir değişiklik olmamasına karşın tüm gruplarda sıcaklık arttıkça azalmaktadır (Şekil 4.18). Soğutma türünün ve kullanılan puzolan cinsinin birim ağırlık değişimine önemli bir etkisi olmamıştır.



Şekil 4.18 III. Grup beton numunelerin birim ağırlık-sıcaklık ilişkisi

Hacimce su emme deneyi sonuçlarına göre, kontrol numunelerinde silis dumanı katkıları %9.1 ile en düşük hacimce su emme oranına sahiptir. Diğer kontrol numunelerinde ise hacimce su emme katkısızda %10.1, cüruf katkılıda %11.8 ve uçucu kül katkılıda %9.3 oranındadır.

Su emme oranı tüm serilerde 300°C’de farklılıklar göstermiştir. Yüksek sıcaklık etkisinde silis dumanı katkılı havada soğutulan numunelerde su emme oranı 300°C’ye kadarki sıcaklıklarda azalmış, bu sıcaklıktan sonra artmış, 900°C’de %200’e ulaşarak en yüksek su emme değerini almıştır.



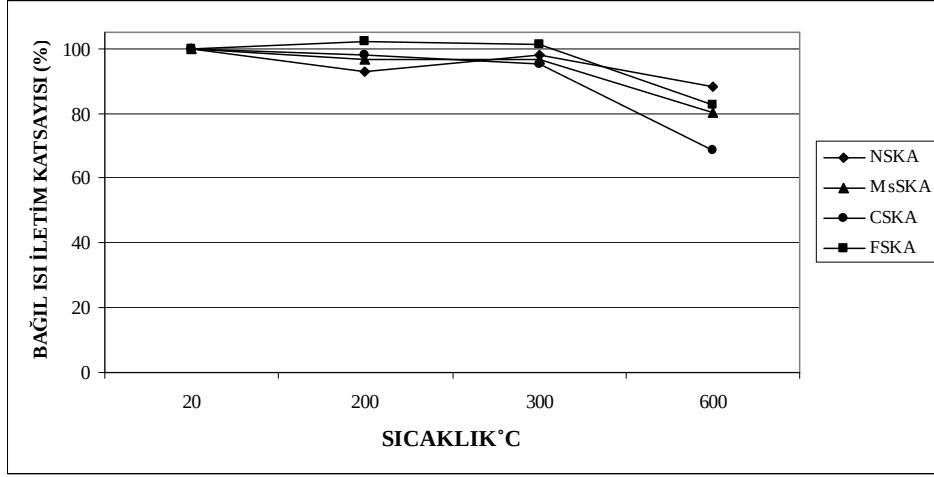
Şekil 4.19 III. Grup beton numunelerin hacimce su emme-sıcaklık ilişkisi

4.4 Isı İletim Katsayısı Değerlerinin Değerlendirilmesi ve İrdelenmesi

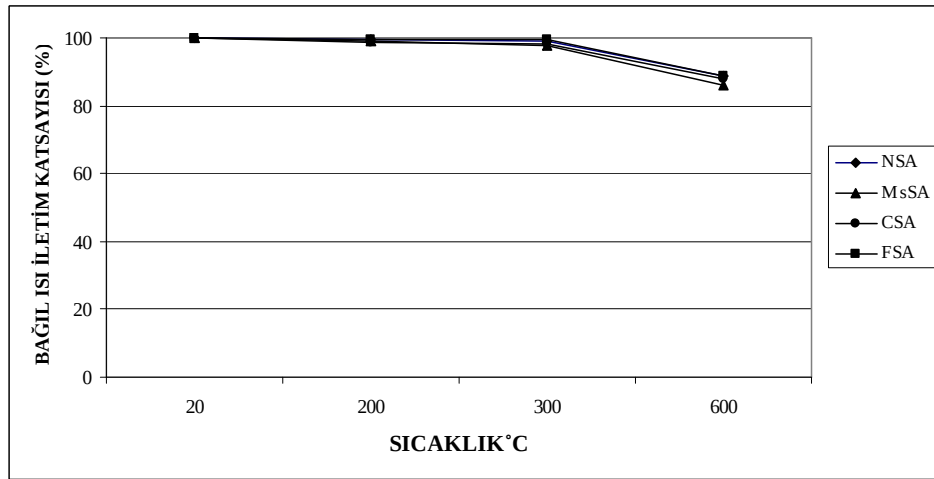
Isı iletim katsayısının sıcaklıkla değişimi I., II. ve III. Grup betonlar için aşağıda değerlendirilmiş ve irdelenmiş, deney sonuçları Ek Çizelge 19-21’de verilmiştir.

Deney sonuçlarına göre betonların ısı iletim katsayıları 1.89 W/mK ile 2.13 W/mK arasında değişmekte olup, farklı agrega ve puzolan türünün ısı iletim katsayısında önemli bir değişikliğe neden olmadığı görülmüştür (Ek Çizelge 19-21). Ancak silis esaslı agrega ile üretilen betonların (II. Grup) ısı iletim katsayıları kalker esaslı agrega ile üretilen betonlara (III. Grup) göre uçucu kül katkılı betonlar hariç diğer tüm serilerde daha yüksek değerler almıştır. Betonun ısı iletim katsayısına etki eden en önemli parametre kullanılan agrega türü ve miktarıdır. Silis esaslı agreganın ısı iletim katsayısı (2.4-3.6 W/mK) kalker esaslı agregadan (1.9-2.8 W/mK) yüksektir (Bazant ve Kaplan, 1996). Bunun nedeni silis esaslı agreganın kalker esaslı agregaya göre daha yoğun bir kristal yapıya sahip olmasıyla açıklanmaktadır (Kodur ve Sultan, 2003). Bu durumda, silis esaslı agrega ile üretilen betonun ısı iletim katsayısının kalker esaslı agrega ile üretilenden daha yüksek olması beklenen bir sonuçtur. Yüksek sıcaklık etkisine altında ise betonların ısı iletim katsayılarının artan sıcaklıkla beraber azaldığı tespit edilmiştir (Şekil 4.20-22). Bu azalma 600°C’de daha belirgindir. Katkısız seri hariç her sıcaklıkta kalker esaslı agrega ile üretilen betonların ısı iletim katsayısı silis esaslı agrega ile üretilen betonlara göre daha düşük, yüksek sıcaklık etkisi altındaki azalma oranı daha fazladır. Bu azalma en fazla 600°C’de %25 oranında kalker esaslı agrega ile üretilen cüruf katkılı (CK) seride, en az %6 oranında kalker esaslı agrega ile üretilen katkısız (NK) seride gözlenmiştir. Kalker esaslı agrega, çimento hamurundaki kalsiyumalüminatlar ile reaksiyona girerek kalsiyumkarboalüminatları oluşturur ve agrega-

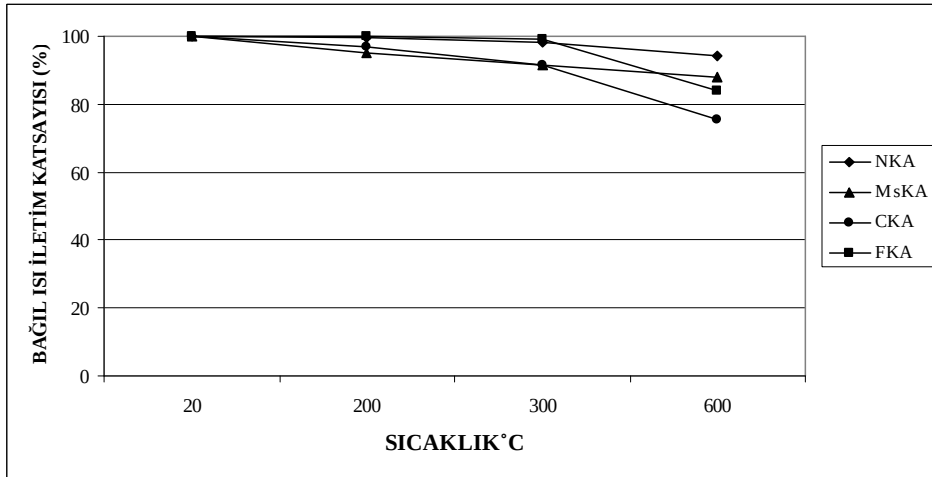
çimento hamuru ara yüzeyinde daha yoğun bir yapı meydana getirir (Ollivier vd., 1995). Kalkerin, çimento hamuru ile reaksiyona girerek daha yoğun bir arayüze sahip olması ancak yüksek sıcaklık etkisi altında öncelikle arayüzde bozulmaların meydana gelmesi (Riley, 1991), kalker esaslı agreganın kullanıldığı betonlarda, ısı iletim katsayısının yüksek sıcaklıktan daha fazla etkilenmesine neden olabilir. Puzolan katkılı betonların ısı iletimindeki azalma tüm gruplarda katkısız göre daha fazladır.



Şekil 4.20 I. Grup beton numunelerin ısı iletim katsayısı-sıcaklık ilişkisi



Şekil 4.21 II. Grup beton numunelerin ısı iletim katsayısı-sıcaklık ilişkisi



Şekil 4.22 III. Grup beton numunelerin ısı iletim katsayısı-sıcaklık ilişkisi

DeneySEL çalışma sonuçları irdelendiğinde betonun ısı iletim katsayısının üretimde kullanılan agrega ve puzolan türüne göre az da olsa değiştiği görülmüştür. TS EN 1992-1-2’de yüksek sıcaklık etkisinde kalan betonun ısı özelliklerinin belirlenmesinde yararlanılmak üzere, betonun maruz kaldığı sıcaklık ve kullanılan agrega türü (kalker ve silis esaslı agregalar) için farklı bağıntılar verilmiş, ısı iletim katsayısının alt ve üst değerlerinin *Milli Ek*’te verilmesi önerilmiştir. Ancak binalarda ısı yalıtım kurallarının verildiği ve yoğunlaşma tahkikinin gösterildiği TS 825 standardında mineral katkıların ve agrega türünün bu etkisi dikkate alınmamış, beton için tek bir hesap değeri (1.65 W/mK) önerilmiştir. Ancak yapılan deneySEL çalışma sonucunda beton üretiminde farklı malzeme ve karışım oranları için ısı iletim katsayılarının 1.96 W/mK ile 2.07 W/mK arasında değiştiği ve 1.65 W/mK’den daha büyük değerler aldığı görülmüştür. Bu durumun TS 825’te dikkate alınması gerekir.

4.5 Buhar Difüzyonu Direnç Faktörü Değerlerinin Değerlendirilmesi ve İrdelenmesi

Buhar difüzyon direnç faktörünün sıcaklıkla değişimi I., II. ve III. Gruplar için aşağıda değerlendirilmiş ve irdelenmiş, deney sonuçları Ek Çizelge 22-24’te verilmiştir.

DeneySEL çalışma sonucunda mineral katkıların, katkısız betona göre su buharı difüzyonu direnç faktörünü arttırdığı görülmüştür. Günümüzde beton üretiminde kullanımı giderek yaygınlaşan mineral katkıların kalsiyum hidroksit ile reaksiyona girerek CSH jelleri oluşturması gerek çimento hamurunda gerekse çimento hamuru-agrega ara yüzünde poroziteyi önemli ölçüde azaltır (Mehta ve Monteiro, 2006). Konu ile ilgili daha önceki çalışmalarda azalan porozite ve artan yoğunlukla betonun buhar difüzyonu direnç faktörünün arttığı tespit edilmiştir (Kabay, 2009; Kearsley ve Wainwright, 2001).

Bu çalışmadaki deneylerden elde edilen verilere göre betonun buhar difüzyon direnç faktörünün kullanılan mineral katkıya ve özellikle agrega türüne göre önemli ölçüde değiştiği tespit edilmiştir. Silis ve kalker esaslı agregaların birlikte kullanıldığı I. Grup betonlarda buhar difüzyon direnç faktörü, mineral katkılı serilerde 44 ile 51 arasında değişirken bu değer katkısız seride 31'dir. Sadece silis esaslı agreganın kullanıldığı II. Grup serilerde katkısız betonun buhar difüzyon direnç faktörü 35 iken katkılılarda 38 ile 46 arasında, sadece kalker esaslı agreganın kullanıldığı III. Grup serilerde ise buhar difüzyon direnç faktörü, katkısız betonda 67 iken katkılılarda 84 ile 103 arasında değişmektedir.

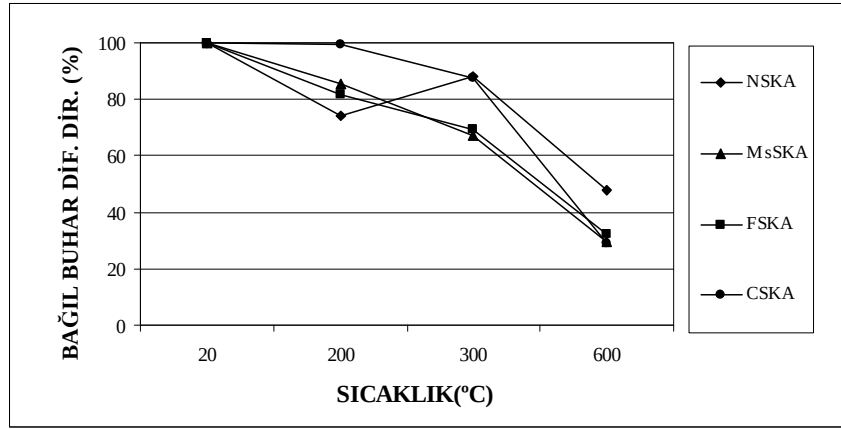
Farklı agrega türleri ile üretilen üç grup beton karşılaştırıldığında, kalker esaslı agreganın tek başına kullanıldığı III. Grup beton serilerinde buhar difüzyon direnç faktörü diğer iki gruba göre yaklaşık iki kat artmıştır. Silis esaslı agreganın tek başına veya kalker esaslı agrega ile birlikte kullanıldığı II. ve I. Grup beton serilerinde ise buhar difüzyon direnç faktörü birbirine yakın değerler almıştır. Kalker esaslı agrega, çimento hamurundaki kalsiyumalüminatlar ile reaksiyona girerek kalsiyumkarboalüminatları oluşturur ve agrega-çimento hamuru ara yüzeyinde daha yoğun bir yapı meydana gelir (Ollivier vd., 1995). Bu durum buhar difüzyon direnç faktörünün diğer agrega ile üretilen betonlara göre daha büyük değerlere sahip olmasını açıklayabilir.

Deney sonuçları kullanılan mineral katkı türüne göre irdelendiğinde, tüm gruplarda diğer katkılara göre daha ince yapısı ve yüksek puzolanik aktivitesinden dolayı silis dumanı katkılı betonların en yüksek buhar difüzyon direnç faktörü değerlerini aldığı görülmektedir. Silis dumanı özellikle kalker esaslı agrega ile birlikte kullanıldığında bu fark daha belirgindir. Mineral katkının kullanılmadığı tüm serilerde buhar difüzyon direnç faktörü en düşük değerleri almıştır. Cam ve Neithalath (2010) tarafından yapılan deneysel çalışmada farklı oranlarda silis dumanı ve kalker tozu katkılı ve katkısız beton numuneler üretilmiş, silis dumanının boşluk boyutlarını ve boşluklar arasındaki bağlantıyı azalttığı için buhar geçiş parametrelerinden emilimi (sorptivity) düşürdüğü belirtilmiştir.

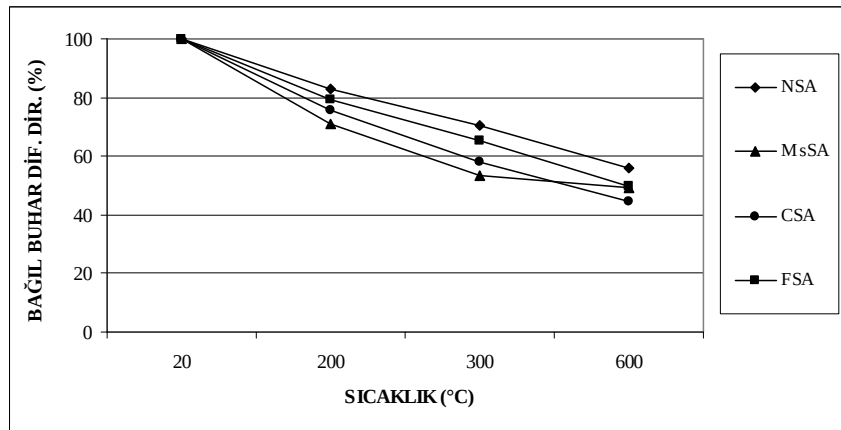
Binalarda ısı yalıtım kurallarının verildiği ve yoğuşma tahkikinin gösterildiği TS 825 standardında mineral katkıların ve agreganın bu etkisi dikkate alınmamış, donatısız beton için buhar difüzyon direnç faktörü 70/120; donatılı beton için 80/130 olarak verilmiştir. Bu çalışmadaki deneylerden elde edilen verilere göre üretimde kullanılan agrega ve mineral katkı türüne göre buhar difüzyon direnç faktörünün 31-103 gibi farklı bir aralıkta değiştiği tespit edilmiştir. Deney sonuçları betonda buhar difüzyon direnç faktörünün TS 825'te verilen alt

sınırın daha da altında olabileceğini göstermiştir. Bu durumun TS 825'te dikkate alınması gerekir.

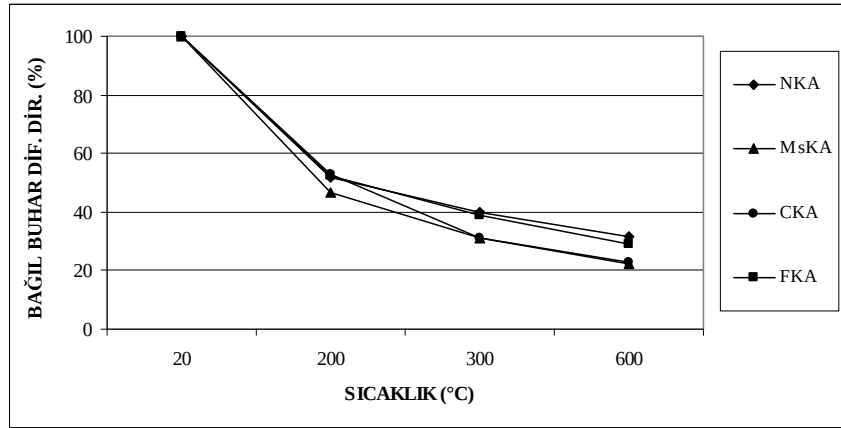
Yüksek sıcaklık etkisine maruz betonların buhar difüzyonu direnç faktörleri artan sıcaklıkla birlikte azalmıştır (Şekil 4.23-4.25). Azalmadaki en önemli etken yüksek sıcaklık etkisinden dolayı porozitenin artmasıdır. Mineral katkı ve üretimde kalker esaslı agreganın kullanıldığı beton serilerinde bu azalma daha fazladır. Sıcaklık 200°C'ye ulaştığında silis esaslı agregaya ile üretilen betonlarda buhar difüzyon direnç faktöründeki azalma ortalama %23 iken, kalker esaslı agregaya ile üretilen betonlarda %59'dur. Artan sıcaklıkla birlikte buhar difüzyon direnç faktöründeki azalma devam etmiş, bu azalmanın en fazla yaklaşık %80 oranında MsK ve CK serilerinde olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 4.23 I. Grup beton numunelerin buhar difüzyon direnç faktörü-sıcaklık ilişkisi



Şekil 4.24 II. Grup beton numunelerin buhar difüzyon direnç faktörü-sıcaklık ilişkisi



Şekil 4.25 III. Grup beton numunelerin buhar difüzyon direnç faktörü-sıcaklık ilişkisi

4.6 Sıcaklığın ve Rengin Derinliğe Bağlı Değişiminin Değerlendirilmesi ve İrdelenmesi

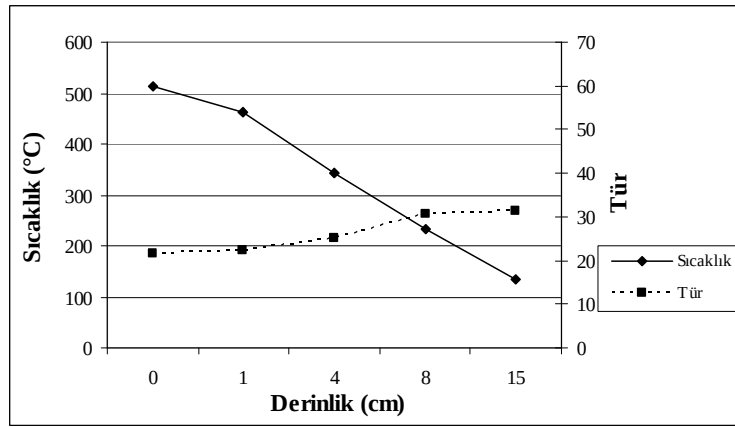
Yüzer vd. (2007a) tarafından yapılan çalışmada farklı agrega ve puzolan türleri kullanılarak üretilen betonlar yüksek sıcaklık etkisine maruz bırakılmış, etki sonrası betonun mekanik ve fiziksel özelliklerindeki değişim araştırılmıştır. Aynı çalışmada Yapay Sinir Ağları Yöntemi kullanılarak basınç dayanımı-renk değişimi arasında ilişki kurulmuş ve yüksek sıcaklık etkisine maruz kalan betonarme yapılarda, betonun yüksek sıcaklık etkisi sonrası özelliklerinin tespitinde renk ölçümünün bir tahribatsız muayene yöntemi olarak kullanılabileceği sonucuna varılmıştır.

Yukarıda açıklanan çalışmaya ilaveten bu çalışmada sıcaklığın derinliğe bağlı değişimi ile renk değişimi arasında ilişki kurulması amacı ile tek bir yüzeyden yüksek sıcaklık etkisine maruz bırakılan beton numunelerde sıcaklığın derinliğe bağlı değişimi ölçülmüştür. Sıcaklık ölçümü yapılan bazı noktalardan (10, 40, 80 ve 150 mm) beton numune kesilerek kesilen yüzeylerde tayfsal ışık ölçer ile Munsell Renk Dizgesi kullanılarak renk ölçümü yapılmıştır. Deney sonuçları rengin tür, değer ve doymuşluk bileşenine göre aşağıda ayrı ayrı irdelenmiştir.

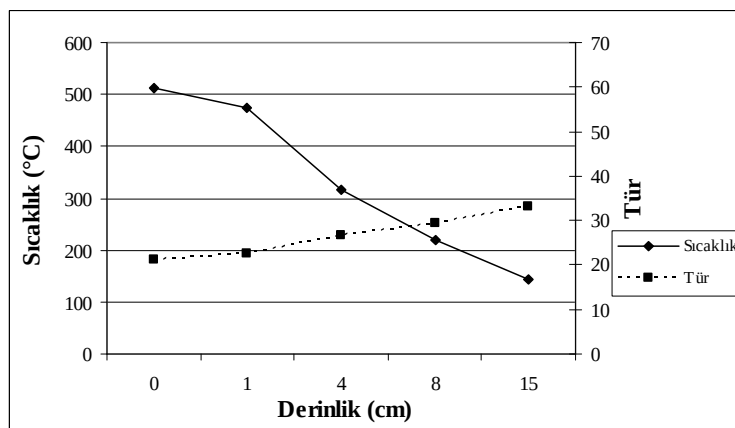
4.6.1 Sıcaklığın ve Rengin Tür Bileşeninin Derinliğe Bağlı Değişimi

Madde 3.4.6’da açıklanan ısıtma sürecinden sonra elde edilen deney sonuçlarına (Şekil 4.26-4.37) göre yüzeyde ulaşılan sıcaklığın 481°C ile 522°C arasında değiştiği, artan derinlikle beraber sıcaklığın azaldığı görülmüştür. Yüzey sıcaklıkları bu değerlere ulaştığında Binaların Yangından Korunması Hakkında Yönetmelikte (2002) kolonlar için minimum paspayı olarak verilen 4 cm’de sıcaklığın 306°C ile 370°C’ler arasında değiştiği tespit edilmiştir.

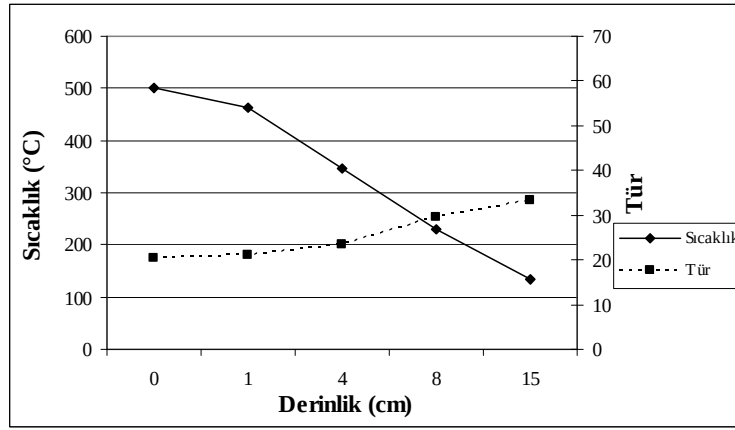
Rengin tür bileşeninin ise yüksek sıcaklık etkisine maruz kalan kalıp yüzeyindeki çimento hamurunda yapılan ölçümlerde 19.5 ile 21.6 arasında değiştiği, diğer bir deyişle kırmızımsı-sarı veya kırmızıya yakın sarı olduğu gözlenmiştir. Sıcaklık etkisi sonrası kesilen numune yüzeylerinde harç fazında yapılan renk ölçümlerinde, ince agregada olarak silis esaslı dere kumu ile kalker esaslı kırma kumun birlikte kullanıldığı I. Grup betonlarda 1 cm derinlikte rengin türünün kırmızımsı sarıya yakın olduğu (~22), ince agregada olarak sadece kırma kumun kullanıldığı II. ve III. Gruplarda ise yeşilimsi-sarıya yakın (~28) olduğu tespit edilmiştir. Buradan üretimde kullanılan ince agreganın doğal kum veya kırma kum olmasının betonun yüzey rengine etki ettiği anlaşılmaktadır. Artan derinlik ve azalan sıcaklıkla birlikte rengin tür bileşeni kırmızımsı sarıdan öncelikle yeşilimsi-sarı, ardından mavi doğrultusunda değişmiştir.



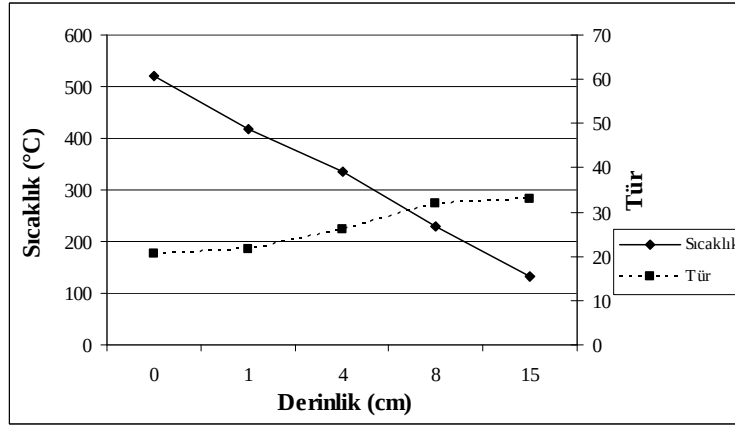
Şekil 4.26 I. Grup katkısız seride sıcaklığın ve rengin (tür) derinliğe bağlı değişimi



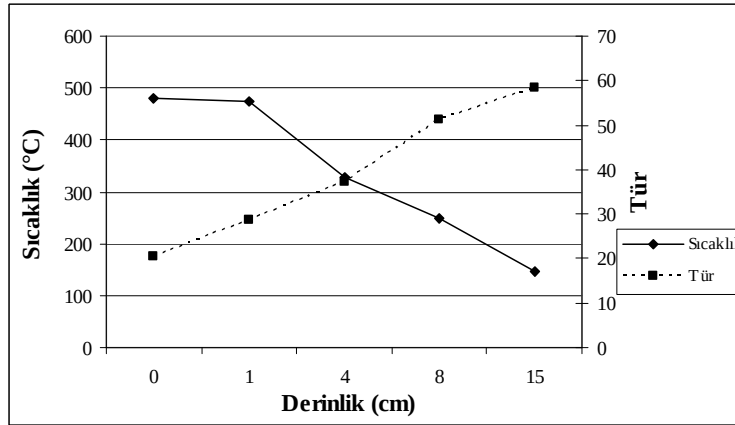
Şekil 4.27 I. Grup silis dumanı katkılı seride sıcaklığın ve rengin (tür) derinliğe bağlı değişimi



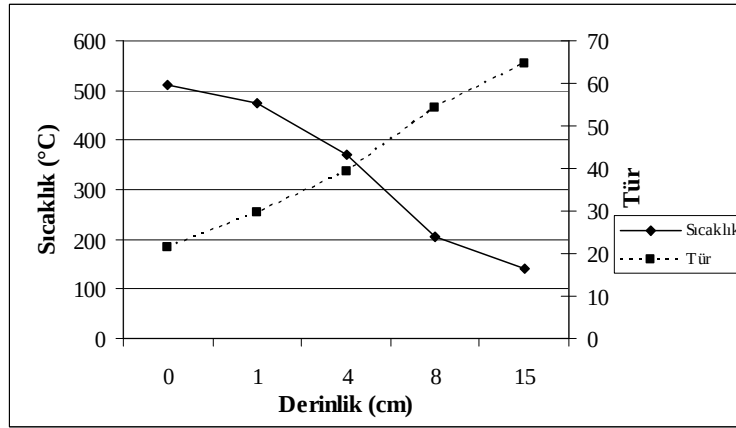
Şekil 4.28 I. Grup cüruf katkılı seride sıcaklığın ve rengin (tür) derinliğe bağlı değişimi



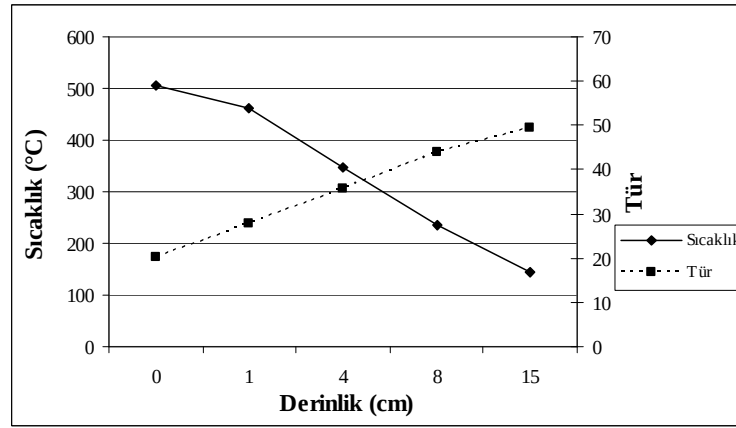
Şekil 4.29 I. Grup uçucu kül katkılı seride sıcaklığın ve rengin (tür) derinliğe bağlı değişimi



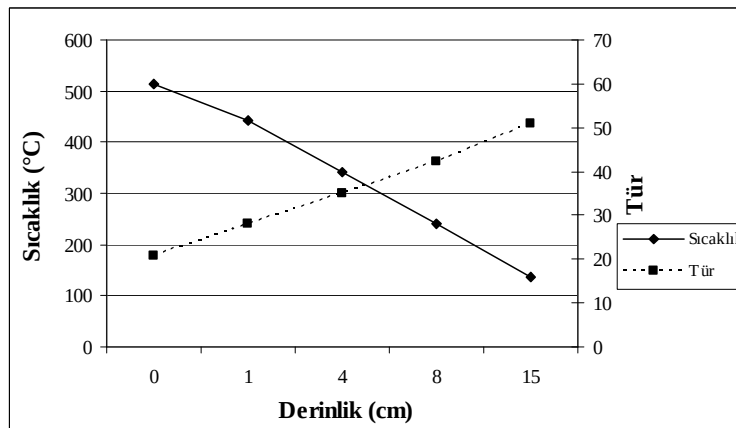
Şekil 4.30 II. Grup katkısız seride sıcaklığın ve rengin (tür) derinliğe bağlı değişimi



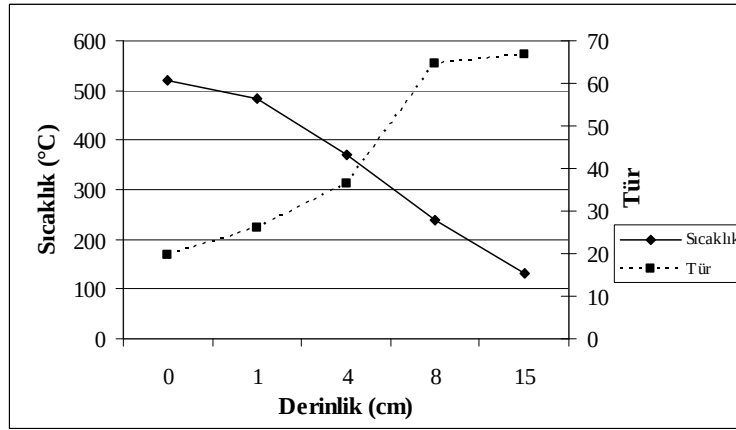
Şekil 4.31 II. Grup silis dumanı katkılı seride sıcaklığın ve rengin (tür) derinliğe bağlı değişimi



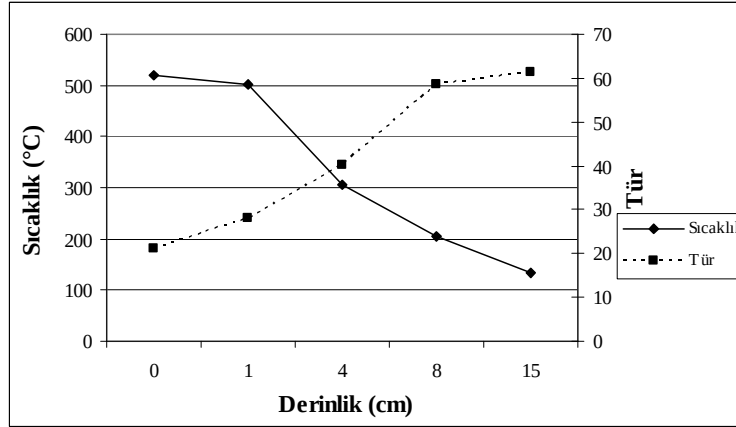
Şekil 4.32 II. Grup cüruf katkılı seride sıcaklığın ve rengin (tür) derinliğe bağlı değişimi



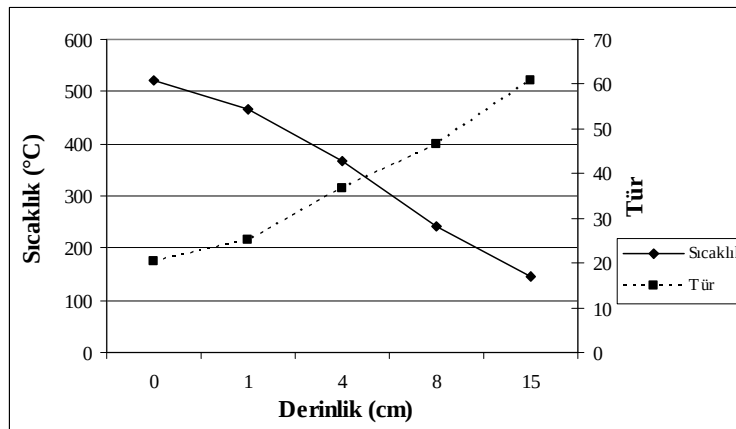
Şekil 4.33 II. Grup uçucu kül katkılı seride sıcaklığın ve rengin (tür) derinliğe bağlı değişimi



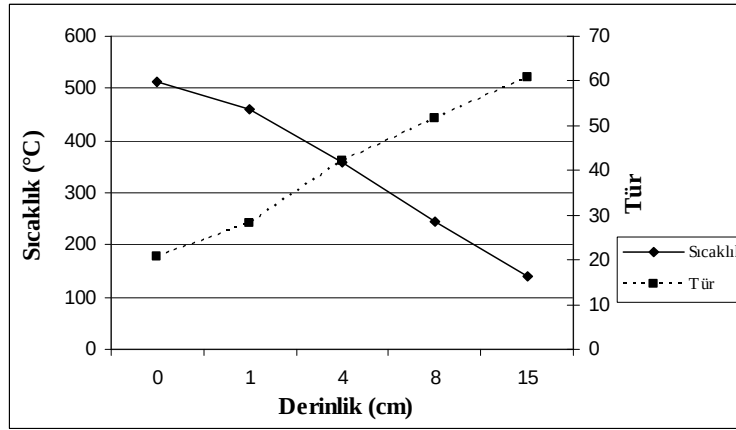
Şekil 4.34 III. Grup katkısız seride sıcaklığın ve rengin (tür) derinliğe bağlı değişimi



Şekil 4.35 III. Grup silis dumanı katkılı seride sıcaklığın ve rengin (tür) derinliğe bağlı değişimi



Şekil 4.36 III. Grup cüruf katkılı seride sıcaklığın ve rengin (tür) derinliğe bağlı değişimi



Şekil 4.37 III. Grup uçucu kül katkılı seride sıcaklığın ve rengin (tür) derinliğe bağlı değişimi

Şekil 4.26-4.37’de verilen grafiklerden, betonun maruz kaldığı sıcaklığa göre renginin de değiştiği, sıcaklık ile renk değişimi arasında ilişki olduğu açıkça görülmektedir. Yangın durumunda olduğu gibi yüksek sıcaklık etkisine maruz kalan betonarme yapıdan karot numune alınarak, harç fazında yapılacak renk ölçümü ile sıcaklığın derinliğe bağlı değişimi, dolayısı ile donatının maruz kaldığı sıcaklık tahmin edilebilir.

4.6.2 Rengin Değer ve Doymuşluk Bileşenlerinin Derinliğe Bağlı Değişimi

Tek bir yüzeyden yüksek sıcaklık etkisine maruz kalan betonun tür bileşeni derinliğe bağlı olarak azalan sıcaklıkla birlikte önemli ölçüde değişirken, değer ve doymuşluk bileşenlerinin aynı oranda değişmediği tespit edilmiştir. Değer bileşenine göre tüm numunelerin yüzeyden itibaren her sıcaklıkta orta koyulukta olduğu, doymuşluk bileşenine göre ise gri kabul edilebilecek ölçüde çok az doymuş olduğu saptanmıştır (Ek Şekil 1-24).

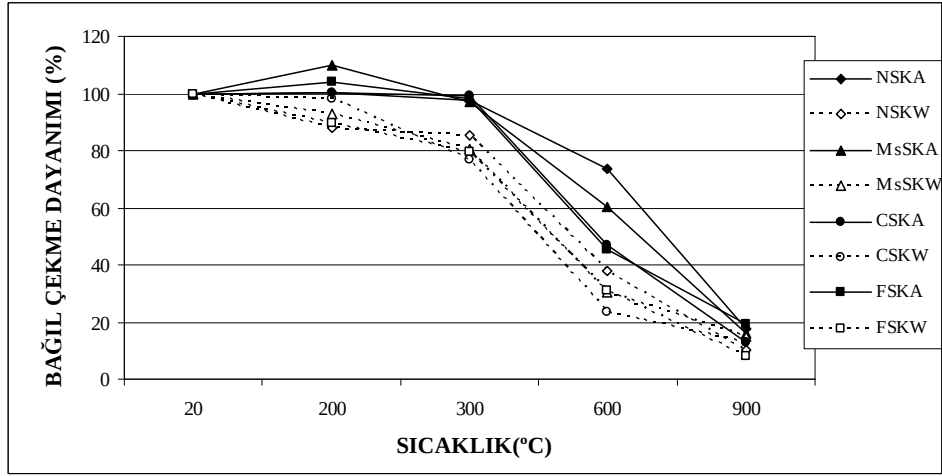
4.7 Yarmada Çekme Dayanımının Değerlendirilmesi ve İrdelenmesi

Bu bölümde yüksek sıcaklığın betonun yarmada çekme dayanımı değerlerine etkisi değerlendirilmiş, deney sonuçları Ek Çizelge 28-30’da verilmiştir.

4.7.1 Silis ve Kalker Esaslı Agrega ile Üretilen Betonlar

Yüksek sıcaklığın I. Grup beton serileri çekme dayanımına etkisi Şekil 4.62’de verilmiştir. Kontrol gruplarının çekme dayanımları 2.5 N/mm^2 ile 2.9 N/mm^2 arasında değişmekte olup, bu değerler sırası ile katkısız ve cüruf katkılı beton serilerine aittir (Ek Çizelge 28). Sıcaklık etkisi altında dayanımların, havada soğutulan numunelerde 300°C ’den, suda soğutulanlarda ise 200°C ’den itibaren azaldığı görülmüştür (Şekil 4.38). Suda soğutulan numunelerdeki

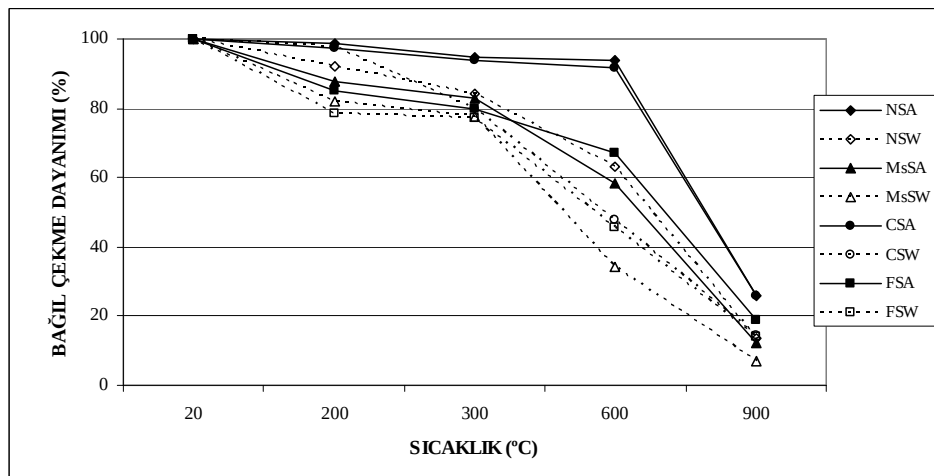
dayanım kaybı her sıcaklıkta havada soğutulan numunelerden daha fazla olmuştur. Sıcaklık 900°C'ye ulaştığında dayanımdaki kayıp %80'nin üzerindedir.



Şekil 4.38 I. Grup beton numunelerin çekme dayanımı-sıcaklık ilişkisi

4.7.2 Silis Esaslı Agrega ile Üretilen Betonlar

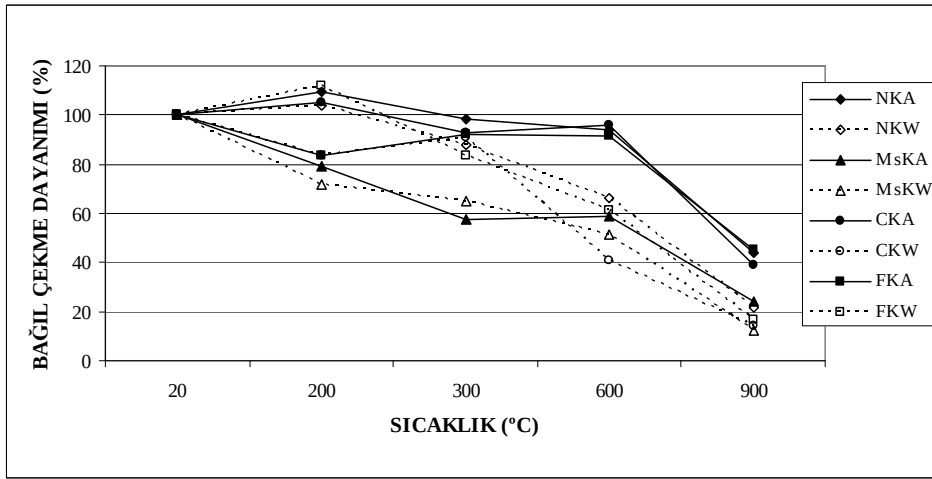
Yüksek sıcaklık etkisine maruz kalan silis esaslı agregalı betonların yarmada çekme deneyi sonuçları Ek Çizelge 29'da verilmiştir. Kontrol gruplarının çekme dayanımlarına bakıldığında en yüksek değer 5.2 N/mm² olmak üzere silis dumanı katkılı gruptadır. Sıcaklık arttıkça çekme dayanımındaki değişim her seride farklılık gösterirken suda soğutulanların çekme dayanımları genel olarak sıcaklık artışıyla azalmıştır (Şekil 4.39). Puzolan katkısız serisi özellikle 600°C'de silis dumanı ve uçucu kül katkılı serilere göre daha iyi performans göstermiştir. Cüruf katkılı havada soğutulan seri tüm sıcaklıklarda en iyi performansı gösterirken, 900°C'de en fazla azalma suda soğutulan silis dumanı katkılı seride görülmüştür.



Şekil 4.39 II. Grup beton numunelerin çekme dayanımı-sıcaklık ilişkisi

4.7.3 Kalker Esaslı Agrega ile Üretilen Beton için Yarmada Çekme Dayanımının Değerlendirilmesi ve İrdelenmesi

Yüksek sıcaklık etkisine maruz kalan kalker esaslı agrega ile üretilen III. Grup betonların yarmada çekme deneyi sonuçları Ek Çizelge 30’da verilmiştir. Kontrol numunelerinin çekme dayanımlarına bakıldığında en yüksek değer 3.9 N/mm^2 olmak üzere silis dumanı katkılı seridedir. 300°C ’den itibaren tüm serilerin çekme dayanımında azalma görülmüştür. Tüm sıcaklıklarda silis dumanı katkılıların çekme dayanımındaki azalma en fazladır. 600 ve 900°C ’lerde suda soğutulan numunelerin çekme dayanımındaki azalma tüm serilerde havada soğutulanlara göre daha fazladır (Şekil 4.40).



Şekil 4.40 III. Grup beton numunelerinin çekme dayanımı-sıcaklık ilişkisi

Sıcaklık etki süresine göre deney sonuçları irdelendiğinde, 300°C ’ye kadar her üç grupta dayanımdaki azalma birbirine yakın oranlarda iken, sıcaklık 600°C ’ye ulaştığında 2 saat boyunca yüksek sıcaklık etkisine maruz kalan I. Grup betonların dayanım kaybının diğer iki gruba göre daha fazla olduğu görülmüştür. Behnood ve Ghandehari (2009) tarafından yapılan çalışmada, yüksek sıcaklık etkisinde kalan betonun yarmada çekme dayanımının 100°C ’den itibaren azalmaya başladığı sıcaklık 600°C ’ye ulaştığında yalnızca hidratların dehidratasyonu dolayısı ile değil özellikle agrega ile çimento hamuru arasındaki termal uyumsuzluktan dolayı yarmada çekme dayanımının %71 oranında azaldığı tespit edilmiştir.

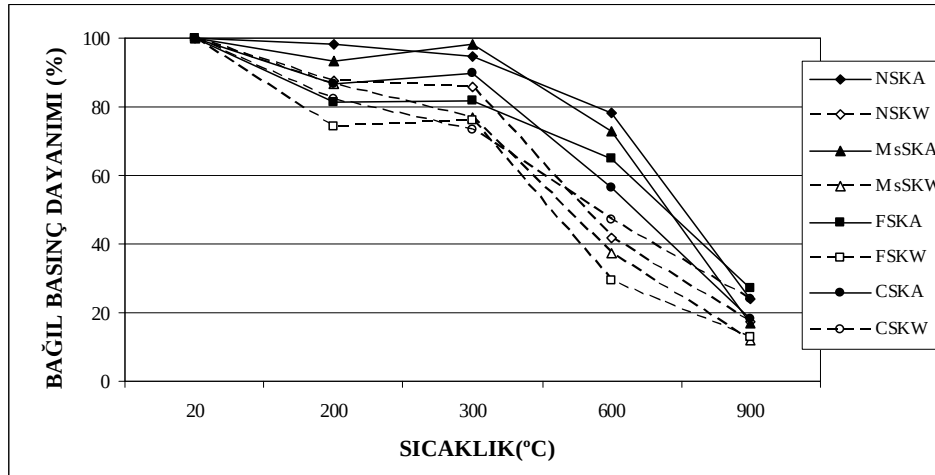
4.8 Basınç Dayanımının Değerlendirilmesi ve İrdelenmesi

Bu bölümde yüksek sıcaklığın betonun basınç dayanımı değerlerine etkisi değerlendirilmiş, deney sonuçları Ek Çizelge 31-33’te verilmiştir.

4.8.1 Silis ve Kalker Esaslı Agregalar ile Üretilen Betonlar

Üretimde silis ve kalker esaslı agregaların kullanıldığı I. Grup betonlara ait basınç deneyi sonuçları Ek Çizelge 31’de verilmiştir. Yüksek sıcaklık etkisine maruz kalmayan kontrol numunelerine ait basınç dayanımları 30.9 N/mm^2 ile 38.4 N/mm^2 arasında değişmektedir. Kontrol numuneleri arasında en yüksek basınç dayanımı %40 oranında cüruf katkılı seriye aittir. Pozolan katkısız seri ise 20°C ’de en düşük dayanıma sahiptir.

Sıcaklık etkisi altında I. Grup beton numunelerin basınç dayanımları artan sıcaklıkla beraber azalmıştır (Şekil 4.41). Bu azalma 600 ve 900°C ’lerde daha belirgindir. Suda soğutulan numunelerin basınç dayanımındaki azalma hemen her sıcaklık için havada soğutulanlara göre daha fazladır. Örneğin 600°C ’de havada soğutulan numunelerdeki dayanım kaybı ortalama %32 iken suda soğutulanlarda kayıp %61’dir.



Şekil 4.41 I. Grup beton numunelerin basınç dayanımı-sıcaklık ilişkisi

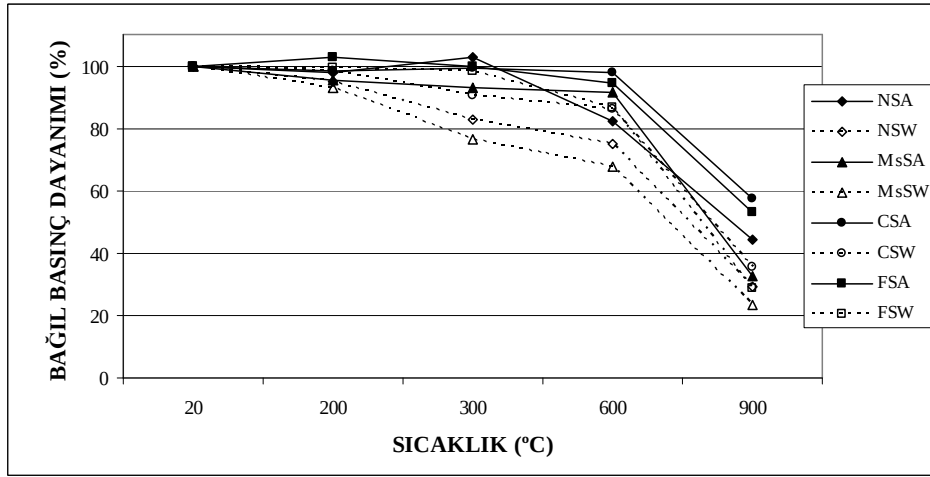
Pozolan katkılı gruplar ile katkısız grup karşılaştırıldığında, beton için kritik sıcaklık olarak bilinen 600°C ’de en yüksek dayanımlar 24.2 N/mm^2 ve 27.0 N/mm^2 olmak üzere sırası ile katkısız ve silis dumanı katkılı betonlara aittir. Sıcaklık 900°C ’ye ulaştığında tüm gruplarda basınç dayanımı 10 N/mm^2 ’nin altındadır (Ek Çizelge 31).

4.8.2 Silis Esaslı Agregalar ile Üretilen Betonlar

Silis esaslı agregalar ile üretilen II. Grup beton serilerine ait basınç deneyi sonuçları Ek Çizelge 32’de verilmiştir. Katkısız betonların kontrol grubunda basınç dayanımı 30.7 N/mm^2 ’dir. Silis dumanı katkılı numunelerin kontrol grubunda basınç dayanımı 37.1 N/mm^2

ile en yüksek dayanımı verirken, en düşük dayanım 28.2 N/mm^2 ile yüksek fırın cürufu katkılılarda görülmüştür.

Yüksek sıcaklık basınç dayanımını olumsuz yönde etkilemiş, 300°C 'ye kadar dayanımda önemli değişiklik olmazken, 600°C 'de havada soğutulan gruplarda dayanım ortalama %10 oranında, suda soğutulanlarda ise ortalama %53 oranında azalmıştır. Sıcaklık 900°C 'ye ulaştığında ise havada soğutulanlar kontrol numunelerine göre basınç dayanımlarının yaklaşık yarısını suda soğutulanlar ise ortalama %71'ini kaybetmiştir. Numunelerin ortalama dayanım kaybı %59'lara varmıştır (Şekil 4.42). 900°C 'de basınç dayanımında en fazla azalma silis dumanı katkılı suda soğutulan grupta görülmüştür.



Şekil 4.42 II. Grup beton numunelerin basınç dayanımı-sıcaklık ilişkisi

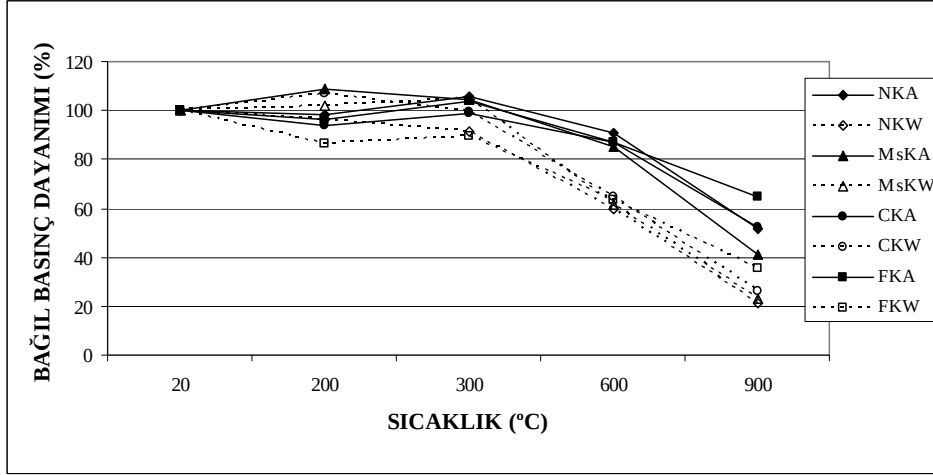
Puzolan katkılı seriler ile katkısız seri karşılaştırıldığında, soğutma şekline göre basınç dayanımları ile sıcaklık arasındaki ilişki farklılıklar gösterse de 600°C ve 900°C 'lerde yüksek fırın cürufu katkılı numuneler diğer serilere göre daha iyi performans göstermiştir.

4.8.3 Kalker Esaslı Agrega ile Üretilen Betonlar

Kalker esaslı agregası ile üretilen III. Grup basınç deneyi sonuçları Ek Çizelge 33'te verilmiştir. Silis dumanı katkılı numunelerin kontrol grubunda basınç dayanımı 38.7 N/mm^2 ile en yüksek dayanımı verirken, en düşük dayanım 32.4 N/mm^2 ile uçucu kül katkılılarda görülmüştür.

II. Grup beton serilerinde olduğu gibi basınç dayanımı özellikle 600°C ve 900°C 'lerde önemli ölçüde azalmıştır (Şekil 4.43). Suda soğutulan numunelerin dayanım kaybı havada soğutulanlara göre daha fazladır. Örneğin 900°C 'de dayanım kaybı havada soğutulan numunelerde %48 iken suda soğutulanlarda bu oran %74'tür.

En iyi performansı 600°C’de puzolan katkısız grup gösterirken, 900°C’de uçucu kül katkılı grup göstermiştir. Aynı sıcaklıkta havada soğutulan numunelerde dayanım kaybı %59 ile en fazla silis dumanı katkılı seride görülmüştür.



Şekil 4.43 III. Grup beton numunelerinde basınç dayanımı-sıcaklık ilişkisi

Her üç grubun deney sonuçlarına göre yüksek sıcaklık etkisi altında dayanım kaybına etki eden en önemli parametrenin sıcaklık etki süresi olduğu anlaşılmaktadır. Sıcaklık etkisi süresi 2 saat olan I. Grup numunelerdeki dayanım kaybı beton için kritik sıcaklık olarak bilinen 600°C’de havada soğutulanlarda %40’a kadar ulaşırken diğer iki grupta kayıp oranının yaklaşık %20 mertebelerindedir. Benzer şekilde 900°C’de de I. Gruptaki dayanım kaybı diğer iki gruba göre daha fazladır.

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 mekaniksel özelliklerini olumsuz yönde etkilemektedir (Akman, 2000; Andrade vd., 2003a). 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 başlangıçtaki dayanımından geriye %20-30’unun kaldığına işaret edilmiştir. Xiao ve König’in (2004) araştırmasında, soğutma şeklinin basınç dayanımının değişiminde etkin bir rolünün olduğu sonucuna varılmıştır.

5. BASINÇ DAYANIMI-RENK DEĞİŞİMİ İLİŞKİSİNİN ARAŞTIRILMASI

Yüksek sıcaklık etkisine maruz kalan betonun basınç dayanımının yanı sıra yüzey renginin değiştiği bilinmektedir (Neville, 1990). Bölüm 2.3'te açıklanan, bugüne kadar yapılan çalışmalarda bu iki parametre arasında ilişki olabileceği ve basınç dayanımının tahmininde tahribatsız bir deney yöntemi olan renk ölçümünden yararlanılabileceği sonucuna varılmıştır (Short vd., 2001; Yüzer vd., 2007a; 2007b).

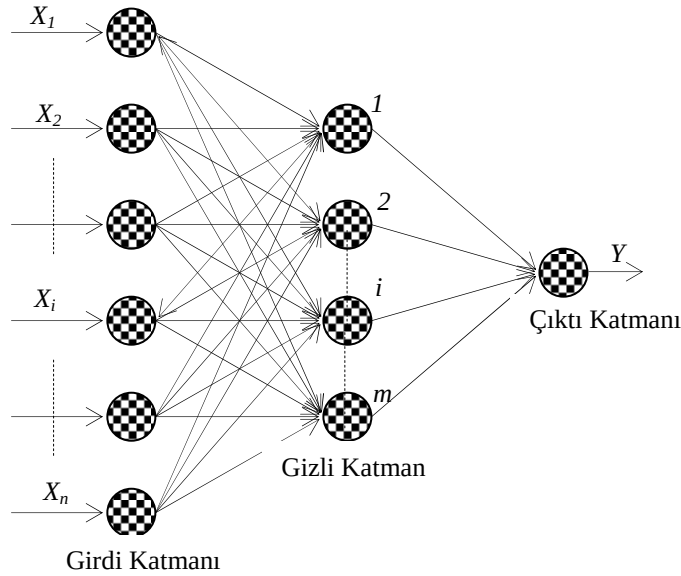
Short vd. (2001) tarafından yapılan çalışmada betonun renk değişimi ile basınç dayanımı arasında herhangi bir ilişki kurulmamış, renk ölçümünün agregadan bağımsız olması ve harç fazında yapılması gerektiği belirtilmiştir. Yüzer vd. (2004a) tarafından yapılan diğer çalışmada, yüksek sıcaklık etkisi sonrası betonun yüzey rengi ile kalan basınç dayanımı arasında bir ilişki kurulabileceği gösterilmiştir. Bir başka çalışmada, bir diğer tahribatsız deney yöntemi olan ultrases geçiş hızı ile basınç dayanımının regresyon analizinde, 400°C ve daha yüksek sıcaklığa maruz betonlarda belli bir doğrusal ilişki olduğu gösterilmiştir (Chiang ve Yang, 2005).

Yüksek sıcaklık etkisine maruz kalan betonun son durumunun belirlenmesinde bir çok yöntemden yararlanılmaktadır; ultrases geçiş hızı ve yüzey sertliği gibi tahribatsız yöntemlerin birlikte kullanıldığı SONREB bu metodlardan biridir (Akman and Güner, 1984). Ancak yüksek sıcaklık etkisi altında beton yüzeyinin normalden daha fazla karbonatlaşması ve bu durumun yüzey sertliğini artırması, yüzey sertliği ölçümü yerine renk ölçümü sonuçlarından yararlanılmasının betonun mevcut durumunun tespitinde daha anlamlı sonuçlar vereceğini düşündürmektedir.

Bu çalışma kapsamında yapılan deneysel çalışma sonuçları irdelendiğinde, betonun basınç dayanımında sıcaklığa bağlı olarak meydana gelen değişim ile renkte meydana gelen değişim arasında önemli benzerlikler tespit edilmiştir. Yüksek sıcaklık etkisine maruz kalan yapılarda beton kalitesinin belirlenmesinde, renk ölçümünün tahribatsız deney yöntemi olarak kullanılabilirliğini araştırmak amacıyla, özellikleri Bölüm 3'te açıklanan farklı agrega ve puzolan türleri ile üretilmiş üç grup, oniki seri beton numuneye yüksek sıcaklığın etkisi mekaniksel ve fiziksel deneyler ile incelenmiştir. Yapılan deneylerden elde edilen veriler kullanılarak yüksek sıcaklık etkisinde kalan betonun basınç dayanımı ile rengin tür, değer, doymuşluk bileşenleri ve ultrases geçiş hızı arasında genel özellikleri aşağıda açıklanan Yapay Sinir Ağları Yöntemi ile ilişki kurulmuştur.

5.1 Yapay Sinir Ağı Tasarımı

Yapay sinir ağları (YSA) basit matematiksel yapılar olarak değerlendirilir ve birçok parametre arasında güvenli bir ilişki kurulmasında oldukça uygun araçlardır. YSA'ları oldukça yüksek dereceden doğrusal olmayan problemleri kolaylıkla çözebilirler. Bir YSA modeli üç ana bileşenle tanımlanabilir: transfer fonksiyonu, ağ yapısı ve öğrenme kuralı. YSA'ların bazı temel avantajları şöyle sıralanabilir: (1) YSA modelleri, girdi verilerinin hatalı veya eksik olması durumlarında bile anlamlı sonuçları örneklerden ve tecrübelerden öğrenir ve genelleştirme yapar; (2) YSA modelleri zamanla yeni çözümlere uyarlanabilir ve değişen koşullardan dolayı oluşan değişiklikleri telafi edebilir; (3) YSA modelleri geçmiş tecrübelerden iyi ve güvenli teorik, deneysel veya ampirik verileri veya bunların kombinasyonlarını değerlendirebilir (Rafiq vd., 2001). Tipik bir n girdi nodlu, m gizli nodlu, bir çıktı nodlu, üç katmanlı ve ileri beslemeli YSA modeli Şekil 5.1'de görülmektedir. YSA modeline sunulan veriler girdi nodlarıyla, modelin çıktıları ise çıktı nodlarıyla gösterilir. Gizli nod ise YSA modelinin çıktısını girdi örneklerinin faydalı özellikleri yardımıyla hatırlamaya ve elde etmeye yarayan bir arayüz görevi görür (Rafiq vd., 2001; Günaydın ve Doğan, 2004).



Şekil 5.1 Tipik bir YSA modeli

Tipik bir YSA modeli bir grup işleme elemanından (İE) oluşur ve bu elemanlar sinirler olarak adlandırılır. Bir İE, üç temel bileşenli bir bilgi işleme birimi olarak tanımlanır: (1) bir sinaptik seti; (2) bir toplayıcı; (3) bir aktivasyon fonksiyonu. İE, ağırlıklandırılmış girdilerin toplamını

hesaplamak, toplamdan bu girdilerin eşik değerini çıkarmak ve elde edilen sonuçları aşağıdaki gibi bir fonksiyonla transfer etmek olarak tanımlanabilir (Haykyn, 1994).

$$u_i = \varphi\left(\sum_{j=1}^n w_{ij}x_j - \theta_i\right) \quad (5.1)$$

Denklem (5.1)'de u_i , bir İE'nin çıktısını; w_{ij} , i . İE ile ilgili sinaptik ağırlıkları; x_j girdi sinyalini; θ_i , İE'nin eşik değerini; ve $\varphi(.)$, dönüşüm (aktivasyon) fonksiyonunu temsil etmektedir. Bütün İE'ler bir sonraki katmandaki diğer İE'lere bağlanmıştır ve paralel olarak işlerler. Aktivasyon fonksiyonu, bir İE'nin girdisindeki aktivite seviyesi cinsinden çıktısını tanımlar ve doğrusal veya doğrusal olmayan bir formda olabilir. Doğrusal bir aktivasyon fonksiyonun çıktısı basit haliyle girdisine eşit olacaktır (Neuro Solutions, 2003).

Bu çalışmada, yüksek sıcaklığa maruz farklı agrega ve farklı puzolan kullanılarak üretilmiş üç grup betonda basınç dayanımını tahmin etmek için üç farklı YSA modeli kurulmuştur. YSA modelleri üç adımda oluşturulmuştur: modelleme, eğitim ve sınama. Deneysel çalışma, renkteki ve ultrases hızındaki değişikliklerin tanımlanması ve iç kurallar modelleme aşamasında değerlendirilmiştir. Verilerin hazırlanması ve eğitim için öğrenme kurallarının uyarlanması, eğitim aşamasında gerçekleştirilmiştir. Son olarak kurulan modelin tahmin edebilme doğruluğu ise sınama aşamasında değerlendirilmiştir.

5.2 YSA'nın Modellenmesi

Girdi katmanında, betonun basınç dayanımını (çıkıktı verisi, Y_1) değerlendirmek amacıyla dört girdi parametresi seçilmiştir (Çizelge 5.1). 1. parametre tür, 2. parametre değer, 3. parametre doymuşluk, 4. parametre ise ultrases geçiş hızıdır. Bu girdi parametrelerinin değişim aralıkları Çizelge 5.1'de verilmiştir.

Çizelge 5.1 Girdi parametreleri ve değişim aralıkları

Girdi Parametresi	Tanımı	Değişim Aralığı		
		I. Grup	II. Grup	III. Grup
X_1	Tür (1-100)	19.6-32.0	18.7-40.0	21.7-48.4
X_2	Değer (0-10)	4.6-8.4	5.0-7.1	4.6-7.9
X_3	Doymuşluk (0-20)	0.23-1.08	0.12-2.23	0.10-0.68
X_4	Ultrases Hızı (mm/ μ sec)	0.18-4.64	0.10-5.30	0.14-4.64
Y	Basınç Dayanımı (N/mm ²)	4.3-38.4	9.3-40.1	7.4-42.1

Her üç grup betonda YSA modeli için toplam 40 olay kullanılmıştır. Çizelge 5.2-5.4, agrega türüne bağlı olarak üç grup betonda her olay için kullanılan girdi parametrelerini

göstermektedir. Girdi değişkenleri iki ayrı sete ayrılmıştır. Setlerin birisi YSA modelinin eğitiminde kullanılmış (Çizelge 5.2-5.4'teki ilk 32 olay), diğer set ise eğitilen ağın sınanması için ayrılmıştır. Sınama amacıyla, tüm verilerin %20'si her eğitim çevriminde sınama amacıyla rasgele seçilmiş, seçilen olaylar Çizelge 5.2-5.4'te kesik çizgiler ile ayrılmıştır. Sınama amacıyla seçilen verilerin en büyük ve en küçük değerler arasında olmasına çalışılmıştır. Eğitim ve sınama amacıyla ayrılan setler YSA modeli için öncelikle normalize edilmişlerdir. Çizelge 5.2-5.4'teki son kolon (Y_{NN}), eğitim ve sınama setleri için YSA modeli ile tahmin edilen basınç dayanımlarını göstermektedir.

Çizelge 5.2 I. Grup betonda YSA modelinin kurulmasında kullanılan olaylar

Olay No.	Numune	(X_1)	(X_2)	(X_3)	(X_4)	(Y_1)	(Y_{NN})
1	NSKA/20°C	30.6	6.7	0.32	4.39	30.9	33.1
2	NSKA/200°C	25.1	6.8	0.53	4.09	30.4	31.5
3	NSKA/600°C	19.9	6.9	0.85	2.30	24.2	22.3
4	NSKA/900°C	25.5	7.7	0.46	0.83	7.4	7.8
5	NSKW/20°C	30.6	6.7	0.32	4.39	30.9	33.1
6	NSKW/300°C	24.4	6.4	0.61	3.46	26.5	26.8
7	NSKW/600°C	20.2	6.4	1.08	1.77	12.9	12.9
8	MsSKA/20°C	32.0	6.4	0.23	4.50	37.0	37.1
9	MsSKA/200°C	29.0	6.5	0.28	4.35	34.6	33.0
10	MsSKA/300°C	24.3	6.4	0.54	3.98	36.4	33.2
11	MsSKA/900°C	26.9	7.7	0.62	0.91	6.3	5.5
12	MsSKW/200°C	27.4	6.1	0.37	4.33	32.2	33.7
13	MsSKW/300°C	25.7	6.5	0.52	3.58	28.4	28.3
14	MsSKW/600°C	21.9	4.6	0.53	1.22	13.8	14.1
15	CSKA/20°C	29.8	6.3	0.37	4.51	38.4	36.7
16	CSKA/200°C	30.4	6.6	0.34	4.25	33.4	32.1
17	CSKA/900°C	28.2	8.4	0.27	1.10	7.0	7.1
18	CSKW/20°C	29.8	6.3	0.37	4.51	38.4	36.7
19	CSKW/200°C	30.7	6.5	0.27	4.04	31.6	31.3
20	CSKW/300°C	23.3	6.6	0.63	3.65	28.2	28.7
21	CSKW/600°C	21.3	5.3	0.77	1.76	18.1	16.8
22	CSKW/900°C	24.1	5.4	0.67	0.18	9.3	6.9
23	FSKA/20°C	25.4	6.7	0.43	4.64	35.7	34.0
24	FSKA/200°C	25.1	6.6	0.43	4.54	29.0	33.2
25	FSKA/600°C	19.6	7.0	0.75	1.83	23.1	23.8
26	FSKA/900°C	25.0	7.5	0.39	0.78	9.7	9.4
27	FSKW/20°C	25.4	6.7	0.43	4.64	35.7	34.0
28	FSKW/300°C	24.4	6.3	0.67	3.70	27.1	27.6
29	FSKW/600°C	19.9	6.6	0.87	2.02	10.5	12.4
30	NSKA/300°C	22.4	6.6	0.74	3.75	29.3	28.6
31	NSKW/200°C	30.0	5.9	0.28	3.97	27.1	33.3
32	MsSKA/600°C	21.7	6.9	0.57	2.12	27.0	24.1
33	MsSKW/20°C	32.0	6.4	0.23	4.50	37.0	37.1
34	CSKA/300°C	21.8	6.6	0.68	3.92	34.5	28.6
35	FSKA/300°C	23.7	6.3	0.67	4.07	29.2	32.7
36	FSKW/200°C	24.7	6.7	0.47	4.10	26.4	29.5
37	NSKW/900°C	23.8	5.8	0.82	0.19	4.3	5.3
38	MsSKW/900°C	24.7	5.7	0.55	0.18	4.8	4.4
39	FSKW/900°C	21.9	5.7	0.59	1.67	5.3	4.6
40	CSKA/600°C	20.7	7.3	0.64	1.96	21.7	30.5

Çizelge 5.3 II. Grup betonda YSA modelinin kurulmasında kullanılan olaylar

Olay No.	Numune	(X_1)	(X_2)	(X_3)	(X_4)	(Y_1)	(Y_{NN})
1	NSA/20°C	32.4	6.4	0.20	5.10	34.9	32.4
2	NSA/300°C	39.7	6.5	0.20	4.10	35.9	35.0
3	NSA/600°C	22.7	5.9	0.82	2.00	28.6	25.3
4	NSA/900°C	19.2	7.1	2.11	0.00	15.4	7.7
5	NSW/20°C	32.4	6.4	0.20	5.10	34.9	32.4
6	NSW/200°C	31.2	6.4	0.33	4.00	33.2	30.7
7	NSW/300°C	33.3	5.9	0.30	4.00	28.9	26.9
8	NSW/900°C	19.2	5.0	2.12	0.00	10.3	3.7
9	MsSA/20°C	34.2	6.5	0.30	5.30	40.1	35.9
10	MsSA/200°C	40.0	6.6	0.12	4.20	38.2	35.7
11	MsSA/300°C	39.9	6.6	0.14	4.20	37.3	35.7
12	MsSA/600°C	22.4	6.3	0.72	2.60	36.6	33.8
13	MsSA/900°C	19.0	6.4	2.18	0.00	13.0	6.4
14	MsSW/200°C	36.0	6.5	0.19	4.20	37.2	32.3
15	MsSW/300°C	36.9	6.3	0.18	4.20	30.6	29.3
16	MsSW/900°C	18.7	6.9	1.80	0.00	9.3	5.1
17	CSA/20°C	34.6	6.4	0.20	5.00	31.8	30.3
18	CSA/200°C	30.2	6.7	0.24	4.20	31.2	29.6
19	CSA/300°C	36.4	5.9	0.22	4.10	31.5	27.0
20	CSA/600°C	20.1	6.3	0.94	2.70	31.0	28.5
21	CSW/20°C	34.6	6.4	0.20	5.00	31.8	30.3
22	CSW/300°C	34.0	5.8	0.23	4.10	28.7	25.1
23	CSW/600°C	21.3	5.8	0.88	2.80	27.4	24.1
24	CSW/900°C	19.4	6.3	2.23	0.00	11.3	6.7
25	FSA/20°C	34.2	6.3	0.20	5.10	33.1	30.7
26	FSA/200°C	30.4	6.3	0.22	4.20	34.1	30.1
27	FSA/600°C	20.4	6.0	1.12	2.60	31.3	28.0
28	FSA/900°C	19.8	5.6	1.98	0.00	17.6	11.3
29	FSW/20°C	34.2	6.3	0.20	5.10	33.1	30.7
30	FSW/200°C	30.3	6.0	0.21	4.20	32.9	30.4
31	FSW/600°C	20.4	5.5	1.23	2.70	28.8	25.2
32	FSW/900°C	19.3	5.1	1.92	0.00	9.4	4.2
33	NSA/200°C	33.4	6.9	0.27	4.10	34.1	36.7
34	NSW/600°C	23.4	5.6	0.87	2.50	25.6	21.3
35	MsSW/20°C	34.2	6.5	0.30	5.30	40.1	35.9
36	MsSW/600°C	22.5	6.1	0.73	2.70	27.2	31.3
37	CSA/900°C	19.9	6.8	1.84	0.00	18.2	5.1
38	CSW/200°C	29.1	6.4	0.27	4.10	31.2	30.1
39	FSA/300°C	29.9	6.2	0.29	4.10	33.0	31.7
40	FSW/300°C	29.9	5.8	0.21	4.10	32.6	28.2

Çizelge 5.4 III. Grup betonda YSA modelinin kurulmasında kullanılan olaylar

Olay No.	Numune	(X_1)	(X_2)	(X_3)	(X_4)	(Y_1)	(Y_{NN})
1	NKA/20°C	45.2	6.1	0.11	4.34	35.0	38.1
2	NKA/200°C	38.0	5.3	0.20	4.31	34.3	38.3
3	NKA/600°C	21.7	6.1	0.27	3.56	31.8	35.4
4	NKA/900°C	21.9	7.7	0.56	1.95	18.0	18.9
5	NKW/20°C	45.2	6.1	0.11	4.34	35.0	38.1
6	NKW/300°C	40.5	5.6	0.10	4.28	32.0	34.0
7	NKW/600°C	23.2	4.6	0.28	3.70	20.8	22.8
8	NKW/900°C	22.2	7.5	0.54	0.15	7.4	8.5
9	MsKA/200°C	42.9	6.3	0.14	4.58	42.1	43.5
10	MsKA/300°C	46.1	6.2	0.13	4.64	40.4	43.6
11	MsKA/600°C	22.5	6.3	0.23	3.09	33.1	34.2
12	MsKW/20°C	48.4	5.7	0.10	4.53	38.7	42.3
13	MsKW/200°C	40.8	5.1	0.11	4.53	39.6	40.8
14	MsKW/300°C	47.7	5.7	0.14	4.54	40.6	43.2
15	MsKW/600°C	26.8	6.3	0.23	3.25	23.8	26.7
16	MsKW/900°C	26.1	7.9	0.40	0.14	8.8	8.7
17	CKA/20°C	40.3	5.6	0.13	4.43	35.0	38.3
18	CKA/200°C	38.8	5.4	0.12	4.37	32.8	36.2
19	CKA/300°C	40.8	5.9	0.12	4.28	34.5	36.1
20	CKA/900°C	23.4	6.7	0.50	1.77	18.4	18.7
21	CKW/20°C	40.3	5.6	0.13	4.43	35.0	38.3
22	CKW/200°C	39.7	5.3	0.13	4.36	37.3	37.8
23	CKW/600°C	24.1	6.5	0.38	2.51	22.7	24.5
24	CKW/900°C	23.6	7.2	0.68	0.16	9.2	10.5
25	FKA/20°C	40.3	5.6	0.11	4.21	32.4	33.7
26	FKA/300°C	33.0	6.0	0.16	4.32	33.6	36.0
27	FKA/600°C	28.1	5.7	0.17	3.67	28.2	30.4
28	FKA/900°C	22.6	6.9	0.61	1.83	20.9	22.6
29	FKW/20°C	40.3	5.6	0.11	4.21	32.4	33.7
30	FKW/200°C	42.6	5.8	0.10	4.27	28.1	34.0
31	FKW/300°C	39.0	5.4	0.12	4.19	28.9	34.2
32	FKW/600°C	25.3	5.3	0.33	3.67	20.6	21.4
33	NKA/300°C	39.6	5.5	0.16	4.39	37.0	39.3
34	NKW/200°C	36.0	5.5	0.16	4.36	33.8	36.6
35	MsKA/900°C	25.3	7.6	0.38	0.98	14.0	9.7
36	MsKA/20°C	48.4	5.7	0.10	4.53	38.7	42.3
37	CKA/600°C	24.2	5.6	0.45	3.66	30.5	25.4
38	CKW/300°C	39.4	5.7	0.13	4.20	34.8	35.0
39	FKA/200°C	37.3	6.0	0.11	4.40	33.6	38.6
40	FKW/900°C	22.2	7.2	0.61	0.31	11.5	29.9

5.3 YSA'nın Eğitimi

Bu çalışmada, YSA modelinin eğitimi için standart geri yayılım algoritması kullanılmıştır. YSA modelleri, 4 girdi parametresine karşılık gelen 4 tane birbiriyle bağlı İE'lı ve hedef olarak seçilen bir çıktı katmanına karşılık gelen 1 İE'lı girdi katmanı ile oluşturulmuştur. Birkaç denemeden sonra bir gizli katman ve aktivasyon fonksiyonu olarak da (5.2) bağntısında verilen logaritmik sigmoid fonksiyonunun kullanılmasına karar verilmiştir.

Çizelge 5.1’de verilen parametrelere göre yapısı oluşturulan YSA 50000 epok ile eğitilmiş ve ağ yapısının en uygun ağırlık değerleri elde edilmiştir.

$$f = \frac{1}{1 + e^{-\beta x}} \quad (5.2)$$

5.4 YSA’nın Sınanması

Sınama aşaması, YSA modelinin performansını göstermektedir. Sınama, eğitim sırasında elde edilen en iyi ağırlıklarla gerçekleştirilir. Ağırlık çarpanları bu aşamada değişmez. YSA modelinin eğitilmiş ağırlık çarpanlarının geçerliliği eğitilen YSA modelinin tahminlerinin doğruluğunun sınanması için ayrılan verilerle yapılır. Bu çalışmada YSA modelinin performansı, aşağıdaki gibi basınç dayanımı hata yüzdesi (EPE_{CS}) (5.3) ile ölçülmüştür:

$$EPE_{CS} = \frac{x(i) - X(i)}{X(i)} \times 100\% \quad (5.3)$$

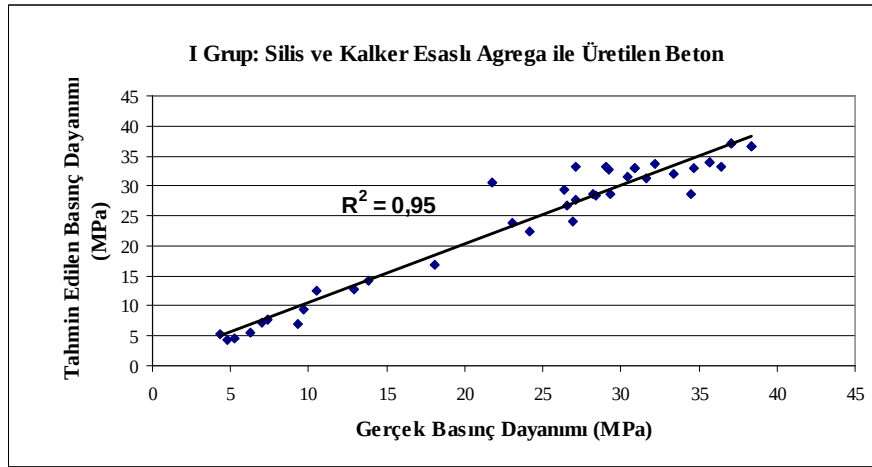
Silis ve kalker esaslı agregaların birlikte kullanıldığı I. Grup betonda ortalama EPE_{CS} , %8.2, sadece silis esaslı agrega ile üretilen II. Grup betonda ortalama EPE_{CS} , %8.7 ve silis ve kalker esaslı agreganın birlikte kullanıldığı III. Grup betonda ise ortalama EPE_{CS} , %9.2 olarak bulunmuştur. Ortalama hata yüzdesi hesaplanırken II. Grup betonlarda ultrases geçiş süresinin ölçülemediği 900°C için hesaplanan tahmini basınç dayanımları değerlendirmeye alınmamıştır.

Çizelge 5.2-5.4’teki son kolon (Y_{NN}), eğitim ve sınama setleri için YSA modeli ile tahmin edilen basınç dayanımlarını göstermektedir. Tahmin edilen veriler (Y_{NN}) ile deney sonuçları (Y_1) karşılaştırıldığında (Şekil 5.2-5.4), beton üretiminde kullanılan agrega türüne göre korelasyon katsayısı yüksek doğrusal ilişkiler elde edilmiştir. Bu ilişkilerin kullanılabilirliği, yangın etkisine maruz kalmış betonarme karkas bir yapıya ait deney sonuçlarından yararlanılarak araştırılmış; ilişkiler betonun basınç dayanımının tahmininde kontrol edilmiştir. Yüksek sıcaklık etkisine maruz kalan bu yapıya ait deney sonuçları, Yıldız Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Yapı Malzemeleri Anabilim Dalı öğretim elemanları tarafından hasar tespiti için hazırlanan 23.10.2007 tarih ve 2007/DS-94 sayılı Teknik Rapor’dan (2007) alınmıştır. Raporda yüksek sıcaklık etkisine maruz kalan betondan alınan karot numunelere ait basınç dayanımları, beton yüzeyinde yapılan renk ölçümü ve ultrases geçiş hızı gibi tahribatsız deney sonuçları yer almaktadır (Çizelge 5.5). Bu veriler, tez

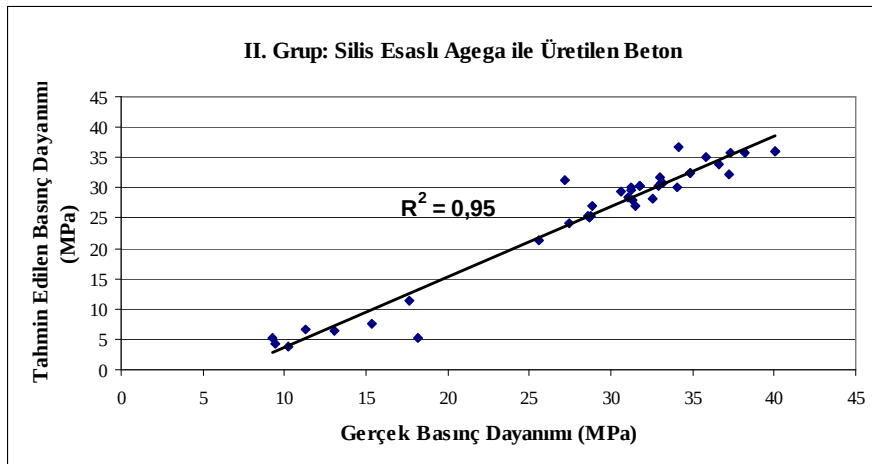
kapsamında Yapay Sinir Ağları Yöntemi ile geliştirilen ikinci modelde girdi parametresi olarak kullanıldığında, basınç dayanımları teorik olarak ortalama %90.7 doğrulukla tahmin edilmiştir.

Çizelge 5.5 Yangın hasarı görmüş bir yapıya ait deney sonuçları

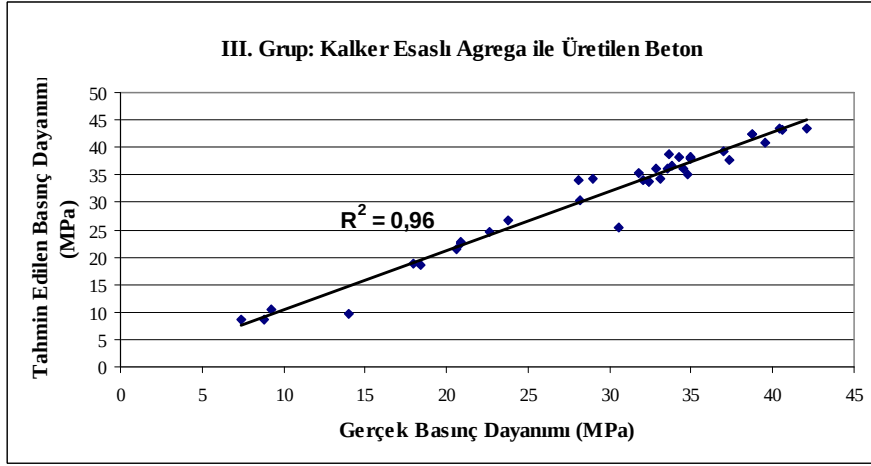
Kat	Renk			Ultrases geçiş hızı, (mm/μs)	Basınç dayanımı, (N/mm ²)	
	Tür	Değer	Doymuşluk		Gerçek	Teorik
Bodrum	25.5	6.8	0.7	1.653	27.2	30.7
Zemin	22.1	6.2	0.7	1.022	21.8	23.0
Ortalama hata yüzdesi					%9.3	



Şekil 5.2 I. Grup betonun tahmin edilen ile gerçek dayanımların karşılaştırılması



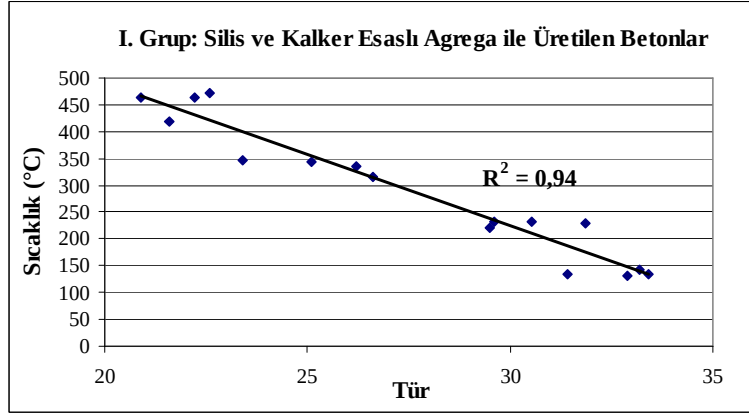
Şekil 5.3 II. Grup betonun tahmin edilen ile gerçek dayanımların karşılaştırılması



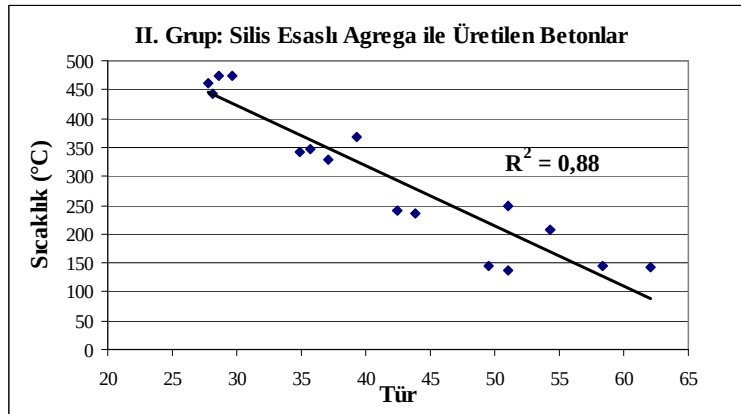
Şekil 5.4 III. Grup betonun tahmin edilen ile gerçek dayanımların karşılaştırılması

6. SICAKLIK-RENK DEĞİŞİMİ İLİŞKİSİNİN ARAŞTIRILMASI

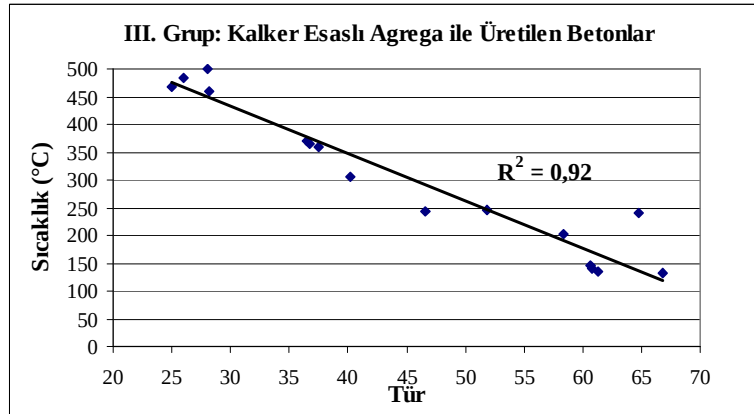
Bu çalışma kapsamında Bölüm 4’te açıklandığı üzere yüksek sıcaklığın, silis ve kalker esaslı agregaya ve farklı mineral katkıları kullanılarak üretilen betonların fiziksel, termofiziksel ve mekaniksel özelliklerine etkileri deneysel olarak araştırılmıştır. Yapılan deneylerden elde edilen sonuçlara göre tek bir yüzeyden yüksek sıcaklık etkisine maruz kalan betonda sıcaklık değişimi ile rengin tür bileşenindeki değişim arasında kullanılan agregaya türüne göre doğrusal ilişki kurulmuş (Şekil 6.1-6.3), korelasyon katsayıları yüksek (6.1), (6.2) ve (6.3) bağıntıları elde edilmiştir. Çalışmanın bu bölümünde deney sonuçları değerlendirilirken ince agreganın ön plana çıktığı harç fazında yapılan renk ölçümleri dikkate alınmış, tamamen çimento hamuru ile kaplı yüzeylere (yüksek sıcaklık etkisine maruz bırakılan yüzey ile 20 cm derinlikteki diğer yüzey) ait deney sonuçları değerlendirme dışı bırakılmıştır.



Şekil 6.1 I. Grup betonlara ait sıcaklık-renk ilişkisi



Şekil 6.2 II. Grup betonlara ait sıcaklık-renk ilişkisi



Şekil 6.3 III. Grup betonlara ait sıcaklık-renk ilişkisi

Silis ve kalker esaslı agrega ile üretilen betonlar için;

$$T_{SC} = -26.6 \times H + 1022.2 \quad (R=0.97) \quad (6.1)$$

Silis esaslı agrega ile üretilen betonlar için;

$$T_S = -10.4 \times H + 735.2 \quad (R=0.94) \quad (6.2)$$

Kalker esaslı agrega ile üretilen betonlar için;

$$T_C = -8.5 \times H + 686.0 \quad (R=0.96) \quad (6.3)$$

Bağıntılarda T_{SC} , T_S ve T_C , sırası ile silis ve kalker esaslı agregaların birlikte kullanıldığı, sadece silis esaslı kullanıldığı ve sadece kalker esaslı agreganın kullanıldığı betonların sıcaklığını ($^{\circ}\text{C}$), H ise rengin tür bileşenini temsil etmektedir.

Yukarıda verilen (6.1-6.3) bağıntıları kullanılarak yüzey sıcaklıkları teorik olarak hesaplanmış ve deneysel olarak elde edilen sıcaklıklar ile karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma sonucunda 300°C 'nin üzerinde sıcaklığa maruz kalan 4. cm'ye kadar sıcaklıklar ortalama %94.2 doğrulukla tahmin edilmiştir. Böylelikle 4 cm'ye kadar beton örtü kalınlığına sahip betonarme elemanda yüksek sıcaklık etkisi sonrası, betondan alınan karot numunede, betonun rengindeki değişiklikler derinliğe bağlı olarak incelenerek, donatının maruz kaldığı sıcaklığın %5.8 hata oranı ile tahmin edilebileceği görülmüştür.

7. SONUÇLAR

Yüksek sıcaklık etkisinde kalan betonun fiziksel, termofiziksel ve mekanik özelliklerindeki değişimin araştırıldığı bu çalışma kapsamında, silis ve kalker esaslı agregalar ve silis dumanı, uçucu kül, cüruf gibi farklı mineral katkıları kullanılarak üretilen beton numuneleri yüksek sıcaklık etkisine maruz bırakılmış, fiziksel, termofiziksel ve mekanik özelliklerindeki değişimlerin belirlenmesi için kontrol deneyleri yapılmıştır. Yüksek sıcaklık etkisinde kalan betonda yüzey rengi ölçülmüş, basınç dayanımındaki değişimin tahmini için Yapay Sinir Ağları Yönteminden yararlanılarak bir ilişki kurulmuştur. Ayrıca tek bir yüzeyden yüksek sıcaklık etkisine maruz kalan betonda sıcaklığın ve rengin derinliğe bağlı değişimi ölçülerek sıcaklık ile rengin tür bileşeni arasında doğrusal bir ilişki kurulmuştur. Deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlar aşağıda açıklanmıştır;

- Munsell renk dizgesinin kullanıldığı bu çalışmada, rengin tür bileşeni sıcaklık etkisi ile numunelerde yeşilimsi sarıdan kırmızıya doğru değişmiştir. Değer bileşeninde 600°C'ye kadar önemli bir değişiklik gözlenmezken, rengin doymuşluk bileşeni özellikle silis esaslı agregalı betonda 600°C ve üstü sıcaklıklarda artmıştır. Diğer bir deyişle sıcaklık etkisi ile betonun yüzey rengi yeşilimsi sarıdan kırmızıya doğru değişim gösterirken, açıklık ve koyuluğunda belirgin bir değişiklik olmamış, rengin içindeki gri miktarı azalmıştır.
- Çimento hamurunda boşlukları azaltan ve daha yoğun mikro boşluk oluşmasını sağlayan puzolanlar, kontrol numunelerinde ses geçiş sürelerini azaltmıştır. Aynı oranda puzolan katkılı (%10) II. ve III. Gruplarda en yüksek ses geçiş hızları silis dumanı katkılılarda gözlenmiştir. Yüksek sıcaklık etkisi ile betonlarda artan boşluklardan dolayı, ultrases geçiş hızları tüm gruplarda sıcaklık yükseldikçe azalmıştır.
- Yüksek sıcaklık etkisinde kalan betonların birim ağırlıklarında önemli bir değişiklik olmamış ancak artan sıcaklıkla birlikte birim ağırlıklar azalmıştır. Hacimce su emme oranları özellikle 600°C ve daha yüksek sıcaklıklarda ani artışlar göstermiştir.
- Betonun termofiziksel özelliklerden ısı iletim katsayısı özellikle kullanılan agrega türüne göre farklılıklar göstermiştir. II. ve III. Grup kontrol numunelerinde silis dumanı katkılılar hariç diğer tüm serilerde sadece silis esaslı agrega ile üretilen betonların ısı iletim katsayıları sadece kalker esaslı agrega ile üretilen betonlardan

daha yüksektir. Isı iletim katsayısı artan sıcaklıkla beraber azalmıştır.

- Üretimde puzolan katkı ve farklı türde agrega kullanılması, betonun su buharı difüzyon direnç faktörünün farklı değerler almasına neden olmuş, puzolan katkılı betonların buhar difüzyon direnç faktörü, katkısız betonlardan daha yüksek değerler almıştır. Üretimde sadece kalker esaslı agrega kullanılması, silis esaslı agrega ile üretilen betonlara göre su buharı difüzyon direnç faktörünü yaklaşık iki kat arttırmıştır. Yüksek sıcaklık etkisinde su buharı difüzyon direnç faktörü önemli ölçüde azalmıştır.
- Binalarda ısı yalıtım kurallarının verildiği ve yoğunlaşma tahkikinin gösterildiği TS 825 standardında betonun ısı iletim katsayısı için 1.65 W/mK, buhar difüzyon direnç faktörü için 70/120 hesap değerlerini önermiş, mineral katkıların ve agrega türünün etkisi dikkate alınmamıştır. Ancak yapılan deneysel çalışma sonucunda beton üretiminde farklı malzeme ve karışım oranları için ısı iletim katsayılarının 1.96 W/mK ile 2.07 W/mK arasında değiştiği ve 1.65 W/mK'den daha büyük değerler aldığı; su buharı difüzyon direnç faktörünün 31-103 gibi farklı bir aralıkta değiştiği tespit edilmiştir. Bu durumun TS 825'te dikkate alınması gerekir.
- Tek bir yüzeyden yüksek sıcaklık etkisine maruz kalan betonda sıcaklık derinliğe bağlı olarak azalırken rengin tür bileşeninin de kırmızı-mavi doğrultusunda değiştiği tespit edilmiştir. Yüksek sıcaklık etkisinde kalan betonda sıcaklık ile rengin tür bileşeni arasında bu çalışma kapsamında üretilen betonlar için ilişki kurulmuş, agrega türüne bağlı olarak korelasyon katsayısı yüksek üç farklı bağıntı (6.1-6.3) elde edilmiştir. Bu bağıntılar kullanılarak yüzeyden itibaren 4. cm'ye kadar beton sıcaklığı %94.2 doğrulukla tahmin edilmiştir.

Silis ve kalker esaslı agrega ile üretilen betonlar için;

$$T_{SC} = -26.6 \times H + 1022.2 \quad (R=0.97)$$

Silis esaslı agrega ile üretilen betonlar için;

$$T_S = -10.4 \times H + 735.2 \quad (R=0.94)$$

Kalker esaslı agrega ile üretilen betonlar için;

$$T_C = -8.5 \times H + 686.0 \quad (R=0.96)$$

Böylelikle yüksek sıcaklık etkisinde kalan betondan karot numune alınarak, betonun rengindeki değişiklikler, derinliğe bağlı olarak incelenebilir, betonun yüzeyden

itibaren maruz kaldığı sıcaklık ve donatının eriştiği sıcaklık tahmin edilebileceği sonucuna varılmıştır.

- Betonların mekanik özelliklerindeki değişim, bazı farklılıklar olsa da sıcaklık artışı ile dayanımların azalması şeklinde görülmüştür. Maruz kalınan sıcaklığın yanı sıra sıcaklık etki süresi de mekanik özelliklerdeki değişimi doğrudan etkilemiştir. Sıcaklık arttıkça çekme dayanımı değişimi her grupta farklı gözlenirken suda soğutulanların çekme dayanımları genel olarak sıcaklık artışıyla azalmıştır. Havada soğutulan numunelerde ise 2 saat boyunca yüksek sıcaklık etkisine maruz kalan I. Grup numunelerde 600°C’de, istenen sıcaklığa ulaşıldığında fırından hemen çıkarılan II. ve III. Gruplarda 900°C’de önemli ölçüde azalmalar görülmüştür.
- Diğer bir mekaniksel özellik olan basınç dayanımı artan sıcaklıkla birlikte azalmıştır. Bu azalmaya çekme dayanımında olduğu gibi sıcaklık etki süresi önemli ölçüde etki etmiştir. I. Grup numuneler 600°C’de basınç dayanımlarının yaklaşık yarısını kaybetmiş, diğer gruplarda ise bu sıcaklıkta dayanımdaki kayıp oranı ortalama %20 iken 900°C’de yaklaşık %60 oranındadır. Suda soğutmanın gerek çekme gerekse basınç dayanımlarına zararlı etkisi havada soğutmaya göre daha fazla olmuştur.
- Yüksek sıcaklık etkisinde kalan puzolan katkılı numunelerin dayanım kaybında, puzolan katkısız numunelere göre önemli bir fark görülmemiştir. Ancak genel olarak uçucu kül ve cüruf, silis dumanına göre daha iyi performans göstermiştir.
- Renkte meydana gelen değişim ile basınç dayanımındaki değişim arasında paralellik gözlenmiştir. Buradan, renk incelemesi ile basınç dayanımındaki değişim hakkında fikir edinilebileceği sonucuna varılmıştır. Bu çalışmada, üretimde kullanılan agrega türüne göre oluşturulan dört girdi parametrelili üç YSA modeli yardımıyla yüksek sıcaklığa maruz betonun basınç mukavemeti belirlenmeye çalışılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, silis ve kalker esaslı agregalı betonlarda %91.8, silis esaslı agregalı betonlarda %91.3, kalker esaslı agregalı betonlarda ise %90.8 ortalama doğruluk saptanmıştır. Sonuçlar ayrıca betonun basınç dayanımının dört girdi parametresi yardımıyla oldukça doğru bir şekilde tahmin edilebileceğini göstermiştir.
- Sonuç olarak yüksek sıcaklık etkisine maruz kalan betonarme yapıların yüzeyindeki renk değişimi, betonun yüksek sıcaklık etkisi sonrası özelliklerinin tespitinde bir tahribatsız muayene yöntemi olarak kullanılabilir.

KAYNAKLAR

- Akman, M.S., (1992), “Betonarme Yapılarda Yangın Hasarı ve Yangın Sonunda Taşıyıcılığının Belirlenmesi”, Yapıda Yangından Korunma Sempozyumu, İstanbul.
- Akman, M.S., (2000), Yapı Hasarları ve Onarım İlkeleri, TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası, İstanbul.
- Akman, M.S. ve Güner A., (1984), “The Applicability of Sonreb Method on Damaged Concrete”, *Matériaux et Constructions*. 17:195-200.
- Aköz, F. ve Yüzer, N., (1994), “Yüksek Sıcaklığın Nedenleri ve Betonarme Elemanlara Etkileri”, *Yıldız Teknik Üniversitesi Dergisi*, 3.
- Aköz, F., Yüzer, N. ve Koral, S., (1995), “Portland Çimentolu ve Silis Dumanı Katkılı Harçların Fiziksel ve Mekanik Özelliklerine Yüksek Sıcaklığın Etkileri”, *Teknik Dergi*, 1.
- Allen, D.C. ve Desai, P.M., (1967), “The Influence of Aggregate on the Behaviour of Concrete at Elevated Temperatures”, *Nuclear Engineering and Design*, 6:75-77.
- Alonso, C., Andrade, C., Castellote, M. ve Khoury G.A., (2003a), “Microstructure-Solid Phases”, International Centre for Mechanical Sciences, Course on Effect of Heat on Concrete, Udine/Italy.
- Alonso, C., Andrade, C. ve Khoury, G.A., (2003b), “Porosity&Microcracking”, International Centre for Mechanical Sciences, Course on Effect of Heat on Concrete, Udine/Italy.
- Anderberg, Y., (2003), “Thermal Properties & Analysis”, International Centre for Mechanical Sciences, Course on Effect of Heat on Concrete, Udine/Italy.
- Andrade, C., Alonso, C. ve Khoury, G.A., (2003a) “Relating Microstructure to Properties”, International Centre for Mechanical Sciences, Course on Effect of Heat on Concrete, Udine/Italy.
- Andrade, C., Alonso, C. ve Khoury, G.A., (2003b), “Microstructure & Moisture”, International Centre for Mechanical Sciences, Course on Effect of Heat on Concrete, Udine/Italy.
- Ashrae Fundamentals, (1997), “Yakacaklar ve Yanma”, Tesisat Mühendisleri Derneği Teknik Yayınları:2.
- ASTM C 597-02, (2002), Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete.
- ASTM D 1535-08, (2008), Specifying Color by The Munsell System.
- Avcı, A.U., (1984), “Dökümde Enerji Tasarrufu”, Yıldız Teknik Üniversitesi Yayınları, 178.
- Aydın, S. ve Baradan, B., (2003), “Yüksek Sıcaklığa Dayanıklı Geliştirilmesi”, TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası 5. Ulusal Beton Kongresi, İstanbul.
- Bagel, L. ve Zivica V., (1997), “Relationship between Pore Structure and Permeability of Hardened Cement Mortars: On the Choice of Effective Pore Structure Parameter”, *Cement and Concrete Research*, 27:1225-1235.
- Baradan, B., Yazıcı, H. ve Ün, H., (2002), Betonarme Yapılarda Kalıcılık (Durabilite), Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Yayınları, İzmir.
- Bazant, Z.P. ve Kaplan, M.F., (1996), Concrete at High Temperatures, Longman Group Limited, London.

Binaların Yangından Korunması Hakkında Yönetmelik, (2002), Resmi Gazete, 24827.

Behnood, A. ve Ghandehari M., (2009), "Comparison of Compressive and Splitting Tensile Strength of High Strength Concrete with and without Polypropylene Fibers Heated to High Temperatures", Fire Safety Journal, 44:1015-1022.

Behnood, A. ve Ziari, H., (2008), "Effects of Silica Fume Addition and Water to Cement Ratio on the Properties of High-Strength Concrete After Exposure to High Temperatures", Cement and Concrete Composites, 30:106-112.

Bonnel, D.G.R. ve Harper, F.C., (1950), "The Thermal Expansion of Concrete", Building Research Station, 320-330.

BS 1881 Part 203, (1986), Recommendations on the Non-destructive Testing on Concrete.

Cam, H.T. ve Neithalath, N., (2010), "Moisture and Ionic Transport in Concretes Containing Coarse Limestone Powder", Cement and Concrete Composites, Article in pres.

CEB, (1991), "Fire Design of Concrete Structures", Bulletin D'Information, Lausanne.

Chan, Y.N., Lou, X. ve Sun, W., (2000), "Compressive Strength and Pore Structure of High-Performance Concrete after Exposure to High Temperature up to 800°C", Cement and Concrete Research, 30:247-251.

Chang, W., Giang, Y., Wang, C. ve Huang C., (1993), "Concrete at High Temperatures above 1000°C", Security Technology, Proceedings, Institute of Electrical and Electronics Engineers International Carnahan Conference, 1993.

Chiang, C. ve Tsai, C., (2003), "Time-Temperature Analysis of Bond Strength of a Rebar after Fire Exposure", Cement and Concrete Research, 33:1651-1654.

Chiang, C.H. ve Yang, C.C., (2005), "Artificial Neural Networks in Prediction of Concrete Strength Reduction Due to High Temperature", ACI Materials Journal, 102:93-102.

Cioni, P., Croce, P. ve Salvatore, W., (2001), "Assessing Fire Damage to R.C. Elements", Fire Safety Journal, 36:181-199.

Cülfik, M.S. ve Özturan, T., (2002), "Effect of Elevated Temperatures on the Residual Mechanical Properties of High-Performance Mortar", Cement and Concrete Research, 32:809-816.

Çengel, Y., (2006), Heat and Mass Transfer A Practical Approach, McGraw-Hill, Singapore.

Diederichs, U. ve Schneider, U., (1981) "Bond Strength at High Temperatures", Magazine of Concrete Research, 33:75-84.

Erdoğan, T.Y., (2003), Beton, ODTÜ Geliştirme Vakfı Yayıncılık ve İletişim A.Ş. Yayını, Ankara.

Ersoy, H.Y., (2001), Kompozit Malzeme, Birinci Basım, Literatür Yayınları, İstanbul.

Fares, H., Remond, S., Noumowe, A. ve Cousture, A., (2010), "High Temperature Behaviour of Self-Consolidating Concrete Microstructure and Physicochemical Properties", Cement and Concrete Research, 40:488-496.

Ghandehari, M., Behnood, A. ve Khanzadi, M. (2010), "Residual Mechanical Properties of High-Strength Concretes after Exposure to Elevated Temperatures", Journal of Materials in Civil Engineering, 22(1):59-64.

Guisse, S.E., Short, N.R., Purkiss, J.A., (1996), "Colour Analysis for Assessment of Fire Damaged Concrete", Concrete Repair, Rehabilitation and Protection, Proceeding of The International Conference Held at The University of Dundee, Scotland/UK.

Günaydın, H.M. ve Doğan, S.Z., (2004), "A Neural Network Approach for Early Cost Estimation of Structural Systems of Buildings", International Journal of Project Management, 22:595-602.

Haddad, R.H., Al-Saleh, R.J. ve Al-Akhras, N.M., (2008), "Effect of Elevated Temperature on Bond between Steel Reinforcement and Fiber Reinforced Concrete", Fire Safety Journal, 43:334-343.

Haddad, R.H. ve Shannis, L., (2004), "Post-fire Behavior of Bond Between High Strength Pozzolanic Concrete and Reinforcing Steel", Construction and Building Materials, 18:425-435.

Haksever A., (1991) "Yangın Odalarının Teorik-Nümerik Yangın Analizleri için Modelleştirilmesi", Akdeniz Üniversitesi Isparta Mühendislik Fakültesi Dergisi, 6:57-66.

Haykin, S., (1994), Neural Networks: A Comprehensive Foundation, Macmillan College Publishing Company, Inc. NJ..

John, D.A., Poole, A.W. ve Sims, I., (1998), Concrete Petrography, Elsevier Butterworth Heinemann, London.

Kabay, N., (2009), Hafif Agregalı Betonun Boşluk Yapısının Mekanik ve Fiziksel Özelliklere Etkisi, Doktora Tezi, Y.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Kalifa, P., Menneteau, F.D. ve Quenard D., (2000), "Spalling and Pore Pressure in HPC at High Temperatures", Cement and Concrete Research, 30:1915-1927.

Kanema, M., Morais, M.V.G., Noumowe, A., Gallias, J.L. ve Cabrillac R., (2007), "Experimental and Numerical Studies of Thermo-Hydrous Transfers in Concrete Exposed to High Temperature", Heat Mass Transfer, 44:149-164.

Kearsley, E.P. ve Wainwright, P.J., (2001), "Porosity and Permeability of Foamed Concrete", Cement and Concrete Research, 31:805-812.

Khoury, G.A., (1992), "Compressive Strength of Concrete at High Temperatures: A Reassessment", Magazine of Concrete Research, sayı 44:291-309.

Khoury, G.A., (2000), "Effect of Fire on Concrete and Concrete Structures", Progress in Structural Engineering and Materials, 2:429-447.

Khoury, G.A., (2003b), "Thermo-Hydral Behaviour", International Centre for Mechanical Sciences, Course on Effect of Heat on Concrete, Udine/Italy.

Khoury, G.A., (2003a), "Fire & Assessment", International Centre for Mechanical Sciences, Course on Effect of Heat on Concrete, Udine/Italy.

Khoury, G.A., (2003b), "Spalling", International Centre for Mechanical Sciences, Course on Effect of Heat on Concrete, Udine/Italy..

Kızılkant, A.B., (2004), Yüksek Sıcaklık Etkisinde Kalan Harcın Basınç Dayanımı-Renk Değişimi İlişkisinin Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Y.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Kızılkant, A.B. ve Yüzer, N. (2008), "Yüksek Sıcaklık Etkisindeki Harcın Basınç Dayanımı-Renk Değişimi İlişkisi", İMO Teknik Dergi, 19(2):4381-4392.

- Kodur, V.K.R. ve Sultan, M.A., (2003), "Effect of Temperature on Thermal Properties of High-Strength Concrete", *Journal of Materials in Civil Engineering*, 15:101-107.
- Lee, j., Xi, Y. ve Willam, K., (2008), "Properties of Concrete after High-Temperature Heating and Cooling", *ACI Materials Journal*, 105:334-341.
- Li, M., Qian, C. ve Sun, W., (2004), "Mechanical Properties of High-Strength Concrete After Fire", *Cement and Concrete Research*, 34:1001-1005.
- Lin, D.F., Luo, H.L. ve Lee, J.R., (2007), "Effects of Temperatures on Mortar Quantified by Surface Color Changes", *Journal of ASTM International*, 4(4).
- Luke, J.T., (1996), *The Munsell Color System: A Language for COLOR*, Fairchild Publications, USA.
- Luo, H.L. ve Lin, D.F., (2007), "Study the Surface Color of Sewage Mortar at High Temperature", *Construction and Building Materials*, 21:90-97.
- Mahsanlar N., (2006), *Yüksek Sıcaklık Etkisinde Beton Davranışı*, Yüksek Lisans Tezi, Y.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Mehta, K.P. ve Monteiro, P.J.M., (2006), *Concrete, Microstructure, Properties and Materials*, McGraw Hill, Third Edition.
- Mendes, A., Sanjayan, J. ve Collins F., (2008), "Phase Transformations and Mechanical Strength of OPC/Slag Pastes Submitted to High Temperatures", *Materials and Structures*, 41:345-350.
- Neuro Solutions, (2003), *Neurodimension, Inc., Version 4.24*.
- Neville, A.M., (1990), *Properties of Concrete*, Third Edition, Longman Scientific and Technical, New York/USA.
- Neville, A.M., (2000), *Properties of Concrete*, Fourth Edition, Longman Scientific and Technical, New York/USA.
- Olliver, J.P., Maso, J.C. ve Bourdette B., (1995), "Interfacial Transition Zone in Concrete", *Advanced Cement Based Materials*, 2:30-38.
- Onaran, K., (1999), *Malzeme Bilimi*, Yedinci Basım, Bilim Teknik Yayınevi, İstanbul.
- Öztürk, L.D., (2002), "Munsell Renk Örnekleri Yansıtma Çarpanlarının Rengin Bileşenlerine Göre Değişimi", *Yıldız Teknik Üniversitesi Dergisi*, 2:19-29.
- Paksoy, A.S., (1999), *Boya El Kitabı*, TMMOB Kimya Mühendisleri Odası, İstanbul.
- Papayianni, I. ve Valliasis, T.H., (2005), "Heat Deformation of Fly Ash Concrete", *Cement & Concrete Composites*, 27:249-254.
- Peng, G.F., Chan, S.Y.N. ve Anson M., (2001), "Chemical Kinetics of C-S-H Decomposition in Hardened Cement Paste Subjected to Elevated Temperatures up to 800°C", *Advances in Cement Research*, 13:47-52.
- Perkins, P.H., (1986), *Repair, Protection and Waterproofing of Concrete Structures*, Elsevier Applied Science Publishers Ltd., England.
- Phan, L.T., (2008), "Pore Pressure and Explosive Spalling in Concrete", *Materials and Structures*, January, 41:1623-1632.

- Poon, C.S., Azhar, S., Anson, M. ve Wong, Y.L., (2001), "Comparison of the Strength and Durability Performance of Normal-and High-Strength Pozzolanic Concretes at Elevated Temperatures", *Cement and Concrete Research*, 31:1291-1300.
- Poon, C.S., Shui, Z.H. ve Lam, L., (2004), "Compressive Behavior of Fiber Reinforced High-Performance Concrete Subjected to Elevated Temperatures", *Cement and Concrete Research*, 34:2215-2222.
- Postacıoğlu B., (1987), *Beton*, Cilt 2, Teknik Kitaplar Yayınevi, İstanbul.
- Rafiq, M.Y., Bugmann, G. ve Easterbrook, D.J., (2001), "Neural Network Design for Engineering Applications", *Computers and Structures*, 79:1541-52.
- Ramakrishnan, V., Shafai, H.F. ve Wu G., (1991), "Cyclic Heating and Cooling Effects on Concrete Durability", *Concrete Durability*.
- Riley, M.A., (1991), "Possible New Method for the Assessment of Fire Damaged Concrete", *Magazine of Concrete Research*, 43:87-92.
- Ruiz, A.L., Platret, G., Massieu, E. ve Ehrlicher A., (2005), "The Use of Thermal Analysis in Assessing The Effect of Temperature on a Cement Paste", *Cement and Concrete Research*, 35:609-613.
- Sakr, K. ve El-Hakim E., (2005), "Effect of Temperature or Fire on Heavy Weight Concrete Properties", *Cement and Concrete Research*, 35:590-596.
- Sarshar, R. ve 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*, 45:51-61.
- 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*, 27:239-248.
- Schrefler, B.A., Brunello, P., Gawin, D., Majorana, C.E., 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., Majorana, C.E., (2003), "Physical, Mathematical & Numerical Modelling", *International Centre for Mechanical Sciences, Course on Effect of Heat on Concrete*, Udine/Italy.
- Shin, K.Y., Kim, S.B., Kim, J.H., Chung, M. ve Jung, P.S., (2002), "Thermo-Physical Properties and Transient Heat Transfer of Concrete at Elevated Temperatures", *Nuclear Engineering and Design*, 212:233-241.
- Shoaib, M.M., Ahmed, S.A. ve Balaha, M.M., (2001), "Effect of Fire and Cooling Mode on the Properties of Slag Mortars", *Cement and Concrete Research*, 31:1533-1538.
- Short, N.R., Purkiss, J.A. ve Guise S.E., (2001), "Assessment of Fire Damaged Concrete Using Colour Image Analysis", *Construction and Building Materials*, 15:9-15.
- Sirel, Ş., (1974), *Kuramsal Renk Bilgisi*, Kutulmuş Matbaası, İstanbul.
- Tang, W.C. ve Lo, T.Y. (2009), "Mechanical and Fracture Properties Normal and High-Strength Concretes with Fly Ash after Exposure to High Temperatures", *Magazine of Concrete Research*, 61:323-330.

Taşdemir, M.A., Bayramov, F., Ağar, Ş. ve Yerlikaya, M., (2005), “Çelik Tel Donatılı Betonların Performansa Dayalı Tasarımı”, TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası 6. Ulusal Beton Kongresi, İstanbul.

Teknik Rapor, (2007), “İstanbul İli, Bakırköy İlçesi, Güngören Genç Osman Mahallesi, Koray Sok. No:4 Adresinde Bulunan Yangına Maruz Kalmış Betonarme Karkas Yapının Malzeme Özelliklerinin Belirlenmesi Raporu”, YTÜ İnş. Fak. İnş. Müh. Böl. Yapı Malzemeleri ABD.

TS EN 12086, (2002), Isı Yalıtım Malzemeleri-Binalar İçin-Su Buharı Geçirgenlik Özelliklerinin Tayini.

TS EN 12390-3, (2003), Beton-Sertleşmiş Beton deneyleri-Bölüm 3: Deney Numunelerinde Basınç Dayanımının Tayini.

TS EN 12390-6, (2002), Beton-Sertleşmiş Beton deneyleri-Bölüm 3: Deney Numunelerinin Yarmada Çekme Dayanımının Tayini

TS EN 1992-1-2, (2006), Beton Yapıların Tasarımı – Bölüm 1-2: Genel Kurallar – Yapısal Yangın Tasarımı (Eurocode 2).

TS EN 206-1, (2002), Beton-Bölüm 1: Özellik, Performans, İmalat ve Uygunluk.

TS ISO 8302, (2002), Isı Yalıtımı-Kararlı Halde Isıl Direncin ve İlgili Özelliklerin Tayini-Mahfazalı Sıcak Plaka Cihazı.

TS 1263, (1983), Yapı Elemanlarının Yanmaya Dayanıklılık Sınıfları ve Yanmaya Dayanıklılık Deney Metotları.

Uz, B., (1994), Mineraller Kristallografi-Mineraloji, Kurtiş Matbaacılık, İstanbul.

Vejmelkova, E., Padevet, P. ve Cerny, R., (2008), “Effect of Cracks on Hygric and Thermal Characteristics of Concrete”, Ernst&Sohn Verlag für Architektur und Technische Wissenschaften, 30:438-444.

Vodak, F., Cerny, R., Drchalova, J., Hoskova, S., Kapickova, O., Michalko, O., Semerak, P. ve Toman, J., (1997), “Thermophysical Properties of Concrete for Nuclear-Safety Related Structures”, Cement and Concrete Research, 27:415-426.

Vodak, F., Trtik, K., Kapickova, O., Hoskova, S. ve Demo, P., (2004), “The Effect of Temperature on Strength-Porosity Relationship for Concrete”, Construction and Building Materials, 18:529-534.

Xiao, J. ve Konig, G., (2004), “Study on Concrete at High Temperature in China-an Overview”, Fire Safety Journal, 39:89-103.

Xu, Y., Wong, Y.L., Poon, C.S. ve Anson, M., (2001), “Impact of High Temperature on PFA Concrete”, Cement and Concrete Research, 31:1065-1073.

Yeğinoğlu, A., (2002), Silis Dumanı ve Çimento ile Betonda Kullanımı, TÇMB/AR-GE/Y01.01, Ankara.

Yüzer, N., Aköz, F. ve Öztürk, L.D., (2001), “Yangına Maruz Yapılarda Betonun Basınç Dayanımı- renk Değişimi İlişkisi”, Yıldız Teknik Üniversitesi Dergisi, 4:51-60.

Yüzer, N., Aköz, F., Öztürk, L.D. ve Kızılkanaat, A.B., (2003) “Yüksek Sıcaklık Etkisinde Kalan Çimento Harcında Hasar Oranının renk Ölçümü ile Araştırılması”, TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası 5. Ulusal Beton Kongresi, İstanbul.

Yüzer, N., Aköz, F., Öztürk, L.D., (2004a), “Compressive Strength–Color Change Relation in Mortars at High Temperature”, *Cement and Concrete Research*, 34:1803-1807.

Yüzer, N., Aköz, F. ve Kızıllkanat, A.B., (2004b), “Yüksek Dayanımlı Betonun Fiziksel ve Mekanik Özelliklerine Yüksek Sıcaklık Etkisi”, TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası, Türkiye İnşaat Mühendisliği XVII. Teknik Kongre ve Sergisi, İstanbul.

Yüzer, N., Aköz, F., Kızıllkanat, A.B. ve Mahsanlar, N., (2005), “Yüksek Sıcaklık Etkisinde Kalan Betonda Hasar Oranının Renk Ölçümü ile Araştırılması”, TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası 6. Ulusal Beton Kongresi, İstanbul.

Yüzer, N., Aköz, F., Öztürk, L.D., Akbaş, B., Çakır, Ö., Kızıllkanat, A.B. ve Kabay, N., (2007a), “Yangına Maruz Kalan Yapılarda Beton Basınç Dayanımı-Renk Değişimi İlişkisinin Araştırılması”, TÜBİTAK Araştırma Projesi, Proje No 103I040.

Yüzer, N., Akbaş, B. ve Kızıllkanat, A.B., (2007b), “Predicting the Compressive Strength of Concrete Exposed to High Temperatures with a Neural Network Model”, TÇMB, 3rd International Symposium Sustainability in Cement and Concrete, İstanbul.

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*, 32:363-371.

EKLER

Ek Çizelge 1 I. Grup beton numunelerin renk değişimi (tür)

Sıcaklık (°C)	NSKA	NSKW	MsSKA	MsSKW	CSKA	CSKW	FSKA	FSKW
20	30.6		32.0		25.4		29.8	
200	25.1	30.0	29.0	27.4	25.1	24.7	30.4	30.7
300	22.4	24.4	24.3	25.7	23.7	24.4	21.8	23.3
600	19.9	20.2	21.7	21.9	19.6	19.9	20.7	21.3
900	25.5	23.8	26.9	24.7	25.0	21.9	28.2	24.1

Ek Çizelge 2 I. Grup beton numunelerin renk değişimi (değer)

Sıcaklık (°C)	NSKA	NSKW	MsSKA	MsSKW	CSKA	CSKW	FSKA	FSKW
20	6.7		6.4		6.7		6.3	
200	6.8	5.9	6.5	6.1	6.6	6.7	6.6	6.5
300	6.6	6.4	6.4	6.5	6.3	6.3	6.6	6.6
600	6.9	6.4	6.9	4.6	7.0	6.6	7.3	5.3
900	7.7	5.8	7.7	5.7	7.5	5.7	8.4	5.4

Ek Çizelge 3 I. Grup beton numunelerin renk değişimi (doymuşluk)

Sıcaklık (°C)	NSKA	NSKW	MsSKA	MsSKW	CSKA	CSKW	FSKA	FSKW
20	0.3		0.2		0.4		0.4	
200	0.5	0.3	0.3	0.4	0.4	0.5	0.3	0.3
300	0.7	0.6	0.5	0.5	0.7	0.7	0.7	0.6
600	0.9	1.1	0.6	0.5	0.8	0.9	0.6	0.8
900	0.5	0.8	0.6	0.6	0.4	0.6	0.3	0.7

Ek Çizelge 4 II. Grup beton numunelerin renk değişimi (tür)

Sıcaklık (°C)	NSA	NSW	MsSA	MsSW	CSA	CSW	FSA	FSW
20	32.4		34.2		34.6		34.2	
200	33.4	31.2	40.0	36.0	30.2	29.1	30.4	30.3
300	39.7	33.3	39.9	36.9	36.4	34.0	29.9	29.9
600	22.7	23.4	22.4	22.5	20.1	21.3	20.4	20.4
900	19.2	19.2	19.0	18.7	19.9	19.4	19.8	19.3

Ek Çizelge 5 II. Grup beton numunelerin renk değişimi (değer)

Sıcaklık (°C)	NSA	NSW	MsSA	MsSW	CSA	CSW	FSA	FSW
20	6.4		6.5		6.4		6.3	
200	6.9	6.4	6.6	6.5	6.7	6.4	6.3	6.0
300	6.5	5.9	6.6	6.3	5.9	5.8	6.2	5.8
600	5.9	5.6	6.3	6.1	6.3	5.8	6.0	5.5
900	7.1	5.0	6.4	6.9	6.8	6.3	5.6	5.1

Ek Çizelge 6 II. Grup beton numunelerin renk değişimi (doymuşluk)

Sıcaklık (°C)	NSA	NSW	MsSA	MsSW	CSA	CSW	FSA	FSW
20	0.20		0.30		0.20		0.20	
200	0.27	0.33	0.12	0.19	0.24	0.27	0.22	0.21
300	0.20	0.30	0.14	0.18	0.22	0.23	0.29	0.21
600	0.82	0.87	0.72	0.73	0.94	0.88	1.12	1.23
900	2.11	2.12	2.18	1.80	1.84	2.23	1.98	1.92

Ek Çizelge 7 III. Grup beton numunelerin renk değişimi (tür)

Sıcaklık (°C)	NKA	NKW	MsKA	MsKW	CKA	CKW	FKA	FKW
20	45.2		48.4		40.3		40.3	
200	38.0	36.0	42.9	40.8	38.8	39.7	37.3	42.6
300	39.6	40.5	46.1	47.7	40.8	39.4	33.0	39.0
600	21.7	23.2	22.5	26.8	24.2	24.1	28.1	25.3
900	21.9	22.2	25.3	26.1	23.4	23.6	22.6	22.2

Ek Çizelge 8 III. Grup beton numunelerin renk değişimi (değer)

Sıcaklık (°C)	NKA	NKW	MsKA	MsKW	CKA	CKW	FKA	FKW
20	6.1		5.7		5.6		5.6	
200	5.3	5.5	6.3	5.1	5.4	5.3	6.0	5.8
300	5.5	5.6	6.2	5.7	5.9	5.7	6.0	5.4
600	6.1	4.6	6.3	6.3	5.6	6.5	5.7	5.3
900	7.7	7.5	7.6	7.9	6.7	7.2	6.9	7.2

Ek Çizelge 9 III. Grup beton numunelerin renk değişimi (doymuşluk)

Sıcaklık (°C)	NKA	NKW	MsKA	MsKW	CKA	CKW	FKA	FKW
20	0.11		0.10		0.13		0.11	
200	0.20	0.16	0.14	0.11	0.12	0.13	0.11	0.10
300	0.16	0.10	0.13	0.14	0.12	0.13	0.16	0.12
600	0.27	0.28	0.20	0.20	0.45	0.38	0.17	0.33
900	0.60	0.54	0.40	0.40	0.50	0.68	0.60	0.61

Ek Çizelge 10 I. Grup beton numunelerin ultrases geçiş hızları (mm/μs)

Sıcaklık (°C)	NSKA	NSKW	MsKA	MsSKW	CSKA	CSKW	FSKA	FSKW
20	4.4		4.5		4.6		4.5	
200	4.1	4.0	4.3	4.3	4.5	4.1	4.3	4.0
300	3.8	3.5	4.0	3.6	4.1	3.7	3.9	3.7
600	2.3	1.8	2.1	1.2	1.8	2.0	2.0	1.8
900	0.8	0.2	0.9	0.2	0.8	1.7	1.1	0.2

Ek Çizelge 11 II. Grup beton numunelerin ultrases geçiş hızları (mm/μs)

Sıcaklık (°C)	NSA	NSW	MsSA	MsSW	CSA	CSW	FSA	FSW
20	5.1		5.3		5.0		5.1	
200	4.1	4.0	4.2	4.2	4.2	4.1	4.2	4.2
300	4.1	4.0	4.2	4.2	4.1	4.1	4.1	4.1
600	2.0	2.5	2.6	2.7	2.7	2.8	2.6	2.7
900	-	-	-	-	-	-	-	-

Ek Çizelge 12 III. Grup beton numunelerin ultrases geçiş hızları (mm/μs)

Sıcaklık (°C)	NKA	NKW	MsKA	MsKW	CKA	CKW	FKA	FKW
20	4.3		4.5		4.4		4.2	
200	4.3	4.4	4.6	4.5	4.4	4.4	4.4	4.3
300	4.4	4.3	4.6	4.5	4.3	4.2	4.3	4.2
600	3.6	3.7	3.1	3.3	3.4	2.5	3.7	3.7
900	2.0	0.2	1.0	0.1	1.8	0.2	1.8	2.3

Ek Çizelge 13 I. Grup beton numunelerin birim ağırlıkları (kg/m³)

Sıcaklık (°C)	NSKA	NSKW	MsSKA	MsSKW	CSKA	CSKW	FSKA	FSKW
20	2349		2369		2455		2284	
200	2318	2353	2362	2365	2456	2456	2275	2310
300	2330	2393	2357	2313	2308	2383	2300	2290
600	2268	2276	2267	2288	2233	2197	2261	2261
900	2144	2161	2087	2120	2037	2141	2096	2089

Ek Çizelge 14 I. Grup beton numunelerin hacimce su emme değerleri (%)

Sıcaklık (°C)	NSKA	NSKW	MsSKA	MsSKW	CSKA	CSKW	FSKA	FSKW
20	11.2		10.2		5.6		10.7	
200	11.9	11.1	11.2	11.1	6.5	6.6	12.2	11.2
300	11.8	13.4	11.5	12.4	13.3	13.2	11.7	11.1
600	15.8	14.8	16.0	14.2	16.6	13.9	17.4	14.9
900	21.2	18.7	18.3	20.4	23.4	18.0	19.9	20.3

Ek Çizelge 15 II. Grup beton numunelerin birim ağırlıkları (kg/m³)

Sıcaklık (°C)	NSA	NSW	MsSA	MsSW	CSA	CSW	FSA	FSW
20	2371		2388		2351		2361	
200	2353	2367	2380	2390	2355	2365	2344	2322
300	2350	2256	2364	2388	2355	2347	2345	2365
600	2325	2354	2297	2321	2303	2322	2286	2333
900	2170	2218	2156	2159	2152	2193	2172	2186

Ek Çizelge 16 II. Grup beton numunelerin hacimce su emme değerleri (%)

Sıcaklık (°C)	NSA	NSW	MsSA	MsSW	CSA	CSW	FSA	FSW
20	10.3		7.3		11.3		10.3	
200	11.6	10.0	8.3	7.5	11.3	10.7	11.8	10.9
300	11.5	11.5	9.7	8.1	11.6	11.6	12.0	11.1
600	13.4	11.4	14.4	13.3	14.9	13.5	15.0	12.7
900	21.5	17.6	17.5	21.9	21.9	19.0	20.3	20.0

Ek Çizelge 17 III. Grup beton numunelerin birim ağırlıkları (kg/m³)

Sıcaklık (°C)	NKA	NKW	MsKA	MsKW	CKA	CKW	FKA	FKW
20	2334		2339		2298		2350	
200	2293	2296	2346	2340	2334	2344	2351	2335
300	2275	2289	2380	2354	2321	2316	2336	2322
600	2299	2296	2319	2314	2298	2317	2267	2320
900	2197	2233	2178	2173	2229	2203	2221	2191

Ek Çizelge 18 III. Grup beton numunelerin hacimce su emme değerleri (%)

Sıcaklık (°C)	NKA	NKW	MsKA	MsKW	CKA	CKW	FKA	FKW
20	10.1		9.1		11.8		9.3	
200	13.2	13.3	7.4	8.8	11.0	10.5	9.5	9.9
300	12.0	12.1	6.1	7.2	11.9	15.3	9.7	10.2
600	12.5	13.8	10.5	11.1	12.8	12.4	11.6	12.4
900	17.0	16.0	18.0	18.6	16.6	17.9	15.6	16.4

Ek Çizelge 19 I. Grup beton numunelerin ısı iletim katsayısı değerleri (W/mK)

Sıcaklık (°C)	NSK	MsSK	CSK	FSK
20	1.89	1.91	1.94	2.02
200	1.87	1.85	1.89	1.98
300	1.83	1.82	1.83	1.92
600	1.68	1.46	1.54	1.48

Ek Çizelge 20 II. Grup beton numunelerin ısı iletim katsayısı değerleri (W/mK)

Sıcaklık (°C)	NS	MsS	CS	FS
20	2.05	2.07	2.05	2.03
200	2.04	2.05	2.02	2.02
300	2.03	2.02	2.01	2.02
600	1.83	1.78	1.80	1.80

Ek Çizelge 21 III. Grup beton numunelerin ısı iletim katsayısı değerleri (W/mK)

Sıcaklık (°C)	NK	MsK	CK	FK
20	1.98	2.06	2.13	1.96
200	1.98	1.96	2.07	1.96
300	1.95	1.89	1.95	1.94
600	1.87	1.82	1.61	1.65

Ek Çizelge 22 I. Grup beton numunelerin buhar difüzyon direnç faktörü değerleri

Sıcaklık (°C)	NSK	MsSK	CSK	FSK
20	31	51	44	44
200	23	44	36	43
300	28	34	30	38
600	15	15	14	13

Ek Çizelge 23 II. Grup beton numunelerin buhar difüzyon direnç faktörü değerleri

Sıcaklık (°C)	NS	MsS	CS	FS
20	35	46	45	38
200	29	33	34	30
300	25	25	26	25
600	20	23	20	19

Ek Çizelge 24 III. Grup beton numunelerin buhar difüzyon direnç faktörü değerleri

Sıcaklık (°C)	NK	MsK	CK	FK
20	67	103	87	66
200	35	48	46	34
300	27	32	27	25
600	21	23	20	19

Ek Çizelge 25 I. Grup beton numunelerde sıcaklığın ve rengin derinlikle değişimi

Numune Kodu	Derinlik (mm)	Sıcaklık (°C)	Renk		
			Tür	Değer	Doymuşluk
NSK	2	514	21,6 ²	5,9 ²	1,0 ²
	10	464	22,2	5,6	0,7
	20 ¹	420	-	-	-
	40	343	25,1	5,5	0,5
	80	233	30,5	5,9	0,2
	150	135	31,4	5,6	0,2
	200	103	26,7 ²	5,8 ²	0,5 ²
MsSK	2	511	21,3 ²	6,2 ²	1,0 ²
	10	473	22,6	5,3	0,6
	20 ¹	408	-	-	-
	40	317	26,6	5,8	0,2
	80	220	29,5	5,6	0,2
	150	143	33,2	5,4	0,1
	200	116	24,6 ²	6,1 ²	0,6 ²
CSK	2	501	20,3 ²	6,4 ²	1,1 ²
	10	463	20,9	5,7	0,6
	20 ¹	422	-	-	-
	40	347	23,4	5,9	0,3
	80	231	29,6	6,1	0,2
	150	134	33,4	6,0	0,2
	200	100	26,1 ²	6,4 ²	0,5 ²
FSK	2	522	20,6 ²	6,1 ²	0,6 ²
	10	419	21,6	6,7	0,5
	20 ¹	413	-	-	-
	40	335	26,2	6,2	0,1
	80	229	31,9	6,2	0,2
	150	132	32,9	6,1	0,2
	200	96	26,8 ²	6,1 ²	0,3 ²

¹ 20 mm derinlik için uygun boyutta numune çıkarılamadığından renk ölçümü yapılamamıştır.

² Renk ölçümü yüzeyde çimento hamuru fazında yapılmıştır.

Ek Çizelge 26 II. Grup beton numunelerde sıcaklığın ve rengin derinlikle değişimi

Numune Kodu	Derinlik (mm)	Sıcaklık (°C)	Renk		
			Tür	Değer	Doymuşluk
NS	2	481	20.5 ²	6.2 ²	1.4 ²
	10	473	28.6	6.4	0.3
	20 ¹	385	-	-	-
	40	329	37.1	6.4	0.3
	80	248	51.1	6.3	0.3
	150	146	58.4	6.2	0.2
	200	117	27.9 ²	6.4 ²	0.3 ²
MsS	2	510	21.5 ²	6.2 ²	0.6 ²
	10	474	29.6	5.9	0.3
	20 ¹	410	-	-	-
	40	369	39.3	5.7	0.2
	80	206	54.3	5.7	0.4
	150	142	64.7	5.9	0.3
	200	111	30.2 ²	6.4 ²	0.2 ²
CS	2	506	20.2 ²	6.5 ²	0.7 ²
	10	461	27.8	5.8	0.6
	20 ¹	405	-	-	-
	40	346	35.7	6.3	0.3
	80	235	42.0	6.2	0.2
	150	144	49.5	5.9	0.2
	200	114	27.3 ²	6.6 ²	0.4 ²
FS	2	515	20.8 ²	6.2 ²	1.1 ²
	10	444	28.1	5.9	0.4
	20 ¹	393	-	-	-
	40	341	33.8	5.6	0.3
	80	242	42.4	5.7	0.3
	150	137	51.0	6.0	0.2
	200	106	26.1 ²	6.4 ²	0.4 ²

¹ 20 mm derinlik için uygun boyutta numune çıkarılamadığından renk ölçümü yapılamamıştır.

² Renk ölçümü yüzeyde çimento hamuru fazında yapılmıştır.

Ek Çizelge 27 III. Grup beton numunelerde sıcaklığın ve rengin derinlikle değişimi

Numune Kodu	Derinlik (mm)	Sıcaklık (°C)	Renk		
			Tür	Değer	Doymuşluk
NK	2	519	19.5 ²	5.6 ²	1.1 ²
	10	485	26.0	6.0	0.4
	20 ¹	419	-	-	-
	40	370	36.5	5.8	0.2
	80	240	64.7	6.0	0.3
	150	133	66.9	5.6	0.2
	200	107	34.2 ²	5.9 ²	0.2 ²
MsK	2	521	21.0 ²	5.2 ²	1.0 ²
	10	501	28.1	5.2	0.1
	20 ¹	391	-	-	-
	40	306	40.2	5.5	0.1
	80	204	58.4	5.4	0.2
	150	135	61.3	5.4	0.2
	200	100	35.8 ²	5.8 ²	0.1 ²
CK	2	522	20.3 ²	6.9 ²	0.6 ²
	10	467	25.0	5.8	0.4
	20 ¹	428	-	-	-
	40	366	36.8	5.7	0.1
	80	243	46.6	5.6	0.2
	150	146	60.7	5.5	0.2
	200	101	33.5 ²	6.1 ²	0.3 ²
FK	2	512	20.8 ²	6.6 ²	0.8 ²
	10	460	28.2	5.4	0.3
	20 ¹	403	-	-	-
	40	359	42.1	5.6	0.2
	80	245	51.8	5.8	0.1
	150	140	60.8	5.5	0.2
	200	79	35.0 ²	6.7 ²	0.1 ²

¹ 20 mm derinlik için uygun boyutta numune çıkarılamadığından renk ölçümü yapılamamıştır.

² Renk ölçümü yüzeyde çimento hamuru fazında yapılmıştır.

Ek Çizelge 28 I. Grup beton numunelerin yarmada çekme dayanımları (N/mm²)

Sıcaklık (°C)	NSKA	NSKW	MsSKA	MsSKW	CSKA	CSKW	FSKA	FSKW
20	2.5		2.6		2.9		2.8	
200	2.5	2.2	2.8	2.4	2.9	2.9	2.9	2.5
300	2.5	2.1	2.5	2.1	2.9	2.2	2.8	2.2
600	1.9	1.0	1.6	0.8	1.4	0.7	1.3	0.9
900	0.4	0.3	0.4	0.4	0.4	0.4	0.5	0.2

Ek Çizelge 29 II. Grup beton numunelerin yarmada çekme dayanımları (N/mm²)

Sıcaklık (°C)	NSA	NSW	MsSA	MsSW	CSA	CSW	FSA	FSW
20	3.5		5.2		3.5		3.9	
200	3.5	3.3	4.5	4.2	3.4	3.4	3.3	3.1
300	3.4	3.0	4.3	4.0	3.3	2.8	3.1	3.0
600	3.3	2.2	3.0	1.8	3.2	1.7	2.6	1.8
900	0.9	0.5	0.6	0.4	0.9	0.5	0.7	0.5

Ek Çizelge 30 III. Grup beton numunelerin yarmada çekme dayanımları (N/mm²)

Sıcaklık (°C)	NKA	NKW	MsKA	MsKW	CKA	CKW	FKA	FKW
20	2.6		3.9		3.5		3.0	
200	2.8	2.7	3.1	2.8	3.7	2.9	2.5	3.3
300	2.5	2.2	2.3	2.6	3.2	3.2	2.7	2.5
600	2.4	1.7	2.3	2.0	3.3	1.4	2.7	1.8
900	1.1	0.6	1.0	0.5	1.4	0.5	1.3	0.5

Ek Çizelge 31 I. Grup beton numunelerin basınç dayanımları (N/mm²)

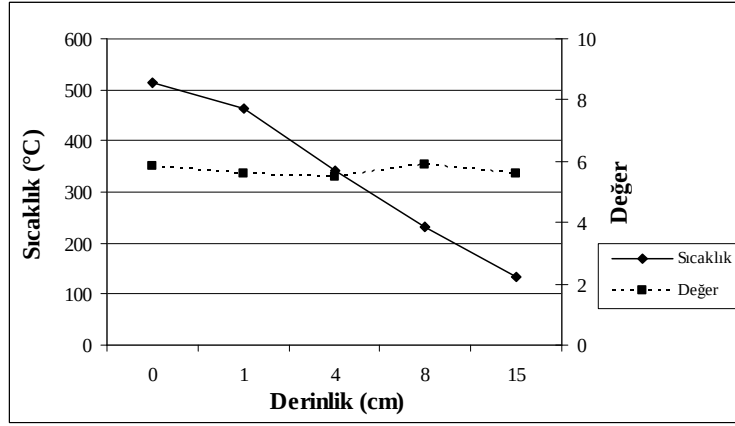
Sıcaklık (°C)	NSKA	NSKW	MsSKA	MsSKW	CSKA	CSKW	FSKA	FSKW
20	30.9		37.0		38.4		35.7	
200	30.4	27.1	34.6	32.2	33.4	31.6	29.0	26.4
300	29.3	26.5	36.4	28.4	34.5	28.2	29.2	27.1
600	24.2	12.9	27.0	13.8	21.7	18.1	23.1	10.5
900	7.4	5.3	6.3	4.4	7.0	9.4	9.7	4.6

Ek Çizelge 32 II. Grup beton numunelerin basınç dayanımları (N/mm²)

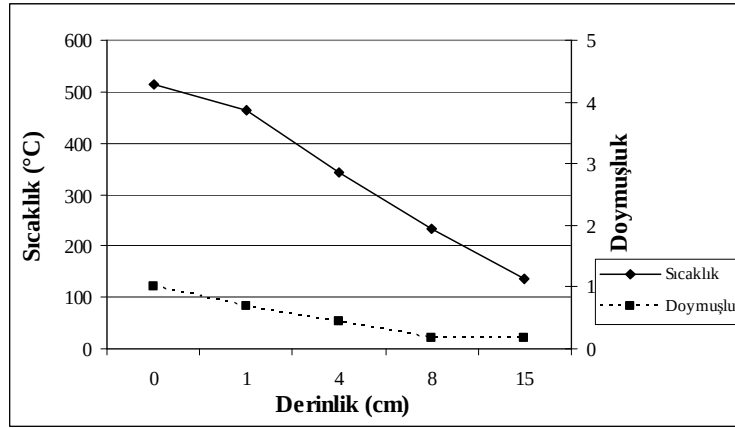
Sıcaklık (°C)	NSA	NSW	MsSA	MsSW	CSA	CSW	FSA	FSW
20	34.9		40.1		33.1		31.8	
200	34.1	33.2	38.2	37.2	31.2	31.2	34.1	32.9
300	35.9	28.9	37.3	30.6	31.5	28.7	33.0	32.6
600	28.6	25.6	36.6	27.2	31.0	27.4	31.3	28.8
900	15.4	10.3	13.0	9.3	18.2	11.3	17.6	9.4

Ek Çizelge 33 III. Grup beton numunelerin basınç dayanımları (N/mm²)

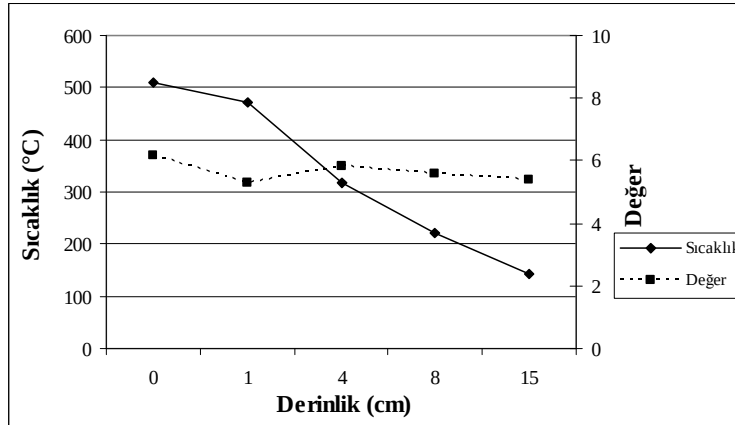
Sıcaklık (°C)	NKA	NKW	MsKA	MsKW	CKA	CKW	FKA	FKW
20	35.0		38.7		35.0		32.4	
200	34.3	33.8	42.1	39.6	32.8	37.3	31.2	28.1
300	37.0	32.0	40.4	40.6	34.5	34.8	33.6	28.9
600	31.8	20.8	33.1	23.8	30.5	22.7	28.2	20.6
900	18.0	7.4	15.8	8.8	18.4	9.2	20.9	11.5



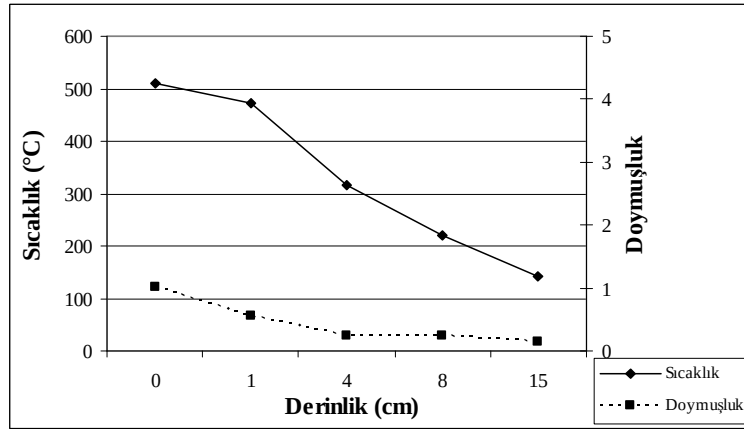
Ek Şekil 1 I. Grup katkısız seride sıcaklığın ve rengin (değer) derinlikle değişimi



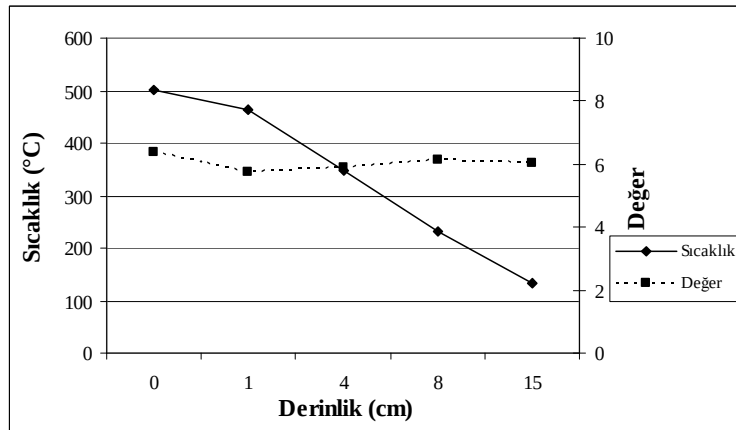
Ek Şekil 2 I. Grup katkısız seride sıcaklığın ve rengin (doymuşluk) derinlikle değişimi



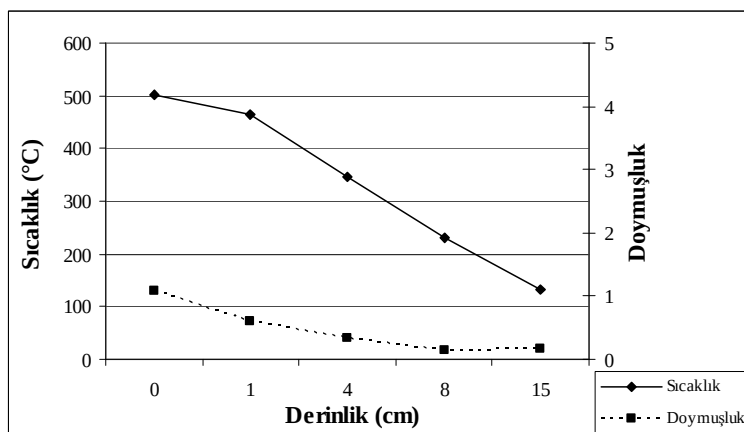
Ek Şekil 3 I. Grup silis dumanı katkılı seride sıcaklığın ve rengin (değer) derinlikle değişimi



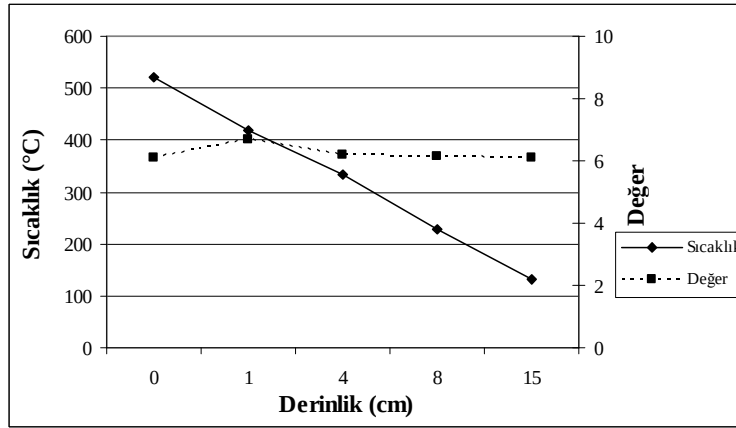
Ek Şekil 4 I. Grup silis dumanı katkılı seride sıcaklığın ve rengin (doymuşluk) derinlikle değişimi



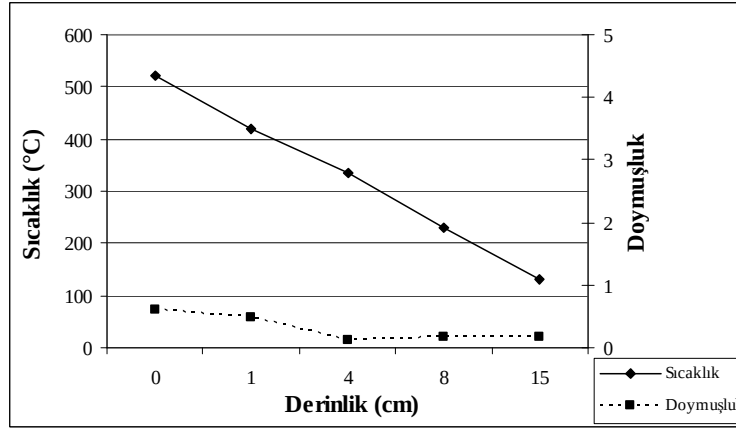
Ek Şekil 5 I. Grup cüruf katkılı seride sıcaklığın ve rengin (değer) derinliğe derinlikle



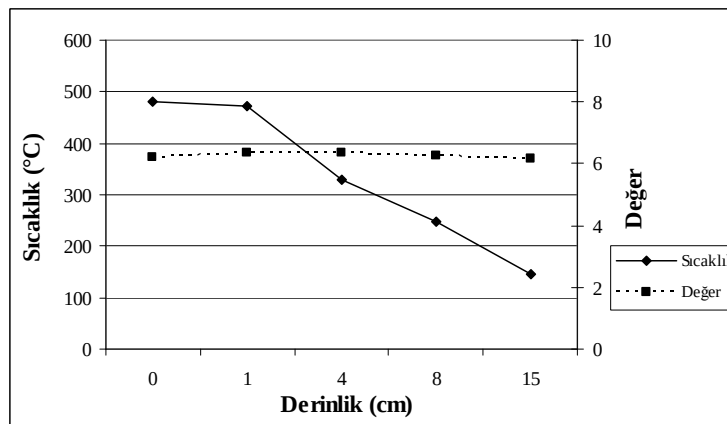
Ek Şekil 6 I. Grup cüruf katkılı seride sıcaklığın ve rengin (doymuşluk) derinlikle değişimi



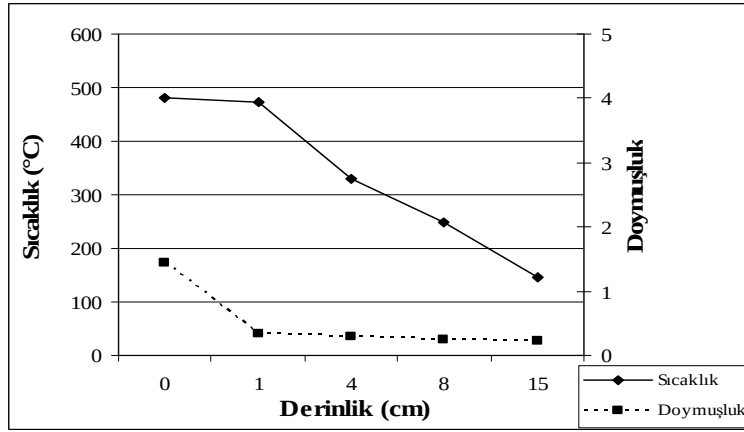
Ek Şekil 7 I. Grup uçucu kül katkıli seride sıcaklığın ve rengin (değer) derinlikle değişimi



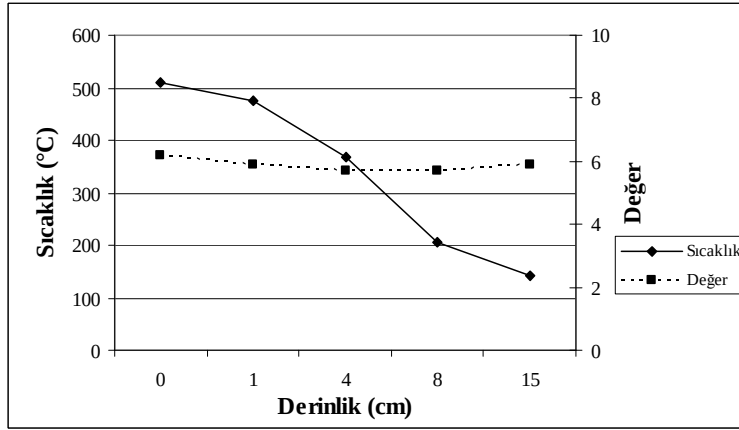
Ek Şekil 8 I. Grup uçucu kül katkıli seride sıcaklığın ve rengin (doymuşluk) derinlikle değişimi



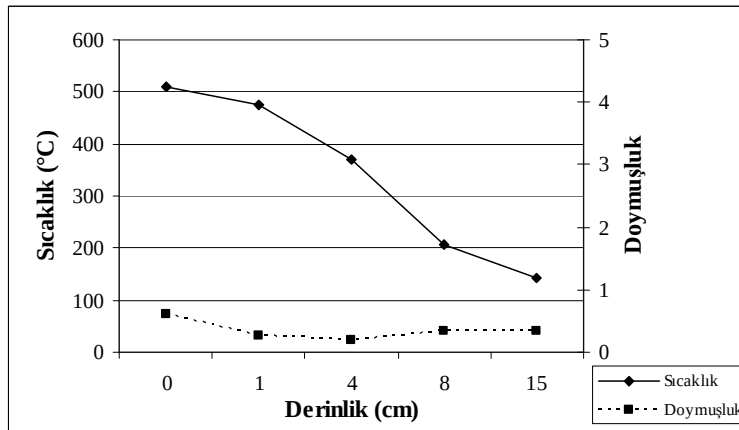
Ek Şekil 9 II. Grup katkısız seride sıcaklığın ve rengin (değer) derinlikle değişimi



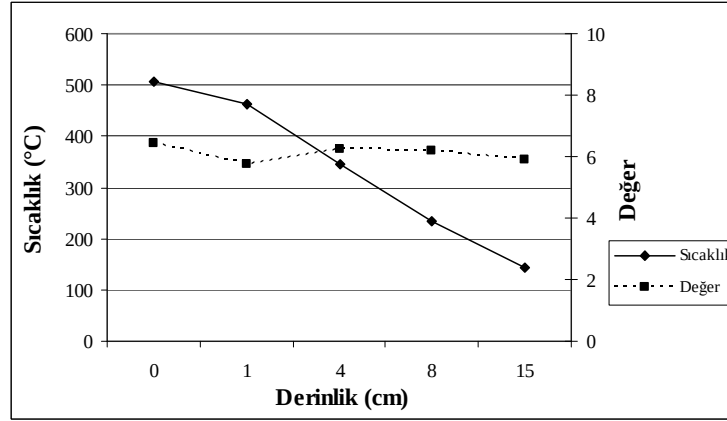
Ek Şekil 10 II. Grup katkısız seride sıcaklığın ve rengin (doymuşluk) derinlikle değişimi



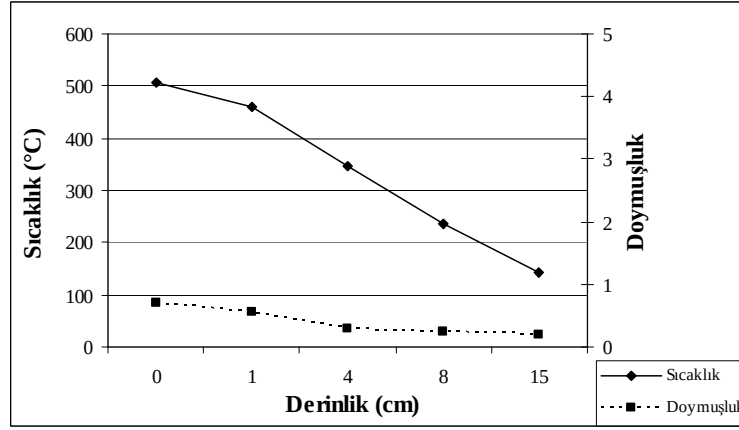
Ek Şekil 11 II. Grup silis dumanı katkılı seride sıcaklığın ve rengin (değer) derinlikle değişimi



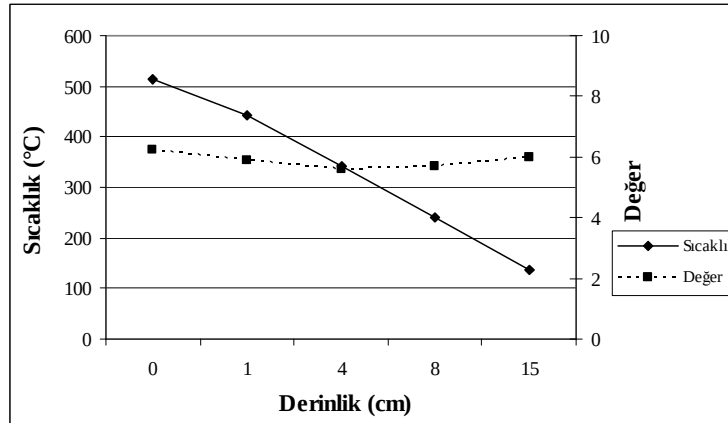
Ek Şekil 12 II. Grup silis dumanı katkılı seride sıcaklığın ve rengin (doymuşluk) derinlikle değişimi



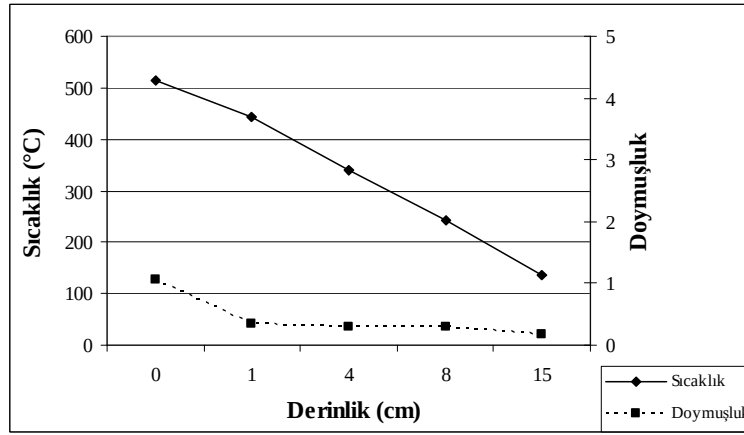
Ek Şekil 13 II. Grup cüruf katkılı seride sıcaklığın ve rengin (değer) derinlikle değişimi



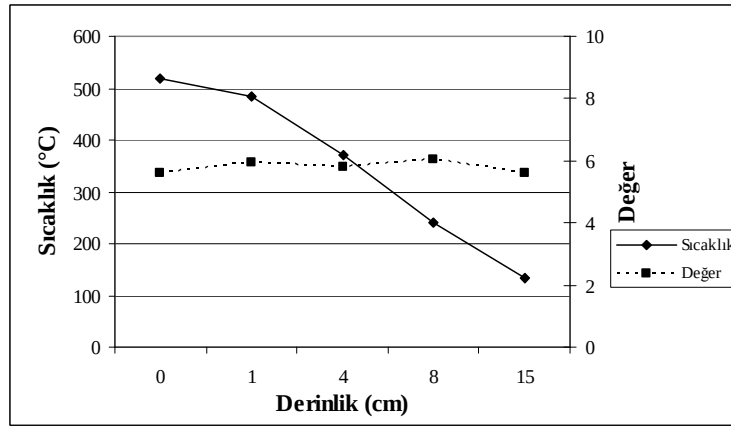
Ek Şekil 14 II. Grup cüruf katkılı seride sıcaklığın ve rengin (doymuşluk) derinlikle değişimi



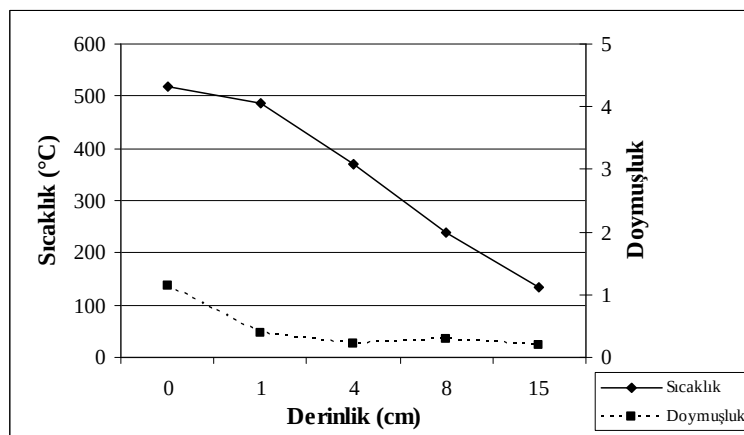
Ek Şekil 15 II. Grup uçucu kül katkılı seride sıcaklığın ve rengin (değer) derinlikle değişimi



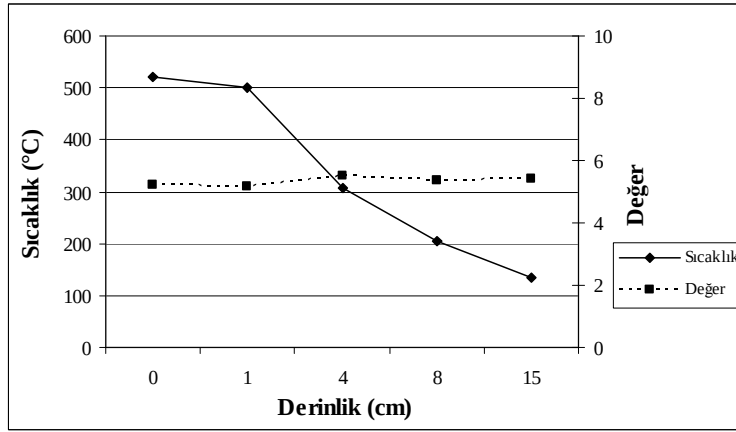
Ek Şekil 16 II. Grup uçucu kül katkılı seride sıcaklığın ve rengin (doymuşluk) derinlikle değişimi



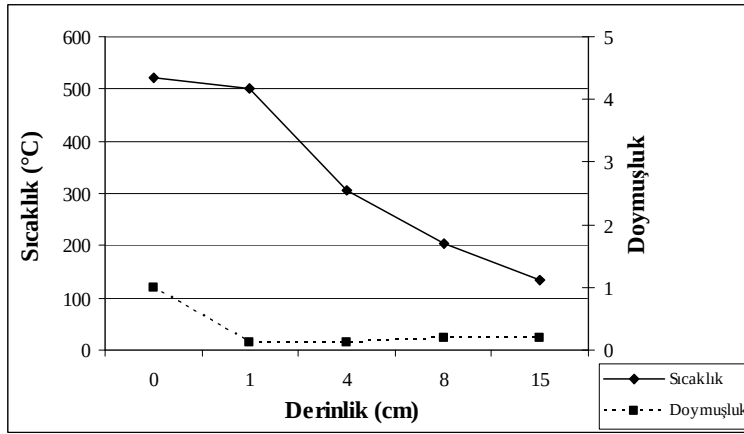
Ek Şekil 17 III. Grup katkısız seride sıcaklığın ve rengin (değer) derinlikle değişimi



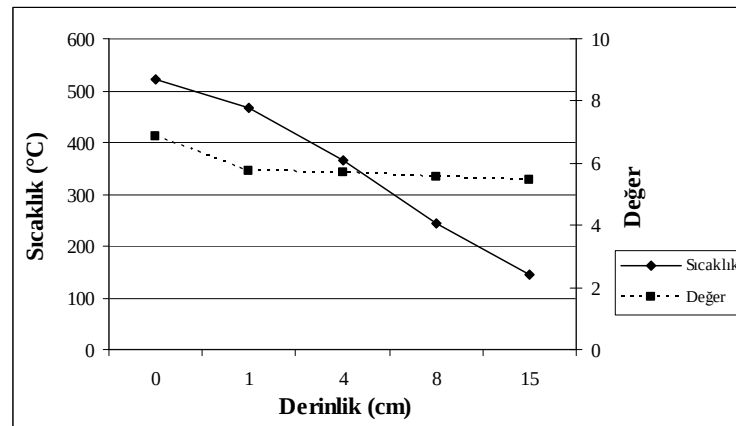
Ek Şekil 18 III. Grup katkısız seride sıcaklığın ve rengin (doymuşluk) derinlikle değişimi



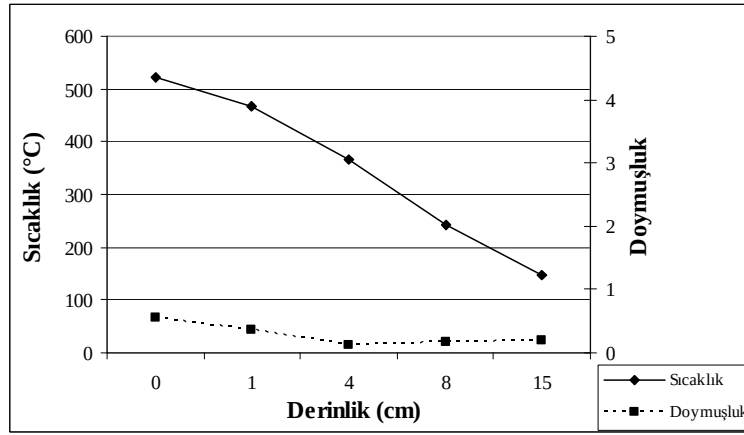
Ek Şekil 19 III. Grup silis dumanı katkılı seride sıcaklığın ve rengin (değer) derinlikle değişimi



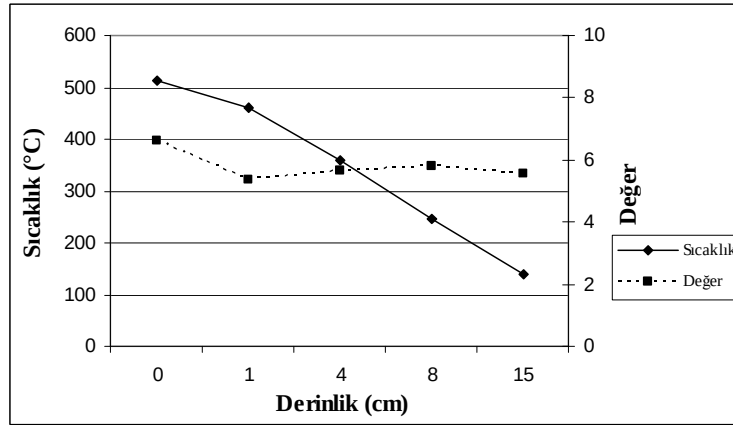
Ek Şekil 20 III. Grup silis dumanı katkılı seride sıcaklığın ve rengin (doymuşluk) derinlikle değişimi



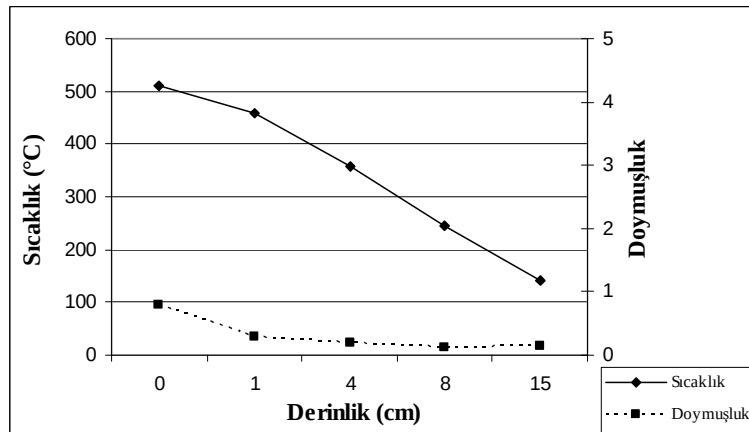
Ek Şekil 21 III. Grup cüruf katkılı seride sıcaklığın ve rengin (değer) derinlikle değişimi



Ek Şekil 22 III. Grup cüruf katkılı seride sıcaklığın ve rengin (doymuşluk) derinlikle değişimi



Ek Şekil 23 III. Grup uçucu kül katkılı seride sıcaklığın ve rengin (değer) derinlikle değişimi



Ek Şekil 24 III. Grup uçucu kül katkılı seride sıcaklığın ve rengin (doymuşluk) derinlikle değişimi

ÖZGEÇMİŞ

Doğum tarihi	01.01.1978	
Doğum yeri	İstanbul	
Lise	1991-1994	Ankara Anıttepe Lisesi
Lisans	1995-2000	Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Fak. İnşaat Mühendisliği Bölümü
Yüksek Lisans	2000-2004	Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Müh. Anabilim Dalı, Yapı Programı
Doktora	2004-2010	Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Müh. Anabilim Dalı, Yapı Programı
Çalıştığı kurum	2001-Devam ediyor	YTÜ İnş. Fak. İnş. Müh. Böl. Araştırma Görevlisi