

**YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**YÜKSEK SICAKLIK ETKİSİNDE
BETON DAVRANIŞI**

İnşaat Müh. Nesil MAHSANLAR

**FBE İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı Yapı Programında
Hazırlanan**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Tez Danışmanı : Doç.Dr. Nabi YÜZER (YTÜ)

İSTANBUL, 2006

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
SİMGE LİSTESİ	iv
KISALTMA LİSTESİ	v
ŞEKİL LİSTESİ	vi
ÇİZELGE LİSTESİ	viii
ÖNSÖZ.....	ix
ÖZET	x
ABSTRACT	xi
1. GİRİŞ.....	1
2. GENEL BİLGİ.....	2
2.1 Yüksek Sıcaklık Kaynakları	2
2.1.1 Yangın.....	2
2.1.2 Endüstri Fırın Bacaları.....	3
2.1.3 Hava Alanı Pistleri.....	3
2.1.4 Nükleer Reaktörler.....	3
2.2 Yüksek Sıcaklığın Betonarme Elemanlara Etkileri	4
2.2.1 Yüksek Sıcaklığın Betonarme Çeliğine Etkileri.....	5
2.2.2 Yüksek Sıcaklığın Betona Etkileri.....	6
2.2.2.1 Çimento Hamuru	7
2.2.2.2 Agrega.....	11
2.2.2.3 Mineral Katkı Malzemeleri.....	12
2.2.2.4 Liflerin Etkisi.....	13
2.2.3 Yüksek Sıcaklığın Betonun Fiziksel Özelliklerine Etkileri.....	15
2.2.3.1 Isı Yayımlı Katsayısı	16
2.2.3.2 Isı İletim Katsayısı	17
2.2.3.3 Genleşme Katsayısı	17
2.2.3.4 Özgül Isı.....	17
2.2.3.5 Isı Şoku Parametresi	18
2.2.3.6 Birim Hacim Ağırlığı.....	18
2.2.3.7 Renk.....	19
2.2.4 Yüksek Sıcaklığın Betonun Mekanik Özelliklerine Etkileri	27
2.2.4.1 Basınç Dayanımı.....	28
2.2.4.2 Çekme Dayanımı	29
2.2.4.3 Elastisite Modülü	30
3. DENEYSEL ÇALIŞMA.....	32
3.1 Numune Üretiminde Kullanılan Malzemeler	32

3.1.1	Agrega.....	32
3.1.2	Çimento.....	33
3.1.3	Mineral Katkı.....	33
3.1.4	Kimyasal Katkı	34
3.2	Numune Üretimi	34
3.3	Isıtma-Soğutma Süreci.....	35
3.4	Kontrol Deneyleri	36
3.4.1	Renk Ölçümü	36
3.4.2	Ultrases Geçiş Hızının Belirlenmesi.....	37
3.4.3	Yarmada Çekme Deneyi.....	37
3.4.4	Basınç Deneyi.....	37
3.4.5	Birim Ağırlık ve Hacimce Su Emme.....	38
4.	DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ ve İRDELENMESİ.....	39
4.1	Renk Değişiminin Değerlendirilmesi ve İrdelenmesi.....	39
4.1.1	Yüzey Renginin Değerlendirilmesi ve İrdelenmesi.....	39
4.1.2	Derinliğe Bağlı Renk Değişiminin Değerlendirilmesi ve İrdelenmesi.....	42
4.2	Ultrases Geçiş Değerlerinin Değerlendirilmesi ve İrdelenmesi	44
4.3	Çekme Dayanımının Değerlendirilmesi ve İrdelenmesi.....	45
4.4	Basınç Dayanımının Değerlendirilmesi ve İrdelenmesi	46
4.5	Birim Ağırlık ve Su Emme Deneylerinin Sonuçlarının Değerlendirilmesi ve İrdelenmesi	48
5.	BASINÇ DAYANIMI-RENK DEĞİŞİMİ İLİŞKİSİNİN ARAŞTIRILMASI.....	50
6.	SONUÇLAR.....	53
	KAYNAKLAR.....	55
	EKLER 60	
	ÖZGEÇMİŞ.....	65

SİMGE LİSTESİ

β	Birim ağırlık
C	Rengin doymuşluk bileşeni
f_{teo}	Teorik basınç dayanımı
H	Rengin tür bileşeni
K	Kılcal su emme katsayısı
V	Rengin değer bileşeni
V_s	Ultrases geçiş hızı

KISALTMA LİSTESİ

ASTM	American Society For Testing Materials
BS	British Standards
TS	Türk Standartları

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 Standart Sıcaklık-Zaman Eğrisi (TS 1263, 1983)	3
Şekil 2.2 Soğuk işlem görmüş çeliğin aderans gerilmesi-sıyrılma ilişkisi (Diederichs ve Schneider, 1981)	5
Şekil 2.3 Farklı tür yapı çeliklerinin akma ve çekme dayanımları (Baradan vd., 2002)	5
Şekil 2.4 380 mm boyutlu kare kolonda sıcaklık dağılımı (Andrade vd., 2003a)	7
Şekil 2.5 Boşluk suyu transferi (Andrade vd., 2003b)	8
Şekil 2.6 Doygun buhar basıncı ile sıcaklık arasındaki ilişki (Khoury vd., 2003)	9
Şekil 2.7 Yüksek sıcaklığa maruz kalan çimento hamurunun termogravimetrik eğrileri (Alarcon- Ruiz vd., 2005)	10
Şekil 2.8 Çimento pastasındaki tobermoritin (CSH) sıcaklığa bağlı olarak dönüşüm (dehidratasyon) derece ve oranı (Scherefller vd., 2003)	11
Şekil 2.9 Betonun bağıl basınç dayanımının kullanılan agrega türüne göre sıcaklıkla değişimi (Khoury, 1992)	12
Şekil 2.10 Polipropilen lif içeriğine bağlı porozite değişimi (Alonso vd., 2003a)	14
Şekil 2.11 Yangın hasarı görmüş betonun izotermine bağlı özellikleri (Riley, 1991)	15
Şekil 2.12 Betonda sıcaklık deformasyon ilişkisi (Papayianni vd., 2005)	16
Şekil 2.13 Çeşitli betonlar için α ısı yayılım katsayısı (CEB, 1991)	17
Şekil 2.14 Ağırlık kaybının sıcaklıkla değişimi (Anderberg, 2003)	19
Şekil 2.15 Silis esaslı agrega ile üretilen betonda basınç dayanımı renk ilişkisi (Andrade vd., 2003a)	20
Şekil 2.16 Betonda sıcaklığa bağlı dayanım kaybı renk değişimi (Baradan vd., 2002)	21
Şekil 2.17 Farklı ışıkların tayf eğrileri (Sirel, 1974)	22
Şekil 2.18 Yüzeylerin tayfsal yansıtma çarpanı eğrileri (Sirel, 1974)	23
Şekil 2.19 Mor yüzeyin farklı ışıklardaki tayf eğrileri (Sirel, 1974)	23
Şekil 2.20 Rengin üç bileşeni (ASTM D 1535-68, 1974)	24
Şekil 2.21 Munsell Tür Çemberi (ASTM D 1535-68, 1974)	25
Şekil 2.22 Basınç dayanımının sıcaklıkla değişimi (Yüzer vd., 2001)	25
Şekil 2.23 Rengin tür bileşeninin sıcaklıkla değişimi (Yüzer vd., 2001)	26
Şekil 2.24 Yüzeyden itibaren sıcaklığın derinlikle değişimi (Short vd., 2001)	26
Şekil 2.25 Yüksek sıcaklık etkisindeki betonun yüzey renginin derinlikle değişimi (Short, 2001)	27
Şekil 2.26 Betonun basınç dayanımının yükleme durumuna göre sıcaklıkla değişimi (Neville, 2000)	28
Şekil 2.27 Basınç dayanımının soğutma şekline göre sıcaklıkla değişimi (Neville, 2000)	29
Şekil 2.28 Puzolan katkılı ve katkısız betonların çekme dayanımının sıcaklıkla değişimi (Guise vd., 1996)	30
Şekil 2.29 Eğilme dayanımının sıcaklıkla değişimi (Aköz vd., 1995)	30
Şekil 2.30 Betonun elastisite modülünün sıcaklıkla değişimi (Neville, 2000)	31
Şekil 2.31 Farklı beton numuneleri için sıcaklık- elastisite modülü ilişkisi (Savva vd., 2005)	31
Şekil 3.1 Agrega granülometri eğrisi	33
Şekil 3.2 Havada soğutma	47
Şekil 3.3 Suda soğutma	35
Şekil 3.4 Derinliğe bağlı renk analizi	36
Şekil 3.5 Ultrasonik yöntem ile ses geçiş süresinin belirlenmesi	37
Şekil 4.1 1200 °C sıcaklığa maruz kalan numuneler	39
Şekil 4.2 Beton numunelerin renk değişimi (TÜR)-sıcaklık ilişkisi	40
Şekil 4.3 Beton numunelerin renk değişimi (DEĞER)-sıcaklık ilişkisi	41

Şekil 4.4 Beton numunelerin renk değişimi (DOYMUŞLUK)-sıcaklık ilişkisi.....	42
Şekil 4.5 Betonda renk (TÜR) değişimi-derinlik ilişkisi.....	43
Şekil 4.6 Betonda renk (DEĞER) değişimi-derinlik ilişkisi	43
Şekil 4.7 Betonda renk (DOYMUŞLUK) değişimi-derinlik ilişkisi	43
Şekil 4.8 Beton numunelerin bağıl ses geçiş hızı-sıcaklık ilişkisi.....	44
Şekil 4.9 Yüksek sıcaklık etkisindeki harcın boşluk yapısının değişimi (Alonso vd., 2003a).	45
Şekil 4.10 Beton numunelerde çekme dayanımı-sıcaklık ilişkisi.....	46
Şekil 4.11 Beton numunelerde basınç dayanımı-sıcaklık ilişkisi.....	47
Şekil 4.12 Beton numunelerin birim ağırlık-sıcaklık ilişkisi.....	48
Şekil 4.13 Beton numunelerin hacimce su emme-sıcaklık ilişkisi	49
Şekil 5.1 Betonda basınç dayanımı-sıcaklık ilişkisi	50
Şekil 5.2 Betonda renk değişimi (TÜR)-sıcaklık ilişkisi.....	51
Şekil 5.3 Betonda renk değişimi (DEĞER)-sıcaklık ilişkisi	51
Şekil 5.4 Betonda renk değişimi (DOYMUŞLUK)-sıcaklık ilişkisi	51

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1 Bazı minerallerin yüksek sıcaklıkta renk değişimleri (Uz, 1994).....	20
Çizelge 3.1 Numune grupları.....	32
Çizelge 3.2 Agregaların fiziksel özellikleri	33
Çizelge 3.3 Kullanılan malzemelerin kimyasal analizi ve fiziksel özellikleri	34
Çizelge 3.4 Beton üretiminde kullanılan gerçek malzeme miktarları, taze beton birim ağırlığı ve çökme miktarları	35
Çizelge 4.1 Rengin türündeki değişimin büyüklüğü	40
Çizelge 4.2 Rengin değerindeki değişimin büyüklüğü.....	41
Çizelge 4.3 Rengin doymuşluğundaki değişimin büyüklüğü.....	42

ÖNSÖZ

Yıldız Teknik Üniversitesi Yapı Malzemeleri Anabilim Dalında yaptığım çalışma kapsamında yüksek sıcaklığın betonun mekanik ve fiziksel özelliklerine etkileri incelenmiş, basınç dayanımı ile renk değişimi arasındaki ilişki araştırılmıştır.

Bu araştırmanın yapılmasında çalışmanın yürütücülüğünü üstlenerek, her zaman ilgi ve desteğini gördüğüm Sayın Doç.Dr. Nabi Yüzer'e, konu ile ilgili bilgi ve deneyimlerinden yararlandığım Sayın Prof.Dr. Fevziye Aköz'e, "Yangına Maruz Kalan Yapılarda Beton Basınç Dayanımı-Renk Değişimi İlişkisinin Araştırılması" başlıklı araştırma projesini destekleyen TÜBİTAK'a, deneysel çalışmalarında kullanmak üzere bazı malzemeleri temin eden Akçansa, Sika ve Yks'ye, ayrıca Araş.Gör. Özgür Çakır'a, Araş.Gör. Nihat Kabay'a, Araş.Gör. Ahmet Beşer Kızılkant'a ve Tek. Halil Yavaşçı'ya, çalışmalarım süresince beni destekleyen aileme 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 ve mekanik özelliklerine etkileri deneysel olarak araştırılmıştır. Bu amaçla CEM I 42.5 R çimentosu, silis esaslı agregalar ve %10 ikameli olarak katılan silis dumanı, uçucu kül, cüruf gibi farklı puzolanlar kullanılarak üretilen betonlar 100, 200, 300, 600, 900 ve 1200°C gibi farklı sıcaklıklara maruz bırakılmış, soğutma işlemi havada ve suda olmak üzere iki grupta gerçekleştirilmiştir. Oda sıcaklığına kadar soğutulan numunelerde kontrol deneyleri yapılmış, aynı numunelerde rengin bileşenleri olan tür, değer ve doymuşluk, tayfsal ışık ölçer ile sayısal olarak belirlenmiştir.

Deney sonuçlarından, yüksek sıcaklık etkisinde kalan betonun basınç dayanımında meydana gelen değişim ile, rengin tür bileşeninde meydana gelen değişimin paralellik gösterdiği tespit edilmiştir. Betonun basınç dayanımı değişimi ile renk değişimi arasında ilişki kurulmuştur. Bu ilişkiden yararlanılarak yüksek sıcaklık etkisine maruz kalan yapılarda renk ölçümü yapılarak elemanın maruz kaldığı sıcaklık derecesi ve basınç dayanımında meydana gelen kayıplar hakkında fikir edinilebileceği kanısına varılmıştır.

Anahtar kelimeler: Basınç dayanımı, beton, puzolan, renk, yüksek sıcaklık.

ABSTRACT

The physical and mechanical properties of reinforced concrete structures change if they are exposed to high temperatures. The changes in the properties of the reinforced concrete causes cracks and spalls which weakens the bonds between the bar and the concrete. Therefore, before deciding whether structures exposed to high temperatures should be repaired or demolished, their final state should be carefully examined.

In this study, the effects of temperature and cooling regimes on the physical and mechanical properties of the concrete were observed. The concrete production was made with CEM I 42,5 R cement, siliceous aggregates, silica fume, fly ash and slag. Mineral admixtures replaced 10 % cement by weight. These concretes were exposed to 100, 200, 300, 600, 900 and 1200 °C. Samples cooled to the room temperature in water and in air. Control tests were applied on these samples and Munsell Color System components hue, value and chroma were measured by spectrophotometer.

Test results showed similarities in the change of compressive strength and color of concrete which exposed to high temperature. A relationship is established between compressive strength and the color change of concrete. This relationship is expected to show us residual strength of the concrete and the temperature that it was exposed to, based on the color measurements taken from the concrete structure.

Keywords: Compressive strength, concrete, pozzolan, color, high temperature

1. GİRİŞ

Yapılarda durabilite problemine yol açan başlıca fiziksel etkilerden biri de yüksek sıcaklıktır. Bu etki yapılarda kalıcı hasarlar oluşturarak yapının servis dışı kalmasına, can ve mal kaybına neden olabilmektedir (Aydın vd., 2003). 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, 2003c, Schrefler vd. 2002, Baradan vd., 2002).

Yüksek sıcaklığın kaynaklarından biri olan yangının betona ve betonarme yapılara etkisi 1922’den günümüze kadar araştırılmaktadır. Yapılan araştırmalarda yangın sırasında ve sonrasında malzemenin karmaşık davranışı, yapısal güvenlik ve yapının bütünlüğü anlaşılmaya çalışılmıştır (Khoury, 2000). 10 yıl öncesine kadarki çalışmalarda yüksek sıcaklığın normal dayanımlı betona etkileri üzerinde odaklanılmıştı (Khoury, 2003c). 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).

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 laboratuarda tahribatlı ve tahribatsız deneyler yapılmalıdır. Yerinde yapılan ilk inceleme görsel incelemedir, bu aşamada betonda çatlakların, dağılmaların, renk değişiminin olup olmadığı araştırılır (Guise vd., 1996).

Bu çalışmanın birinci bölümünde yüksek sıcaklığın betonun fiziksel ve mekanik özelliklerine etkileri ele alınmış, ikinci bölümde ise yüksek sıcaklık etkisi, farklı betonlar ve sıcaklıklar için deneysel olarak araştırılmıştır. Üçüncü bölümde yapılan deneylerden elde edilen sonuçlar değerlendirilmiş ve irdelenmiştir. Dördüncü bölümde betonun basınç dayanımı değişimi ile renk değişimi arasında ilişki kurulmuştur.

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 görülen sıcaklık ve hava alanı pistlerinde sürtünmenin sebep olduğu ısınma ve nükleer reaktörler olarak gösterilebilir (Aköz ve Yüzer, 1994; Sakr vd., 2005). Bu etkiler aşağıda sırası ile açıklanmıştır.

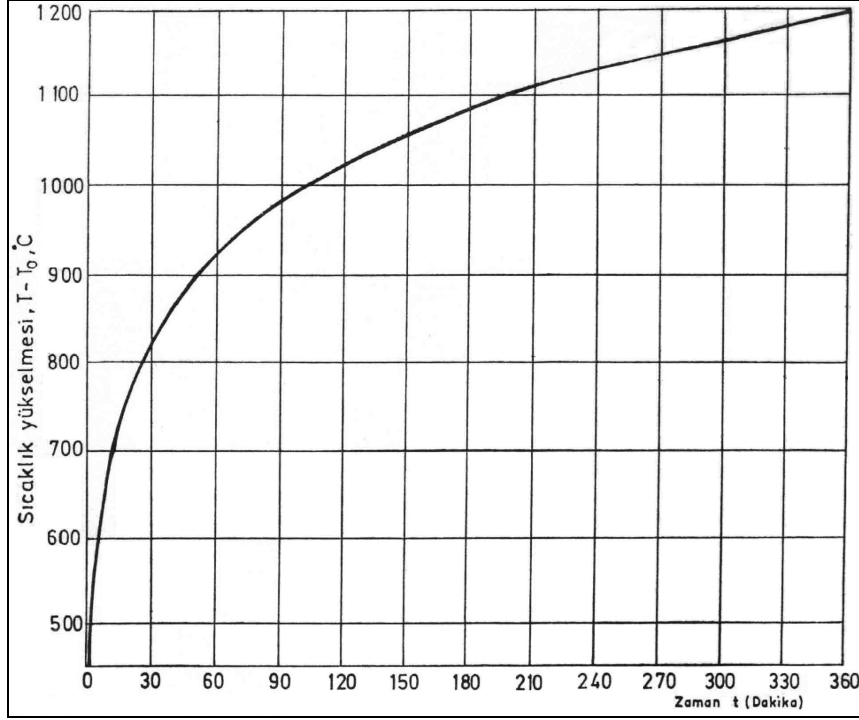
2.1.1 Yangın

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 600 °C’ye hızla yükseldiği ve yangın süresince de 1200°C’ye ulaşabileceği görülmektedir, ISO-834 yangın eğrisi olarak tanımlanan bu eğri (2.1) bağıntısı ile ifade edilmektedir (TS 1263, 1983).

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

Denklemden, t yangın süresini (dakika), T_0 başlangıç sıcaklığını (20 °C), T yangın esnasında erişilen ortalama yangın gazı sıcaklığını (°C) göstermektedir (Haksever, 1991). Deneysel çalışmalarda kullanılacak fırının ısınma hızının bu bağıntıya uygunluğu şartı aranmaktadır (TS 1263, 1983).



Şekil 2.1 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 nedeniyle, reaktörü koruyan beton yüksek sıcaklığa maruz kalır. Radyasyon, koruyucu betona önemli zarar vermez ancak beton sıcaklık nedeniyle daha zayıf hale gelir ve nötron baskısına karşı etkisi azalır. Hızlı nötron ve gama ışınları

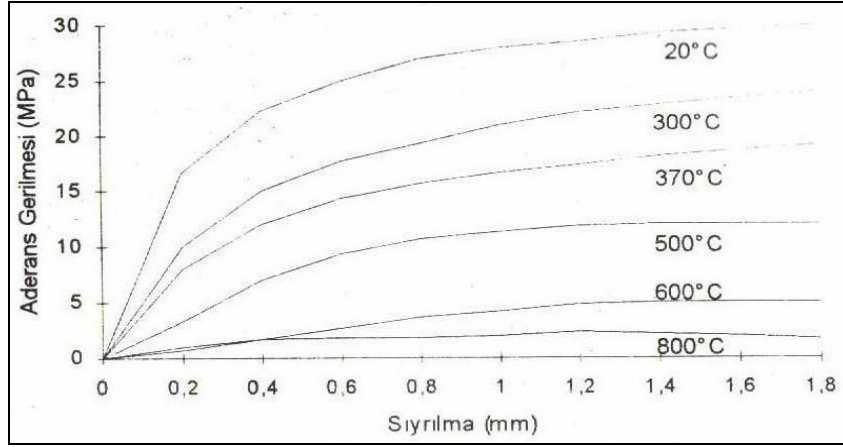
yavaşlatılırken reaktör çekirdeğinden açığa çıkan enerji, koruyucu malzemede tutulur ve ısı şeklinde salıverilir. Bu ısı özellikle reaktör çekirdeğine yakın bölgeleri etkiler. Sodyum yakma havuzlarının etkisi ile tipik bir sodyum-beton reaksiyonu 400°C’de başlar ve yarım saat sonra sıcaklık 800 °C’den 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). Betonarme veya betonarme-çelik kompozit elemanların yangına karşı 2 saat dayanabilmesi için, içindeki çelik profil veya donatının en dışta kalan kısımlarının en az 4 cm kalınlığında beton (pas payı) ile kaplanmış olması gerekmektedir (Binaların Yangından Korunması Hakkında Yönetmelik, 2002).

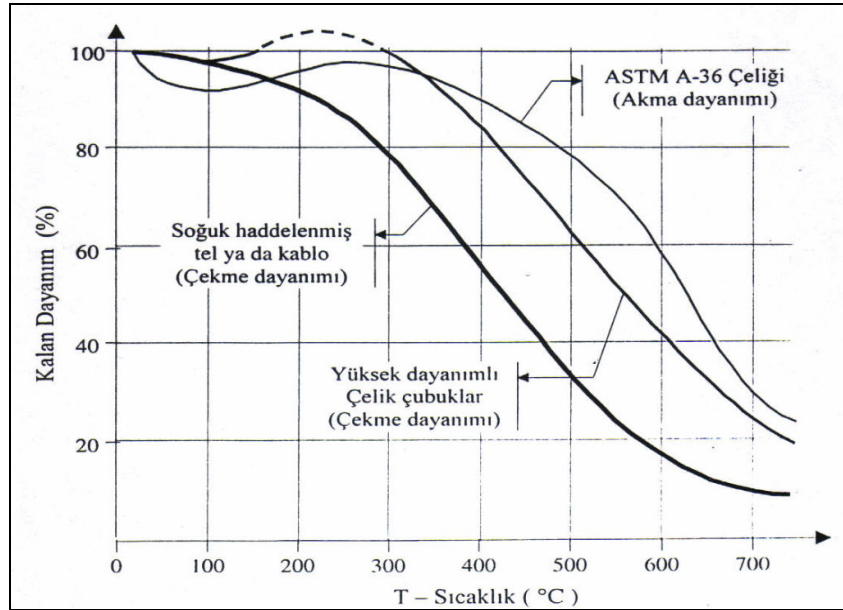
Yapılan deneysel çalışmalar, yüksek sıcaklığa maruz betonarme elemanların aderans dayanımının azaldığını ve betonarme yapıların yüksek sıcaklığa karşı davranışını belirlemedeki temel değişkenin aderans dayanımı olduğunu ortaya koymaktadır. Çünkü kritik beton sıcaklıkları, her zaman kritik aderans sıcaklığından 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 aderansda belirgin bir düşüş gözlenmiştir (Şekil 2.2). Çeliğin düz veya nervürlü olması da aderansa etki etmektedir (Chiang ve Tsai, 2003; Diederichs ve Schneider, 1981).



Şekil 2.2 Soğuk işlem görmüş çeliğin aderans gerilmesi-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 2.3'te verilmiştir.



Şekil 2.3 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., 2003b).

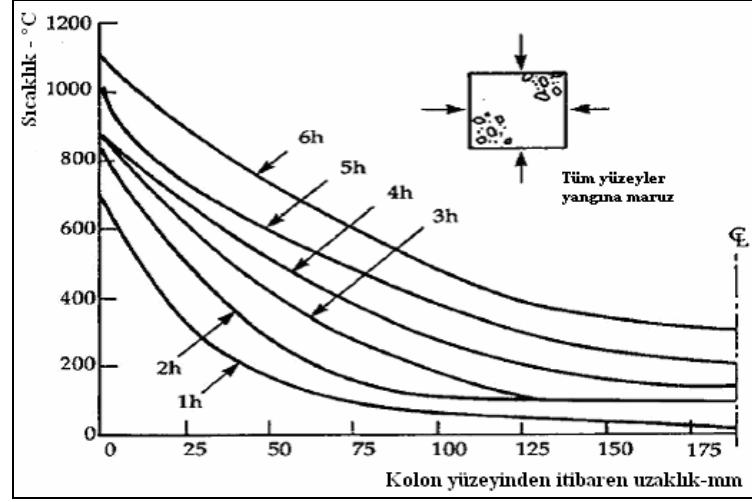
2.2.2 Yüksek Sıcaklığın Betona Etkileri

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 etkisinde oluşan parça atmalar, yapı elemanının yük taşıma kapasitesini ve bütünlüğünü kaybetmesine neden olur. Parça atmalar sonucu donatılar yüksek sıcaklığa maruz kalırlar. Polipropilen lif ve hava sürükleyici kullanılması parça atma riskini azaltır. Hava sürükleyicileri nem içeriğini ve boşlukların miktarını artırarak boşluk basıncını düşürür. Parça atmaları azaltmak için termal bariyerler, polipropilen lifler, hava sürükleyici, büyük boyutlu elemanlar ve düşük termal genleşmeye sahip agregalar kullanmak gerekir (Khoury, 2003a).

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). Nispeten büyük boyutlu beton elemanları, davranışlarında yapının son durumunu önemli derecede etkileyen iyi bir eğilim gösterirler. Bu nedenle, betonda mikroyapısal değişiklikler göz önünde tutulduğunda 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 2.4'te kare bir kolonda farklı zamanlarda sıcaklık değişimi görülmektedir. Dıştan içe doğru oluşan sıcaklık değişimi zamanın bir sonucudur (Andrade vd., 2003a).

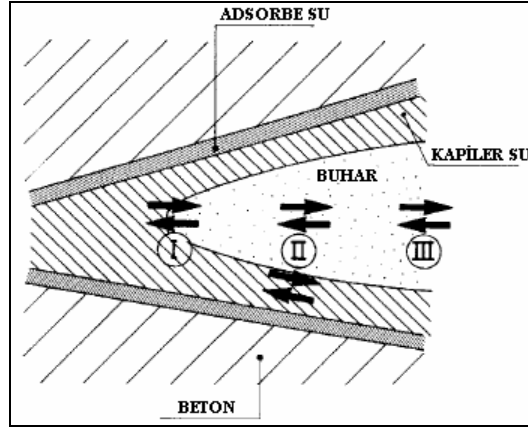


Şekil 2.4 380 mm boyutlu kare kolonda sıcaklık dağılımı (Andrade vd., 2003a)

Beton, farklı termal karakteristiklere sahip bileşenleri, nem ve poroziteden dolayı yüksek sıcaklık karşısında karmaşık bir davranış sergiler (Li vd., 2004). Bu nedenle betonun yüksek sıcaklık etkisindeki davranışı, çimento hamuru, 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 2.5'te basitleştirilmiş boşluk suyu transferi görülmektedir. I suyun buharlaşması veya yoğuşması, II betonun içine suyun transferi, III ise suyun dış çevreye transferini temsil etmektedir (Andrade vd., 2003b).

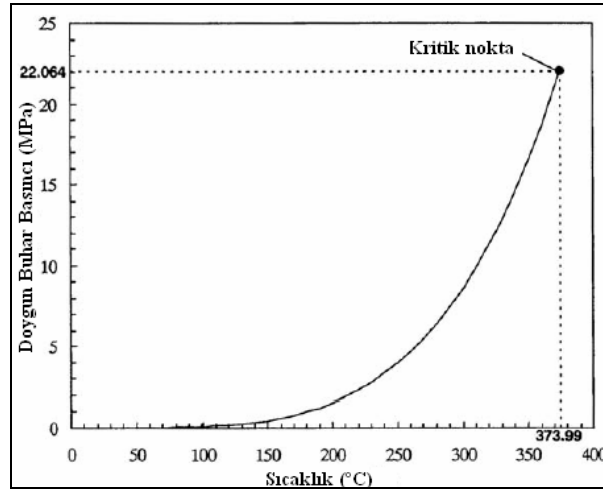


Şekil 2.5 Boşluk suyu transferi (Andrade vd., 2003b)

Bilindiği gibi betonun basınç dayanımı ile porozitesi arasında ilişki bulunmaktadır. Betonun porozitesi arttıkça basınç dayanımı azalır (Vodak vd., 2004). Beton bünyesinde boşluklar, CSH jeli boşlukları, kapiler boşluklar ve hava boşlukları olmak üzere üç farklı şekilde bulunmaktadır. Betonun katı fazları çimento hamuru ve agregalar, yüksek sıcaklığa maruz kaldığında gözenek yapısını etkiler. Katı fazlarda meydana gelen fiziksel ve kimyasal değişiklikler toplam porozitede ve gözenek boyutunun dağılımında değişikliklere neden olur. Genellikle, sertleşmiş çimento hamuru 20-200 °C civarında genişir. 200 °C'nin üstünde farklı yoğunlukların etkisiyle büzülür, bu sırada da agregalar genişir. Bütün bu değişiklikler gözenek boyutunu büyütür (Alonso vd., 2003a). 500 °C'ye kadar kapiler ve jel suyunun ayrılması toplam boşluk hacminde önemli bir artışa neden olur (Haddad vd., 2004). 600 °C'ye kadar toplam boşluk hacmi artar. Bu artış beklenenden fazladır ve ağırlık kaybıyla benzerlik gösterir. Bunun nedeni büzülen arabölme duvarlar ve oluşan mikroçatlaklar olabilir. Yüksek sıcaklıklarda küçük boşlukların oranı azalır, bu da 900 °C'nin üzerindeki sıcaklıklarda sinterleşmeye neden olabilir (Alonso vd., 2003a).

Yüksek termal gerilmelere maruz kalmış betonlarda çatlak oluşumunun birçok nedeni vardır. Çimento hamurundaki başlangıç mikroçatlakların mevcudiyeti, sertleşirken oluşan 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 mikroçatlaklarda bu sıcaklıkta gelişir. 300 °C civarında çimento fazını geçerler ve agregaları çevrelerler. Sıcaklık 500 °C'nin üzerindeyken, çatlaklar çimento hamurunda gelişir, boyutları 0,01mm'den büyüktür. Ayrıca agregaları çatlatırlar, bunların boyutları ise 0,05 mm'den büyüktür ve artık çatlaklar gözle görülebilir (Alonso vd., 2003a).

Beton bünyesinde su üç farklı şekilde bulunmaktadır. Bunlar, jel yapılı çimento hamurundaki kalsiyum silikat hidratenin (CSH) katı öğelerini birbirine bağlayan adsorpsiyon suyu, hidratlardaki kimyasal bağlı su ve kılcal boşluklarda serbest sudur. Çimento türüne ve üretim sırasındaki su/çimento oranına bağlı olarak, betonda hacminin %4'ü kadar bulunabilen serbest su 100 °C'de, kimyasal bağlı su ise 300 °C 'de buharlaşmaktadır. Sıcaklık etkisi ile bu mertebedeki suyun kaybı ile oluşacak büzülme ve beton içinde oluşan buhar basıncı, donatı beton örtüsünün çatlamasına ve parçalanarak kopmasına neden olur. Beton örtünün tahrip olması sonucu donatı daha yangının başlangıcında sıcak gazla temasa geçer (Akman, 2000). Şekil 2.6'da boşluk suyu basıncı ile sıcaklık arasındaki ilişki görülmektedir. 373,99 °C'de 22,64 MPa kritik su basıncı oluşmaktadır. Kritik noktanın üstünde su buhar halinde, altında ise sıvı halinde kabul edilir (Khoury vd., 2003).



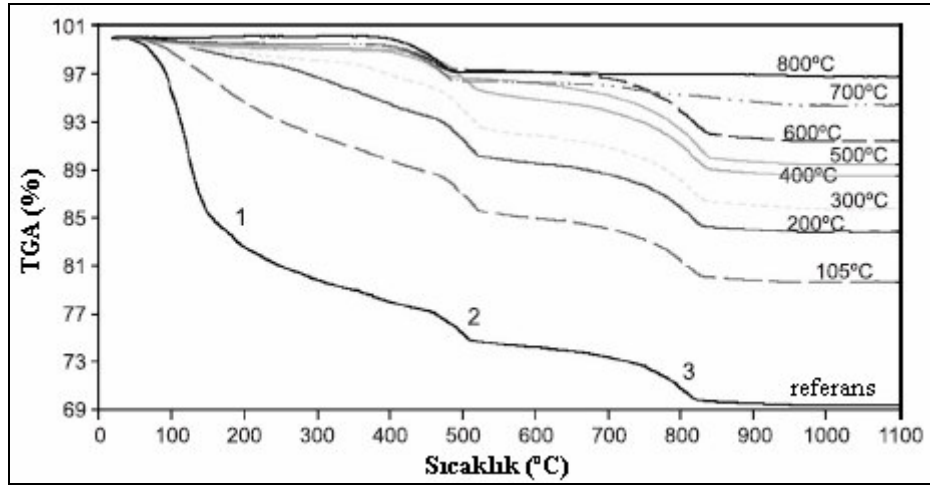
Şekil 2.6 Doygun buhar basıncı ile sıcaklık arasındaki ilişki (Khoury vd., 2003)

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

Çimento hamuru %70-80 tabakalı CSH jeli, %20 Ca(OH)_2 ve diğer kimyasal bileşenlerden oluşur (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

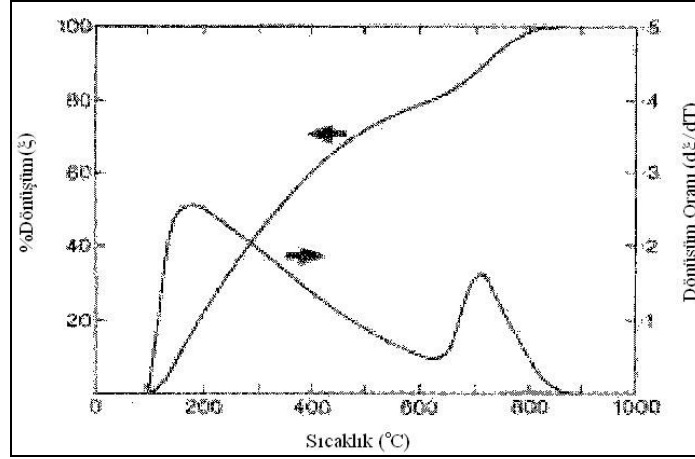
değişimleri sonucu bünyede çatlaklar oluşur, beton ufalanır, boşluklu bir yapıya dönüşür. Ca(OH)_2 'nin boşluklardan süzülmesi yangın sonrasında yüzeyde beyaz lekeler oluşturur. Bu lekelerin varlığı yangında sıcaklığın 530°C 'nin üzerine çıktığının kanıtıdır. Yüksek fırın curufu ve alüminli çimentolarla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

Şekil 2.7'de görülen Alarcon-Ruiz vd. (2005) tarafından yapılan termogravimetrik analizde üç önemli ağırlık kaybı görülmektedir. İlk ağırlık kaybı $100-200^\circ\text{C}$ arasında CSH, karboalüminatlar ve etrenjit gibi birçok hidratin dehidrasyonu, ikinci ağırlık kaybı $450-550^\circ\text{C}$ arasında portlanditin dehidroksilasyonu ve üçüncü ağırlık kaybı ise $750-850^\circ\text{C}$ arasında klinker ve filler malzemeden gelen kalsiyum karbonatın dekarbonasyonu ile oluşur. Dehidroksilasyon ve dekarbonasyon reaksiyonları birbirleriyle ilişkilidir. $700-800^\circ\text{C}$ 'nin üstünde portlandit artarken dekarbonasyon reaksiyonları azalır. Bunun ana nedeni portlanditin fırın içinde soğurken yeniden kristalleşmesidir.



Şekil 2.7 Yüksek sıcaklığa maruz kalan çimento hamurunun termogravimetrik eğrileri (Alarcon- Ruiz vd., 2005)

Ca(OH)_2 'in CaO ve H_2O 'ya dönüşümü 500°C civarında olurken, Şekil 2.8'de görüldüğü gibi CSH'nin dehidratasyonu 110°C 'den itibaren başlamaktadır (Scherefler, 2003). Her iki olay da çimento pastasındaki katı madde miktarının azalmasına sebep olur.



Şekil 2.8 Çimento pastasındaki tobermoritin (CSH) sıcaklığa bağlı olarak dönüşüm (dehidratasyon) derecesi ve oranı (Scherefller vd., 2003)

2.2.2.2 Agregalar

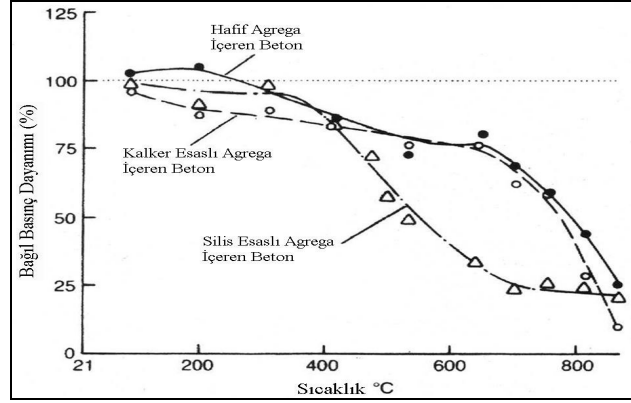
Agregalar betonda %60-80 arasında bir hacmi doldururlar. Özelliklerindeki farklılıklar ısıtma sırasında betonun termal genleşme katsayısı ve termal iletkenliğini ve performansını önemli derecede etkiler (Alonso vd., 2003b). Agregaların yüksek sıcaklıkta betona etkisi mineral yapılarına bağlıdır ve yüksek sıcaklığa dayanıklı oldukları söylenebilir.

Silis esaslı agregalar için kritik sıcaklıklar 250 °C ile 575 °C 'ler arasındadır (Perkins, 1986). Yüksek sıcaklıklarda karbon bileşimi ayrışır ve 1200 °C'de erir (Haddad vd., 2004). Kumların büyük çoğunluğunu teşkil eden kuvarz, 575 °C'de yaklaşık %5,7'lik bir hacim artışı ve endotermik bir reaksiyonla α -kuvarzdan β - kuvarza dönüşür (Alonso vd., 2003b).

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

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

Khoury'nin (1992) yapmış olduğu bir derlemede Abrams'ın çalışmasına yer verilmiş ve bu çalışmada üç farklı tür agreganın kullanıldığı beton numunelere yüksek sıcaklık etkisi araştırılmıştır. Çalışmada 600 °C'ye kadar ısıtılan kalker esaslı ve hafif agregalı betonların basınç dayanımlarının silis esaslı agregalara göre daha yüksek olduğunun gözlemlendiği belirtilmiştir (Şekil 2.9).



Şekil 2.9 Betonun bağıl basınç dayanımının kullanılan agregata 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, köpük cüruf ve genleştirilmiş kil ürünleri gibi hafif agregaların yangın dirençleri yüksektir. Hafif agregalardan üretilmiş betonların ısı iletkenliği düşüktür (Shoaib vd., 2001).

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

2.2.2.3 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 bir çok 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., 1999). Yüksek sıcaklık etkisinde puzolanlardan beklenen fayda, kalsiyum hidroksitleri tüketerek CSH oluşumuna katkıda bulunmalarıdır (Haddad vd., 2004).

Silis dumanı, uçucu kül ve curuf 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., 2004a). 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.

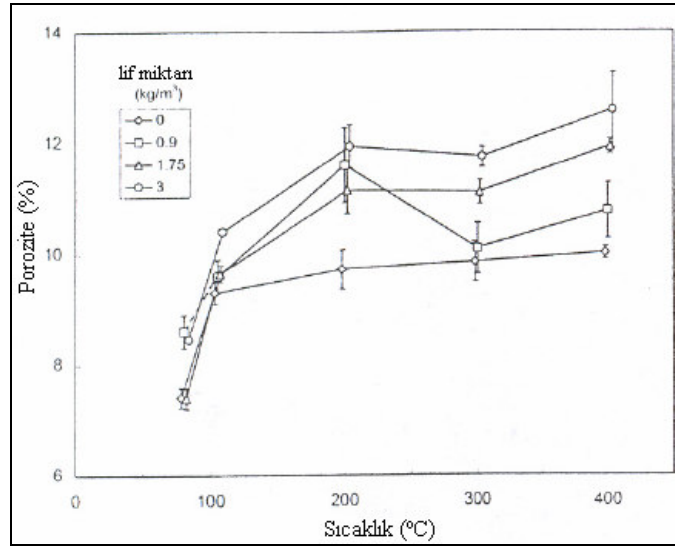
Uçucu kül, 121-149 °C'ler arasında, sıcaklığın ve basıncın etkisiyle CSH jelinden iki üç kat daha güçlü tobermorit jeli oluşturarak betonun basınç dayanımını %152 oranında arttırmaktadır. Yüksek fırın cürufu ise yüksek sıcaklıkta diğer puzolanlara göre en iyi performansı göstermektedir. Silis dumanı 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; Yeğinobalı, 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 iki 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 2.10'da porozitedeki artış polipropilen lif içeriğine bağlı olarak verilmiştir (Alonso vd., 2003a). Yangın sırasında yüksek sıcaklık etkisinde bu liflerin eriyerek su buharının sınır bölgelerden çıkabileceği, böylece yüzeylerdeki dökülmelerin engellenebileceği belirtilmektedir (Taşdemir vd., 2005).

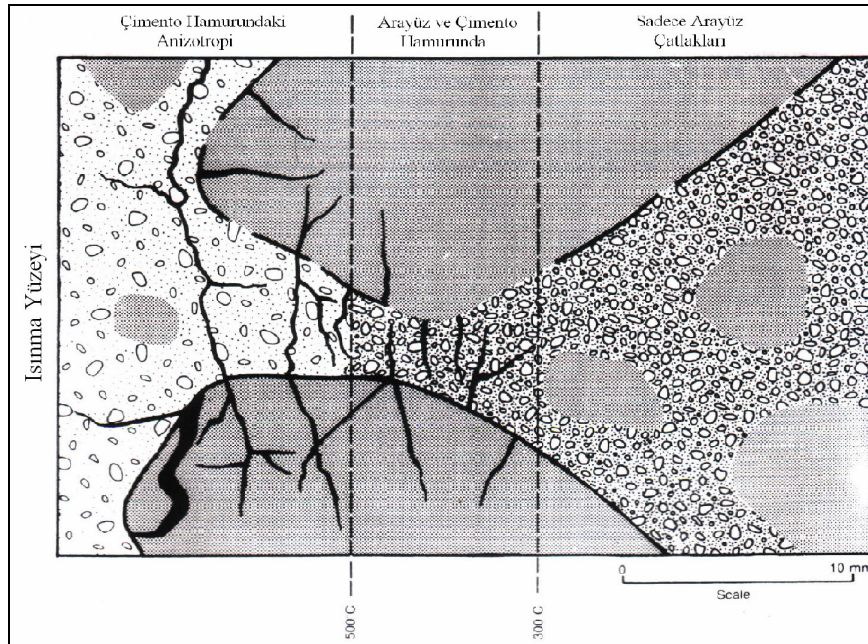


Şekil 2.10 Polipropilen lif içeriğine bağlı porozite değişimi (Alonso vd., 2003a)

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 (Alonso vd., 2003a). Ultra yüksek dayanımlı betonlarda yüksek sıcaklıklarda patlamaların azalmasını sağlarlar (Alonso vd., 2003b).

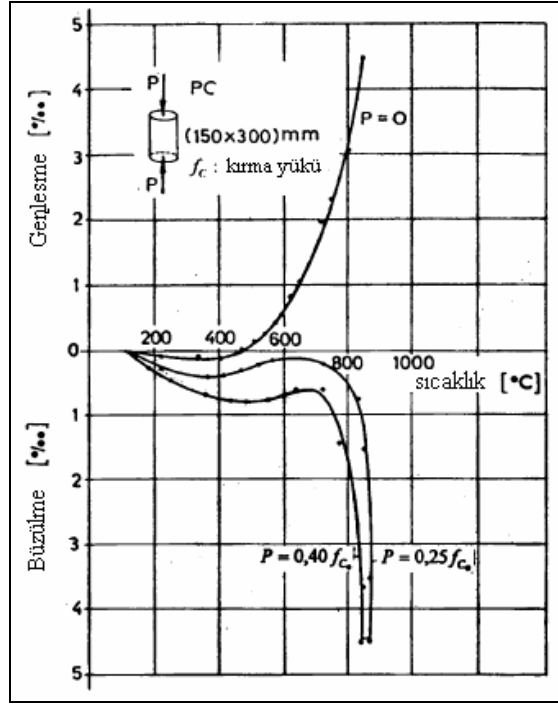
2.2.3 Yüksek Sıcaklığın Betonun Fiziksel Özelliklerine Etkileri

Yüksek sıcaklık, betonun ısı yayınımına, ısı iletkenliğine, ısıl genleşmesine, özgül ısısına, birim ağırlığına ve rengine etki eder. Bu fiziksel değişimler sırasında betonun mekanik özelliklerinde de değişiklikler meydana gelir. Beton yüksek sıcaklık etkisinde kalırsa, düşük ısı iletkenliğine sahip yüzey tabakasının oluşması ile ısı 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 2.11’de 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 2.11 Yangın hasarı görmüş betonun izotermine bağlı özellikleri (Riley, 1991)

Papayianni vd. (2005) tarafından Şekil 2.12’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.



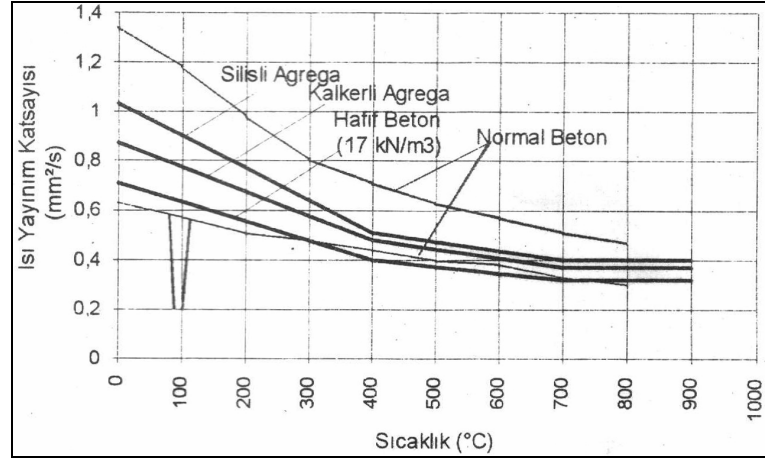
Şekil 2.12 Betonda sıcaklık deformasyon ilişkisi (Papayianni vd., 2005)

2.2.3.1 Isı Yayınlı Katsayısı

Yüksek sıcaklık etkisinin nedenlerinden biri olan yangından, ısı enerjisinin bir kısmı emilir. Emilen ısı sıcaklığın yükselmesine neden olur. Bu olayda ısı yayınlı katsayısı (a , mm^2/san) etkili olur. Isı yayınlı katsayısı, malzemenin ısı iletim katsayısına (λ , $\text{W}/\text{m}^\circ\text{C}$), özgül ısıya (c , $\text{KJ}/\text{kg}^\circ\text{C}$) ve birim ağırlığına (β , kg/m^3) bağılı olarak 2.2 bağıntısı ile hesaplanır (CEB, 1991).

$$a = \lambda / c \cdot \beta \quad (2.2)$$

Isı yayınlı katsayısı, Şekil 2.13'ten de görüldüğü gibi, sıcaklık arttıkça azalmaktadır. Bu azalma özellikle 100 °C civarında bünyedeki suyun buharlaşması nedeniyle daha belirgindir.



Şekil 2.13 Çeşitli betonlar için λ ısı yayılım katsayısı (CEB, 1991)

2.2.3.2 Isı İletim Katsayısı

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

2.2.3.3 Genleşme Katsayısı

Malzemelerin şekil değiştirmesini de etkileyen ısıya ilişkin bir diğer özelliği de ısıl genleşmesidir. Betonun genleşme katsayısı (α , $1/^\circ\text{C}$), üretimde kullanılan agregaların genleşmesine bağlıdır. Çimento hamurunun α 'sı ($11 \cdot 10^{-6}$ - $20 \cdot 10^{-6}$ $1/^\circ\text{C}$) ile agregalarınkinden büyüktür. Genleşme katsayısı en düşük olan doğal taş kalkerdir. Sıcaklık arttıkça α artmaktadır. Yüksek sıcaklıklarda termik genleşmelerdeki farklılıklardan dolayı oluşan gerilmeler çimento hamuru ile agrega arayüzünde çatlamalara neden olur (CEB, 1991; Postacıoğlu, 1987).

2.2.3.4 Özgül Isı

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

2.2.3.5 Isı Şoku Parametresi

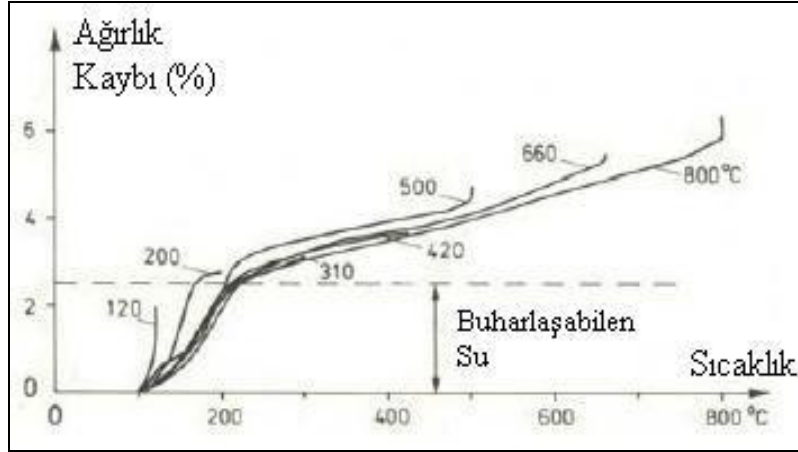
Gevrek malzemelerde sıcaklık değişimleri hızlı ve sıcaklık gradyanı yüksek ise büyük ısıl gerilmeler ve dolayısıyla çatlamlar oluşabilir. Isıl şoku denilen bu olay ısı iletimine ve ısıl genleşmeye büyük ölçüde bağlıdır. Isı iletimi yüksek ve ısıl genleşmesi küçük malzemelerde ısıl enerji hızla çevreye yayılır bu nedenle sıcaklık gradyanı düşük, boyut değişimleri az, dolayısıyla gerilmeler küçük olur. Malzemelerin ısı şokuna dayanıklılığını belirtmek için ısı şoku parametresi kullanılır. Isıl şoka dayanıklılık yüksek ısı iletimli ve yüksek çekme mukavemetlilerde büyük, ısıl genleşmesi ve elastisitesi büyük olanlarda ise küçük olur. Bu etkenlere bağlı olarak ısı şoku parametresi λ ısı iletim katsayısına, α ısıl genleşme katsayısına, σ_c malzemenin çekme mukavemetine ve E elastisite modülüne bağlı olarak 2.3 bağıntısı ile hesaplanır (Onaran, 2000).

$$P=\lambda\sigma_c/E\alpha \quad (2.3)$$

2.2.3.6 Birim Hacim Ağırlığı

Sıcaklığın artması ile boşluklardaki suyun buharlaşması sonucu ağırlık azalır, genleşme nedeniyle hacim artar (Aköz vd., 1995). Porozite ve su içeriği betonun yangından sonraki hasar kontrol parametreleridir (Andrade vd., 2003a). Isıtma sırasında betondaki ağırlık kaybı genellikle porozitenin artmasıyla sonuçlanır. Bu artış normal ve yüksek dayanımlı betonlar için yaklaşık lineer bir artıştır. Buna karşın ultra yüksek dayanımlı betonlar için bu geçerli değildir. Anhidrit çimento tanelerinin çokluğu ve kılcal boşlukların neredeyse olmaması buharın salıverilmesini zorlaştıran nedenlerdir, fakat ağırlık kaybının derecesi arttıkça porozite etkili bir şekilde artar (Alonso vd., 2003a). Ağırlık ve hacimdeki bu değişimler sonucu birim hacim ağırlığı (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 agrega ile üretilen betonda araştırmış, bu çalışma sonucunda ağırlık kaybının sıcaklıkla değişimi Şekil 2.14'te verilmiştir. Schneider ve Bazant yaptıkları çalışmada 1000 °C'ye kadar yoğunluğun %11-13 arasında azaldığını belirtmişlerdir (Anderberg, 2003).



Şekil 2.14 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., 2003a).

2.2.3.7 Renk

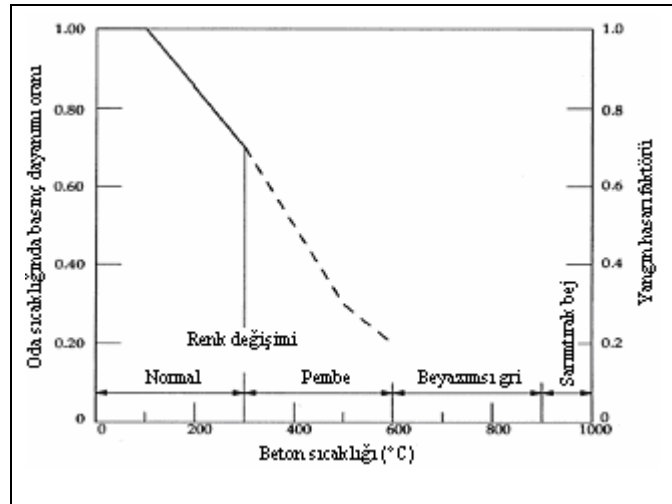
Yüksek sıcaklığın etkisinde kalan betonun renginde bazen önemli değişiklikler meydana geldiği, bu değişikliklere bakılarak kalker ve silis esaslı agregalı betonun maruz kaldığı maksimum sıcaklığın tahmin edilebildiği, özellikle silisli nehir agregaları ile üretilen betonlarda renk değişiminin belirgin 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 2.1'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 2.1 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 agrega ile üretilen betonlarda Şekil 2.15'te 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 gevrekler. Renkteki değişimin nedeni metal içeren bileşenlerdir ve betonun ulaştığı maksimum sıcaklığın ve denk yangın ömrünün belirlenmesinde kullanılabilir (Andrade vd., 2003a).



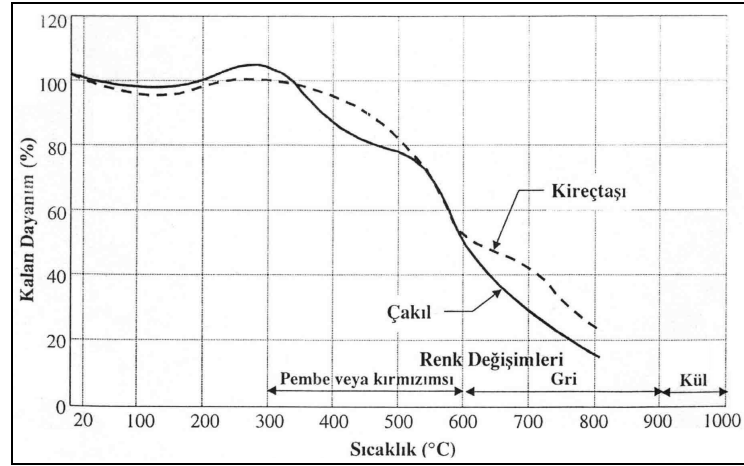
Şekil 2.15 Silis esaslı agrega ile üretilen betonda basınç dayanımı renk ilişkisi (Andrade vd., 2003a)

Agrega olarak nehir kumu ve bazalt kullanılarak üretilmiş yüksek dayanımlı betonlar üzerinde yapılan diğer bir çalışmada 200 °C'de renkte bir değişim olmazken, 400 °C, 800 °C 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 °C 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.

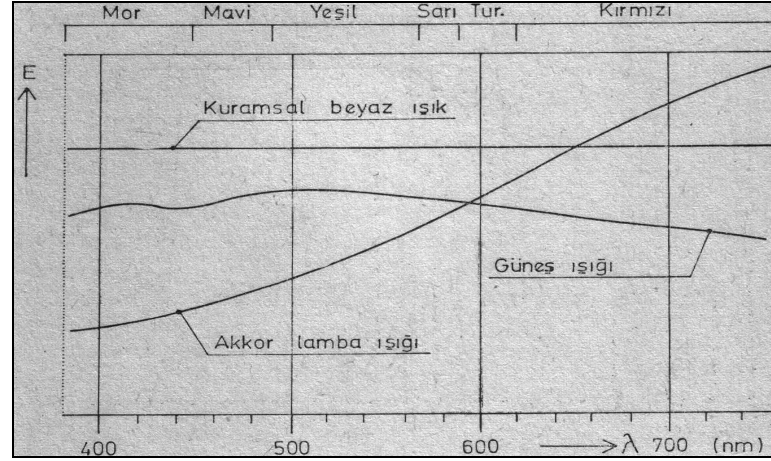
Şekil 2.16’da da görüldüğü üzere, sıcaklık 600 °C’ye ulaştığında beton, dayanımının %50’sini, 800 °C’ye ulaştığında ise yaklaşık %80 ’ini kaybettiği göz önüne alınırsa (Baradan vd., 2002), renk incelemesi ile betonun hangi sıcaklığa maruz kaldığı, dolayısı ile basınç dayanımındaki değişim hakkında fikir edinilebilir. Buradan yüksek sıcaklık etkisinde kalan betondaki renk değişiminin önemli bir parametre olduğu anlaşılmaktadır (Yüzer vd., 2003, Yüzer vd. 2004).



Şekil 2.16 Betonda sıcaklığa bağlı dayanım kaybı renk değişimi (Baradan vd., 2002)

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

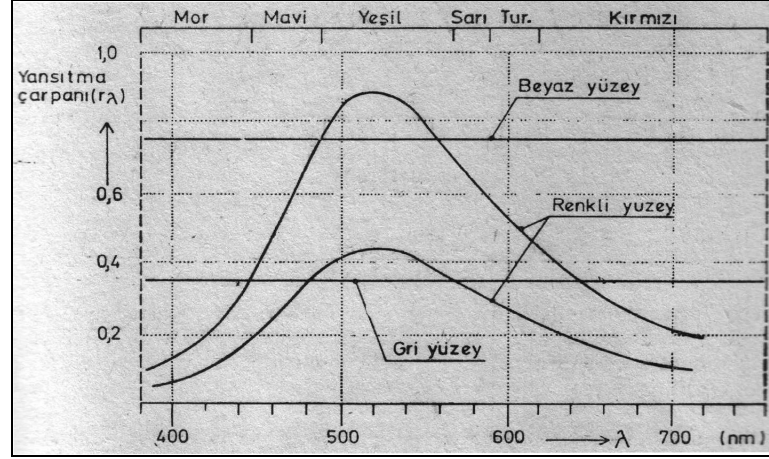
Işık ışınları dalga boyu 380 nm ile 760 nm arasında değişen ışınlardır. Beyaz ışık bütün tek renkli ışıkların eşit oranlarda karışmasından oluşmuştur. Şekil 2.17’de kuramsal beyaz ışığın, güneş ışığının ve akkor lamba ışığının tayfsal eğrileri görülmektedir. Grafiğin x ekseninde ışığın dalga boyu (λ , nm), y ekseninde ise bağıl enerji (E, mW/nm) verilmiştir. Grafikten de görüldüğü üzere kuramsal beyaz ışığa en yakın ışık, güneş ışığıdır (Sirel, 1974).



Şekil 2.17 Farklı ışıkların tayf eğrileri (Sirel, 1974)

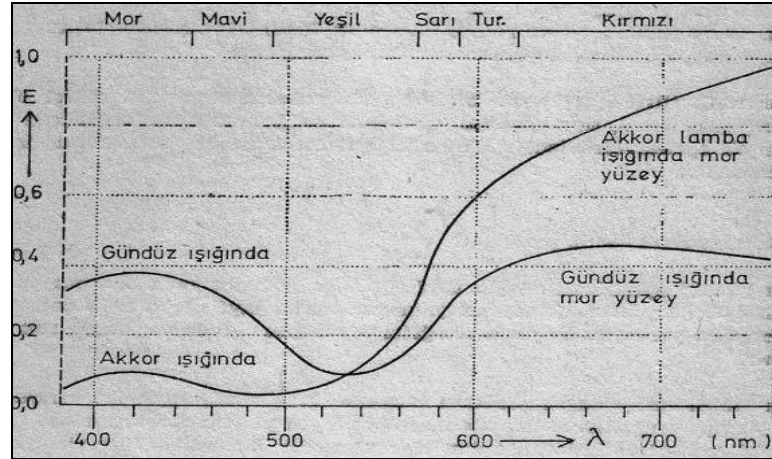
Bir yüzeyin renkli görülmesi o yüzeyi aydınlatan beyaz ışığın bileşimindeki bütün renkli ışınların aynı oranda yansımamaları ve böylece, yansyarak göze gelen ışığın bileşiminin, beyaz ışığınkinden farklı oluşu, yani yansıyan ışığın renkli oluşu sonucudur. Örneğin bir yüzey kırmızı görünüyorsa, bu, o yüzeyin kırmızı ışınları 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 ışınların oranı daha büyük olur ve yüzey kırmızı görünür (Sirel, 1974).

Yüzeylerin, ışığı yansıtma çarpanlarının, dalga boyuna göre değişme özellikleri grafikte gösterilir. Şekil 2.18 böyle bir grafiği göstermektedir. x eksenini dalga boylarını, y eksenini ise yüzeyin dalga boyuna göre değişen yansıtma çarpanlarını göstermektedir. Şekil 2.18'deki 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 görülürler (Sirel, 1974).



Şekil 2.18 Yüzeylerin tayfsal yansıtma çarpanı eğrileri (Sirel, 1974)

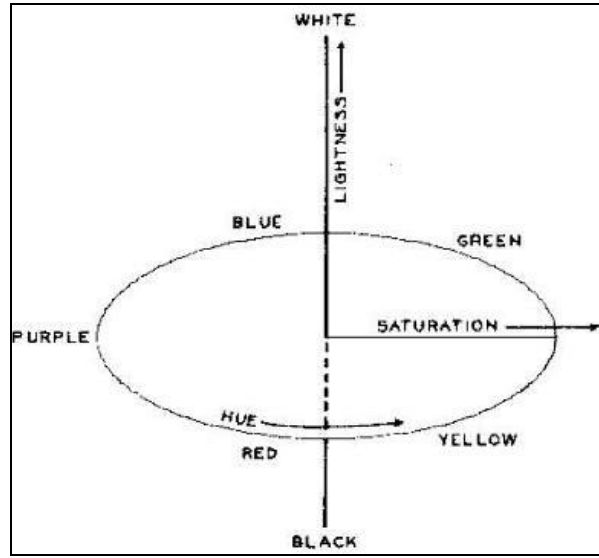
Bir yüzeyi aydınlatan ışığın tayf eğrisi, o yüzeyin yansıtma çarpanları eğrisiyle çarpılırsa yüzeyden yansıyan ışığın tayf eğrisi elde edilir. Bir yüzeyden yansıyan ışığın tayf eğrisi o yüzeyin görünen renginin eğrisidir. Bu tanıma göre yüzeyin görünen renginin yüzeyin yansıtma çarpanları eğrisi ve o 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 2.19'da mor yüzeyin gün ışığında ve akkor lamba ışığında görünen renkleri gösterilmiştir. Bu çalışmada, renk ölçümünde ölçüm C ışığından yararlanılmıştır (Sirel, 1974).



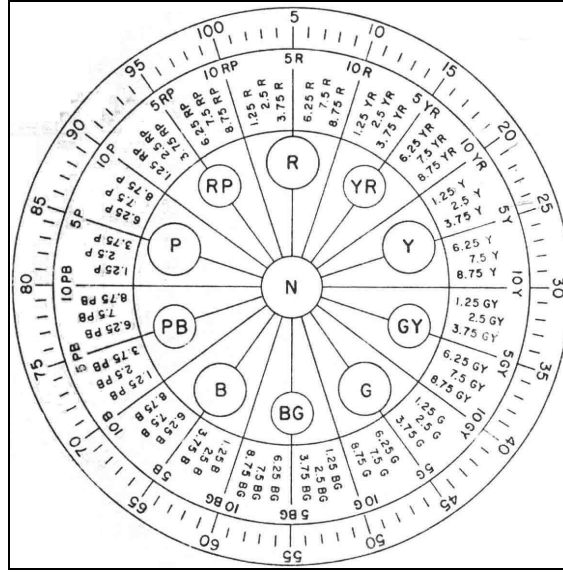
Şekil 2.19 Mor yüzeyin farklı ışıklardaki tayf eğrileri (Sirel, 1974)

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 2.20) 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 2.21). 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 1535-68, 1974; Öztürk, 2002).

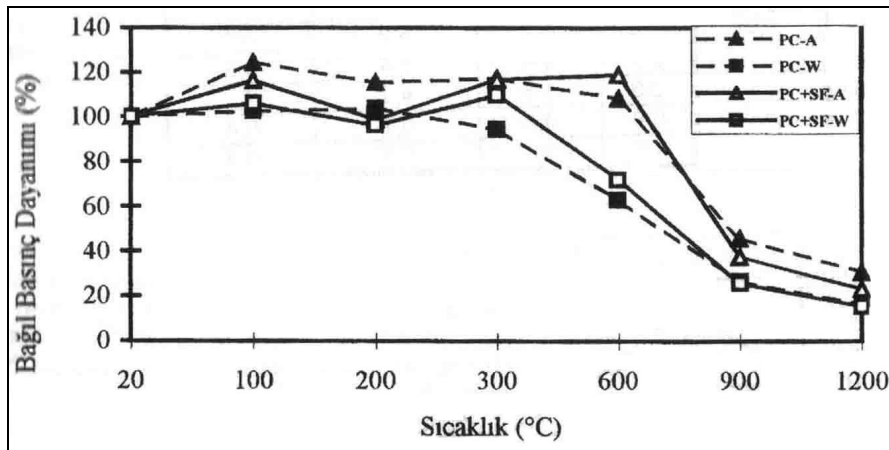


Şekil 2.20 Rengin üç bileşeni (ASTM D 1535-68, 1974)

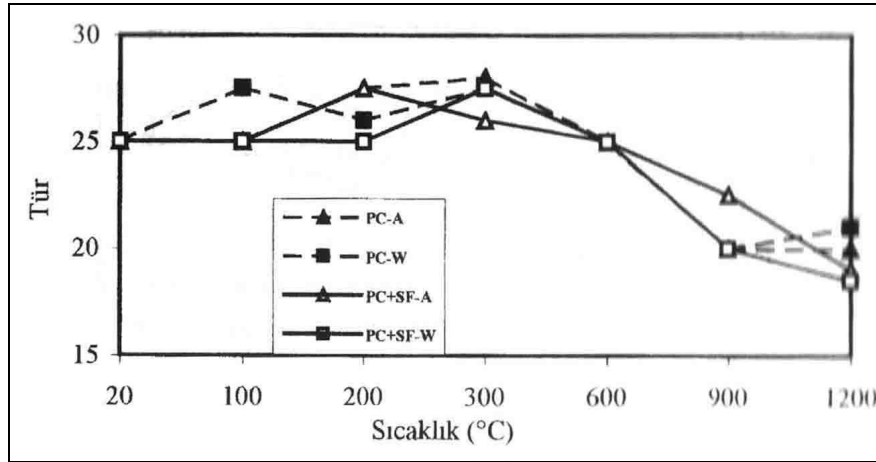


Şekil 2.21 Munsell Tür Çemberi (ASTM D 1535-68, 1974)

Yukarıda temel özellikleri kısaca verilen renk dizgesi kullanılarak yapılan deneysel çalışmada yüksek sıcaklığın silis esaslı agrega kullanılan, silis dumanı katkılı ve katkısız harçlara olan etkileri araştırılmış, 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 2.22 ve 2.23'te 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 esaslı agrega ile üretilen beton numuneler üzerinde yapılan diğer bir çalışmada da benzer sonuçlar elde edilmiştir (Yüzer vd., 2005)

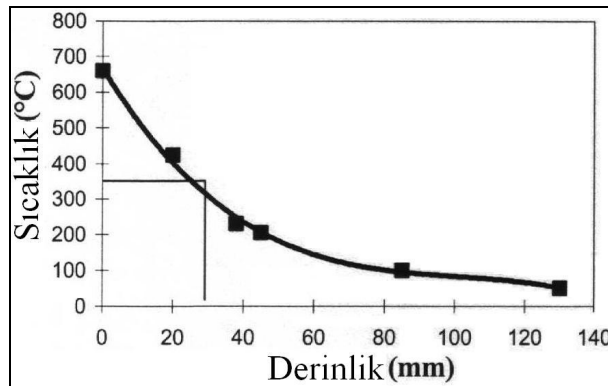


Şekil 2.22 Basınç dayanımının sıcaklıkla değişimi (Yüzer vd., 2001)

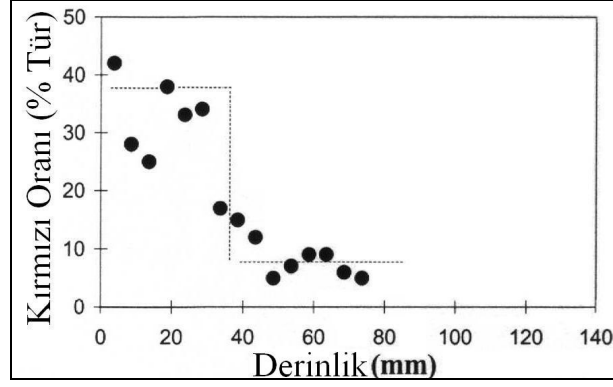


Şekil 2.23 Rengin tür bileşeninin sıcaklıkla değişimi (Yüzer vd., 2001)

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 2.24) ve farklı derinliklerde ölçülen yüzey renkleri (Şekil 2.25) 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 2.24 Yüzeyden itibaren sıcaklığın derinlikle değişimi (Short vd., 2001)



Şekil 2.25 Yüksek sıcaklık etkisindeki betonun yüzey renginin derinlikle değişimi (Short, 2001)

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 2.4 bağıntısı, kalker esaslı agrega ile üretilen harçlar için 2.5 bağıntısı elde edilmiştir.

$$f_{teo} = e^{4,30 + 0,06H - 0,20V - 1,21C} \quad 2.4$$

$$f_{teo} = e^{7,33 - 0,06H - 0,22V - 1,44C} \quad 2.5$$

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

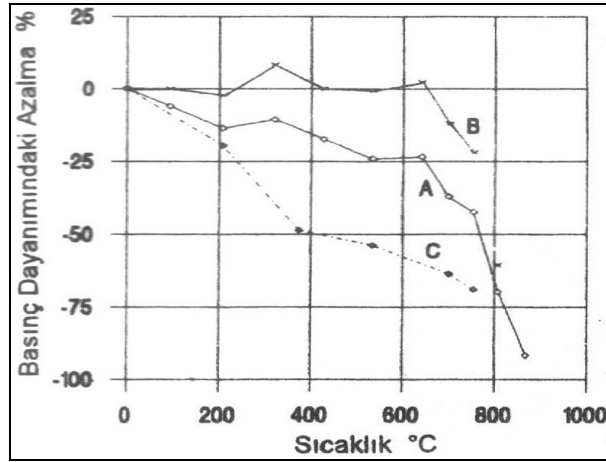
2.2.4 Yüksek Sıcaklığın Betonun Mekanik Özelliklerine Etkileri

Betonarme yapılar, yangın, termal şok, endüstriyel uygulamaları 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

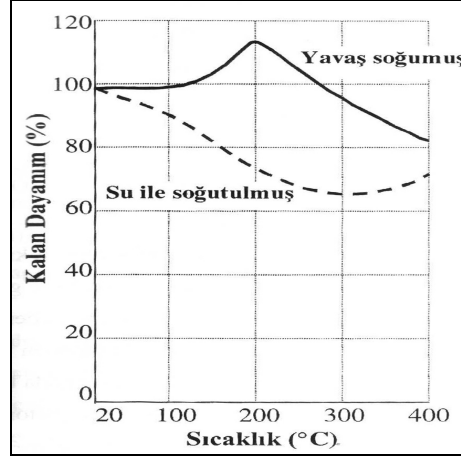
Yüksek sıcaklığa maruz kalan betonun basınç dayanımına, çimento tipi, agrega türü, su/çimento oranı gibi kullanılan malzeme özellikleri ve sıcaklığa maruz kalınan süre, nem durumu, ısınma ve soğuma hızı, yükleme durumu gibi çevresel faktörler etken olmaktadır (Neville, 2000). Kullanılan malzeme bakımından agrega türünün dayanımdaki etkisi Bölüm 2.2.2.2’de incelenmiştir.

Yükleme durumuna göre basınç dayanımındaki değişim Şekil 2.26’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 2.26’daki basınç deneyi sonuçları, C grubu numunelerin temsil ettiği, yüksüz durumda ısıtılıp soğutulduktan sonra basınç dayanımlarının belirlenmesi yönteminin daha güvenli bölgede kaldığını göstermektedir.



Şekil 2.26 Betonun basınç dayanımının yüklemeye göre sıcaklıkla değişimi (Neville, 2000)

Soğutma türünün de yüksek sıcaklığa maruz betonun basınç dayanımına etkisi vardır. Su ile soğutulan numunelerin basınç dayanımlarındaki azalma (Şekil 2.27) havada soğutulan numunelere nazaran daha fazladır (Neville, 2000; Yüzer vd. 2004b).



Şekil 2.27 Basınç dayanımının soğutma şekline göre sıcaklıkla değişimi (Neville, 2000)

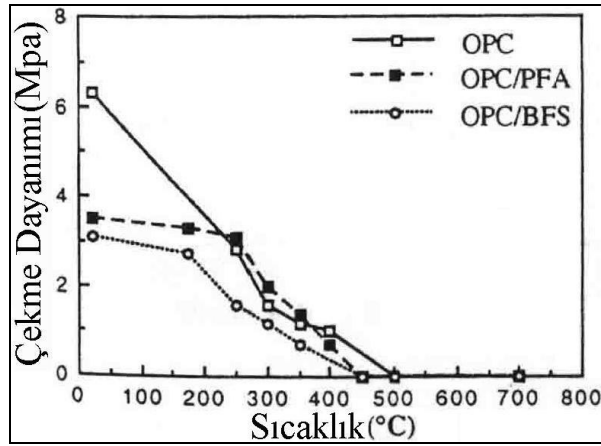
Shoaib vd. (2001) tarafından agrega olarak ayrı ayrı kum ve iki farklı cüruf kullanılarak üretilen farklı su/çimento oranlarına sahip 7.5x15 cm boyutlu silindir numuneler 600 °C'ye kadar ısıtılmış ve bu sıcaklıkta iki saat bekletilmiştir. Numunelerde havada soğutulan grupların basınç dayanımındaki azalmanın suda ve fırında soğutulana göre daha fazla olduğu görülmüştür. Bunun nedeni atmosferik ortama maruz kalan betonda CaO'nun CaCO₃'e dönüşmesiyle ve bunun hacim değişimine ve çatlaklara neden olmasıyla açıklanmıştır.

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

2.2.4.2 Çekme Dayanımı

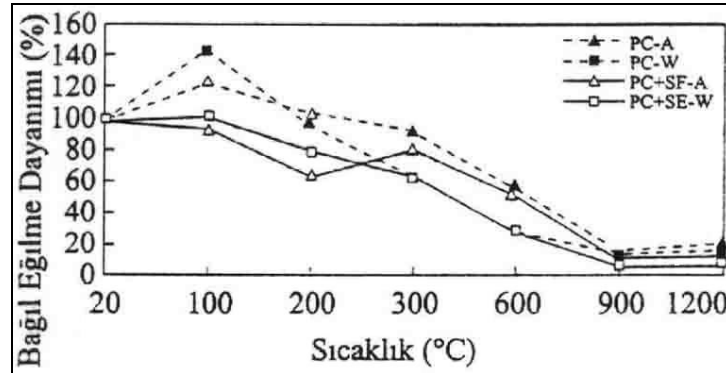
Betonun çekme dayanımı, eğilmede çekme ve yarma deneyi sonuçları ile araştırılır. Silindir numunelerde değişik sıcaklık etkisinde iken ve soğutulduktan sonra yapılan yarma deneyi ile elde edilen çekme dayanımlarında 100 °C'den itibaren önemli düşüşler olmakta ve 600 °C'de kayıp %70'e varmaktadır (CEB,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

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 2.28).



Şekil 2.28 Puzolan katkılı ve katkısız betonların çekme dayanımının sıcaklıkla değişimi (Guise vd., 1996)

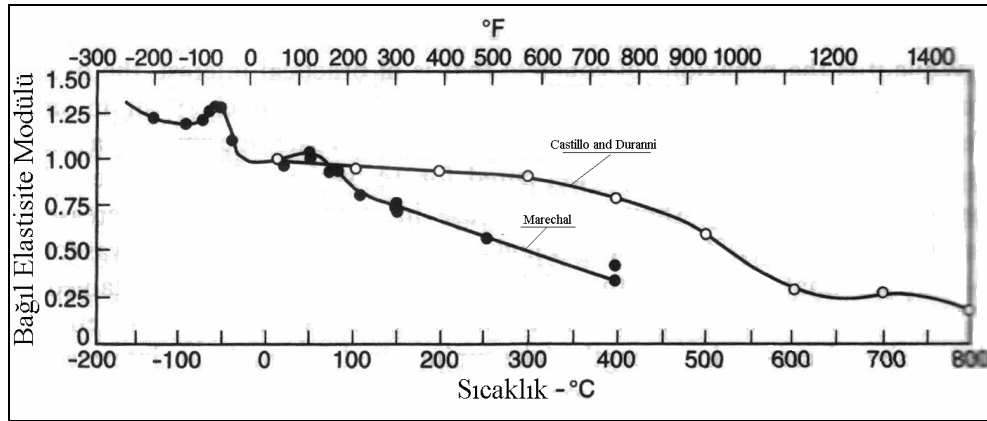
Yüksek sıcaklık etkisinin araştırıldığı silis dumanı katkılı ve katkısız harçlar üzerinde yapılan diğer bir deneysel çalışmada, harçların eğilme dayanımı (Şekil 2.29) 100 °C'den itibaren bütün gruplarda azalmaya başlamış, suda soğutulanlardaki kayıp, 300 °C'de yaklaşık %40'a varmıştır (Aköz vd., 1995).



Şekil 2.29 Eğilme dayanımının sıcaklıkla değişimi (Aköz vd., 1995)

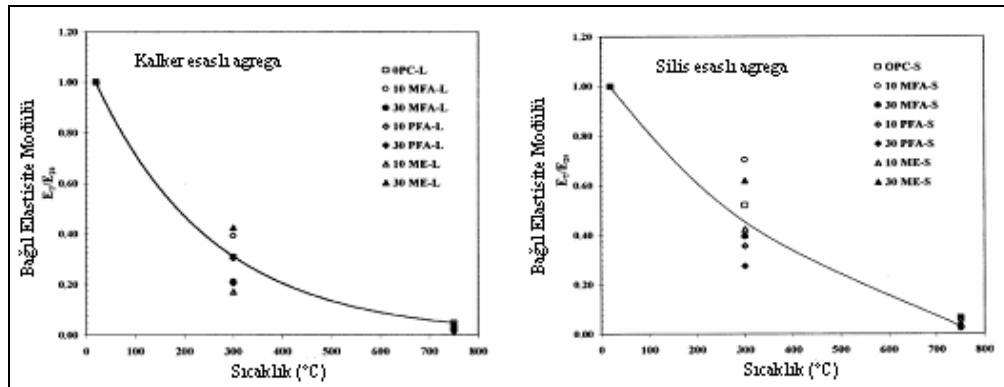
2.2.4.3 Elastisite Modülü

Betonarme yapıların davranışı betonun elastisite modülüne bağlıdır ve bu modül sıcaklıktan oldukça etkilenir. Sıcaklığın betonun elastisite modülüne etkisi Şekil 2.30'da verilmiştir. Kütle halinde kür edilmiş betonlarda 21 °C 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 °C ile 800 °C'ler arası elastisite modülündeki azalma giderek artmaktadır. Genel olarak dayanımdaki azalma ile elastisite modülündeki azalma benzer eğilim göstermektedir (Neville, 2000).



Şekil 2.30 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 agregaya ile üretilen betonlarda tüm sıcaklıklarda elastisite modülünde devamlı bir azalma gözlenmiştir. Bu azalma kalker esaslı agregaya ile üretilen gruplarda daha fazladır (Şekil 2.31). Puzolanların elastisite modülüne etkisi açıkça görülmemekle birlikte betonun kırılması daha az gevrekliktir.



Şekil 2.31 Farklı beton numuneleri için sıcaklık- elastisite modülü ilişkisi (Savva vd., 2005)

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

Bu çalışma kapsamında silis esaslı agregaya kullanılarak üretilen ve yüksek sıcaklık etkisinde kalan puzolan katkılı ve katkısız beton numunelerin fiziksel ve mekanik özelliklerine, soğutma türünün etkisi deneysel olarak araştırılmıştır. Silis esaslı agregaya ve farklı mineral katkıların kullanıldığı betonlarda yüksek sıcaklık etkisinden sonra kalan dayanım ile renk değişimi arasında matematiksel ifade geliştirilmiştir.

3. DENEYSEL ÇALIŞMA

Bu çalışma kapsamında silis esaslı agrega ve farklı puzolan türleri kullanılarak üretilen ve yüksek sıcaklık etkisine maruz bırakılan beton numunelerin fiziksel ve mekanik özelliklerinde meydana gelen değişimler incelenmiştir. Deneysel çalışma, numune üretimi, kürü, ısıtma-soğutma süreci, fiziksel ve mekanik deneyler olmak üzere dört aşamada gerçekleştirilmiştir. Numune üretiminde maksimum dane çapı 16 mm olan silis esaslı agrega, CEM I 42.5 R çimentosu, silis dumanı, uçucu kül ve cüruf kullanılmıştır. Puzolan malzemeler, betona çimento ağırlığının %10'u oranında ikameli olarak katılmıştır. Her sıcaklık için oniki adet olmak üzere toplam 332 adet 100 mm çapında 200 mm yüksekliğinde silindir beton numune üretilmiştir. Betonda su/bağlayıcı oranı 0.5 ile sabit tutulmuş, çökmenin sabit tutulması amacı ile %1.1-1.15 oranlarında, katı madde oranı %35,8 olan polikarboksilat esaslı hiper akışkanlaştırıcı katkı maddesi kullanılmıştır. TS EN 206-1'e uygun olarak üretilen betonlar 24 saat sonra kalıptan çıkarılmış, 28. güne kadar 20 ± 2 °C sıcaklıktaki suda saklanmıştır. Numuneler, kullanılan puzolan türü ve soğutma şekline göre Çizelge 3.1'de gösterildiği gibi kodlanmıştır.

Çizelge 3.1 Numune grupları

Soğutma Türü	Havada (A)	Suda (W)
Portland Çimentosu (Katkısız) (N)	NA	NW
Silis Dumanı Katkılı (S)	SA	SW
Cüruf Katkılı (C)	CA	CW
Uçucu Kül Katkılı (F)	FA	FW

3.1 Numune Üretiminde Kullanılan Malzemeler

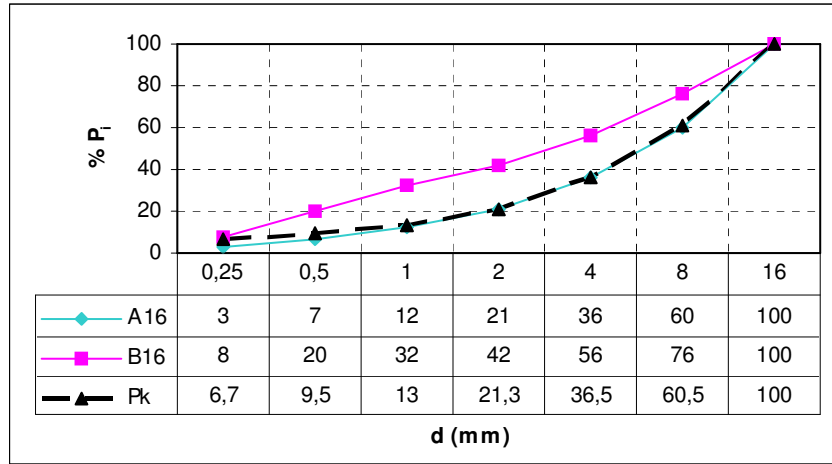
Beton üretiminde özellikleri aşağıda verilen agrega, çimento, mineral katkı ve süper akışkanlaştırıcı katkı maddesi kullanılmıştır.

3.1.1 Agrega

Beton üretiminde, fiziksel özellikleri Çizelge 3.2'de verilen maksimum dane çapı 16 mm olan ve Cendere bölgesinden temin edilen silis esaslı agrega kullanılmıştır. Agregaya ait granülometri eğrisi Şekil 3.1'de verilmiştir.

Çizelge 3.2 Agregaların fiziksel özellikleri

Agrega	Birim Ağırlık (g/cm ³)	Özgöl Ağırlık (g/cm ³)
İnce	1,36	2,77
Orta	1,38	2,78
İri	1,57	2,63



Şekil 3.1 Agreg granülometri eğrisi

3.1.2 Çimento

Beton üretiminde, fiziksel ve kimyasal özellikleri Çizelge 3.3'te verilen, CEM I 42,5 R çimentosu kullanılmıştır.

3.1.3 Mineral Katkı

Mineral katkı olarak, beton üretiminde Norveç Eklem tesislerinden elde edilen silis dumanı, Ereğli Demir Çelik Fabrikasından elde edilen yüksek fırın cürufu ve Akdeniz Madencilik Tunçbilek santralinden temin edilen uçucu kül olmak üzere üç tür puzolan malzeme kullanılmıştır. Kullanılan puzolanların fiziksel ve kimyasal özellikleri Çizelge 3.3'te verilmiştir.

Çizelge 3.3 Kullanılan malzemelerin kimyasal analizi ve fiziksel özellikleri

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

3.1.4 Kimyasal Katkı

İstenen çökmenin sağlanması amacı ile katkı oranı %1.1-1.15 arasında değişen, katı madde miktarı %35,8 olan polikarboksilat esaslı hiper akışkanlaştırıcı kimyasal katkı maddesi kullanılmıştır.

3.2 Numune Üretimi

TS EN 206-1'e uygun olarak 332 adet 100 mm çapında 200 mm yüksekliğinde silindir beton numune üretilmiştir. 1 m³ beton için gerekli gerçek malzeme miktarları ve taze beton birim ağırlıkları Çizelge 3.4'te verilmiştir.

Çizelge 3.4 Beton üretiminde kullanılan gerçek malzeme miktarları, taze beton birim ağırlığı ve çökme miktarları

Katkı Türü	Çimento (kg)	Mineral Katkı (kg)	Agrega (kg)	Hiper Akışkanlaştırıcı (%)	Taze Beton Birim Ağırlığı (kg/m ³)	Çökme Miktarı (mm)
Katkısız	355,0	--	1907,3	1,1	2503	25
Silis Dumanı Katkılı	350,1	38,5	1943,1	1,15	2507	24
Uçucu Kül Katkılı	347,5	38,2	1928,6	1,15	2488	23
Yüksek Fırın Cürufu Katkılı	350,1	38,5	1943,1	1,15	2507	26

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 $100\pm5^{\circ}\text{C}$ 'de 48 saat bekletilmiş, sonra her gruptan 12 adet numune, ısınma hızı $8\pm4^{\circ}\text{C}/\text{dak.}$ olan fırında 100, 200, 300, 600, 900 ve 1200°C sıcaklıklara kadar ısıtılmıştır. Fırından çıkarılan numuneler Şekil 3.2 ve Şekil 3.3'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 3.2 Havada soğutma



Şekil 3.3 Suda soğutma

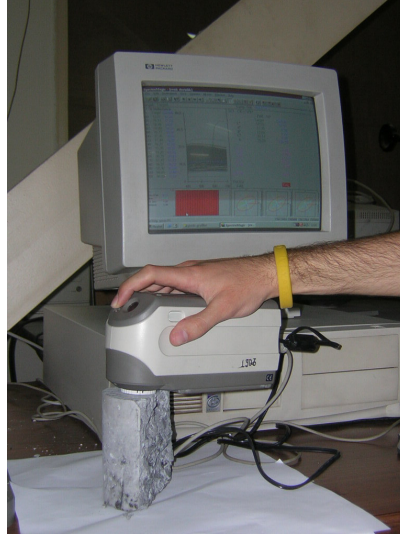
3.4 Kontrol Deneyleri

Numuneler, yüksek sıcaklık etkisine maruz bırakılmadan önce etüvde 100 ± 5 °C sıcaklıkta 48 saat bekletilmiştir. Yüksek sıcaklık etkisinde kalan betonun fiziksel ve mekanik özelliklerindeki değişimleri incelemek amacıyla, betonların sırasıyla yüzey renkleri ve ultrases geçiş süreleri ölçülmüş, basınç ve yarma deneyleri yapılmış, birim ağırlık ve hacimce su emme değerleri belirlenmiştir. Aşağıda 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, Minolta marka ISO 7724/1'e uygun 2500-d model tayfsal renk ölçer (spectrophotometer) ile Munsell Renk Dizgesi esas alınarak belirlenmiştir. Rengin tür, değer ve doymuşluk bileşenleri her numunede 3'er kez olmak üzere ölçülüp, ortalama değerler Ek Çizelge 1-3'te, yüksek sıcaklığa bağlı değişimler Şekil 4.2-4.4'te verilmiştir.

Deneysel çalışma kapsamında 900 °C'ye maruz numunelerde yapılan yarmada çekme deneyinden elde edilen yarım silindirler Şekil 3.4'te görüldüğü gibi ikiye bölünerek derinliğe bağlı renk analizi yapılmıştır.



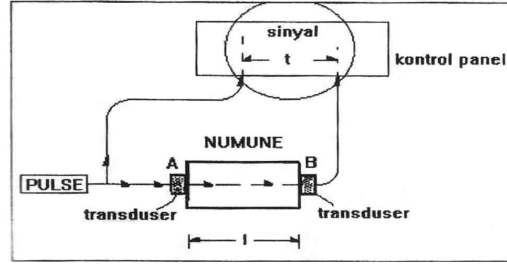
Şekil 3.4 Derinliğe bağlı renk analizi

Yüzey ve yüzeyden itibaren 1., 2., 3., ve 4. cm'lerde yapılan renk analizinden elde edilen veriler Şekil 4.5, 4.6 ve 4.7'de, değerler Ek çizelge 4, 5 ve 6'da verilmiştir.

3.4.2 Ultrases Geçiş Hızının Belirlenmesi

Beton numunelerde, ASTM C 597 – BS 1881’e uygun 0,1 µs duyarlıklı ultrases aleti ile t, µs 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 3.5’te görüldüğü gibi numunenin düzgün yüzeylerine yerleştirilmiş, direkt iletim yöntemi uygulanarak ses geçiş süresi (t, µs) okunmuştur. Problar yer değiştirilerek ikinci okuma alınmış, her numune için bu iki okumanın ortalaması alınarak 3.1 bağıntısından faydalanarak ses geçiş hızı (V, km/saat) hesaplanmış, sonuçlar Şekil 4.8 ve Ek Çizelge 7’de verilmiştir.

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



Şekil 3.5 Ultrasonik yöntem ile ses geçiş süresinin belirlenmesi

3.4.3 Yarmada Çekme Deneyi

Yarmada çekme deneyi toplam 168 adet numunede TS EN 12390-6’ya uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Bunun için numuneler 0.04-0.06 N/mm².s yükleme hızı ile kırılmıştır. Çekme dayanımları 3.2 bağıntısından hesaplanmış, sonuçlar Şekil 4.10 ve Ek Çizelge 8’de verilmiştir.

$$f_{yc} = \frac{2xP_k}{\pi x d x l} \quad (3.2)$$

3.4.4 Basınç Deneyi

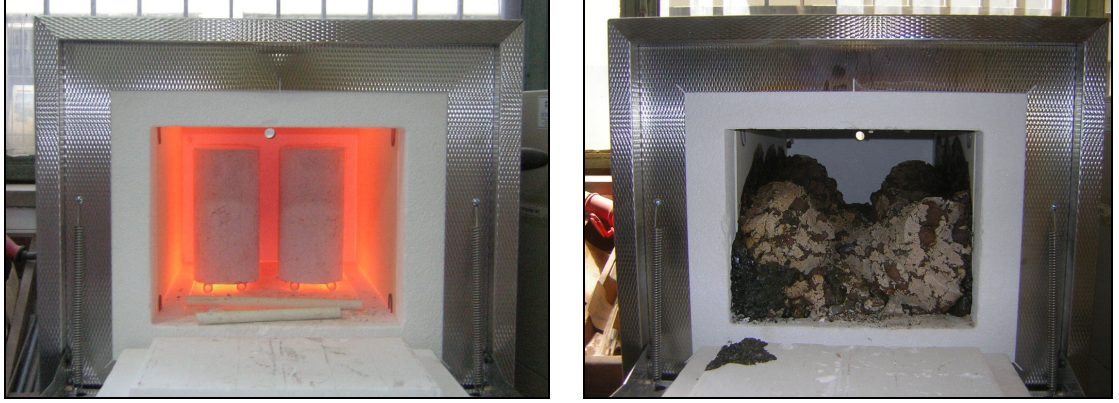
Numuneler, TS EN 12390-3’e uygun olarak tek eksenli basınç deneyine tabi tutulmuştur. Deney, 3000 kN kapasiteli Auto Test basınç aletinde 0.2-1.0 N/mm².s yükleme hızı ile gerçekleştirilmiş, sonuçlar Şekil 4.11 ve Ek Çizelge 9’da verilmiştir.

3.4.5 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 4.12-4.13 ve Ek Çizelge 10-11’de verilmiştir.

4. DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ ve İRDELENMESİ

Üretimi ve kürü tamamlanan ve yüksek sıcaklık etkisine maruz bırakılan beton numunelerde yapılan kontrol deneylerinin sonuçları Ek Çizelge 1-11’de verilmiş, bu sonuçlar Bölüm 4.1-4.5’te değerlendirilmiş ve irdelenmiştir. 1200 °C sıcaklığa maruz bırakılan gruplar Şekil 4.1’de görüldüğü gibi fırın içinde tamamen dağılmıştır. Bu numunelerde agrega dane çapı ölçülmüş, 16 mm olan maksimum dane çapının 45 mm’ye ulaştığı tespit edilmiştir.



a) Numunelerin yüksek sıcaklık etkisine maruz bırakılması b) 1200°C sıcaklıkta dağılan numuneler

Şekil 4.1 1200 °C sıcaklığa maruz kalan numuneler

4.1 Renk Değişiminin Değerlendirilmesi ve İrdelenmesi

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

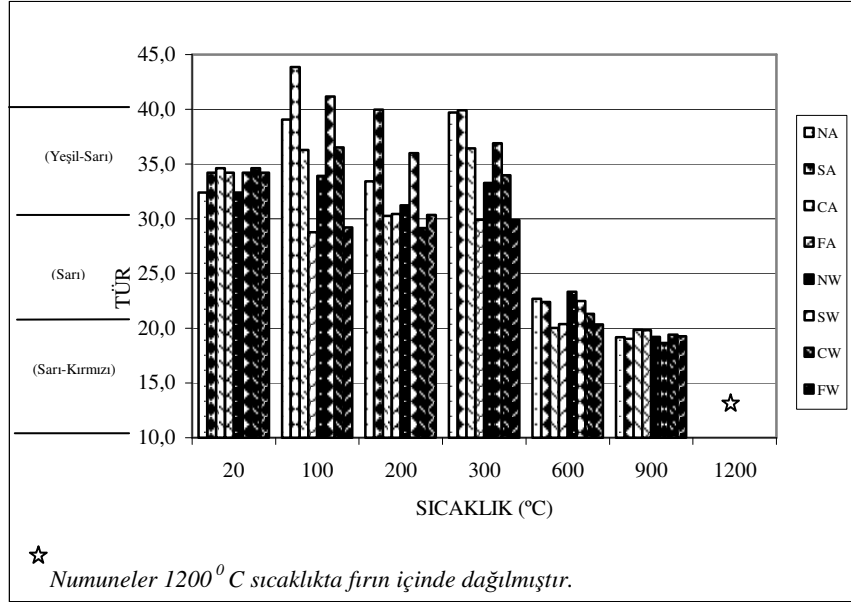
4.1.1 Yüzey Renginin Değerlendirilmesi ve İrdelenmesi

Sıcaklık değişimine bağlı olarak, beton numunelerin renklerinde ortaya çıkan değişimler, rengin tür, değer ve doymuşluk bileşenleri için ayrı ayrı aşağıda değerlendirilmiş, deney sonuçları Ek Çizelge 1-3’te verilmiştir.

Renk türü her grup 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 gruplarda rengin tür bileşeninde yeşile doğru değişim gözlenmiştir. Bu sıcaklıktan sonra, 600 °C’de rengin tür bileşeninin değişerek sarı (~22), 900 °C’de ise kırmızıya ~3 adım yaklaşarak (~19) kırmızımsı sarı olduğu gözlenmiştir (Çizelge 4.1, Şekil 4.2).

Çizelge 4.1 Rengin türündeki değişimin büyüklüğü

Sıcaklık	Rengin Tür Bileşeni
20 °C – 100 °C	~2,28 adım yeşile doğru
100 °C – 200 °C	~3,54 adım sarıya doğru
200 °C – 300 °C	~2,43 adım yeşile doğru
300 °C – 600 °C	~13,35 adım kırmızıya doğru
600 °C – 900 °C	~2,34 adım kırmızıya doğru

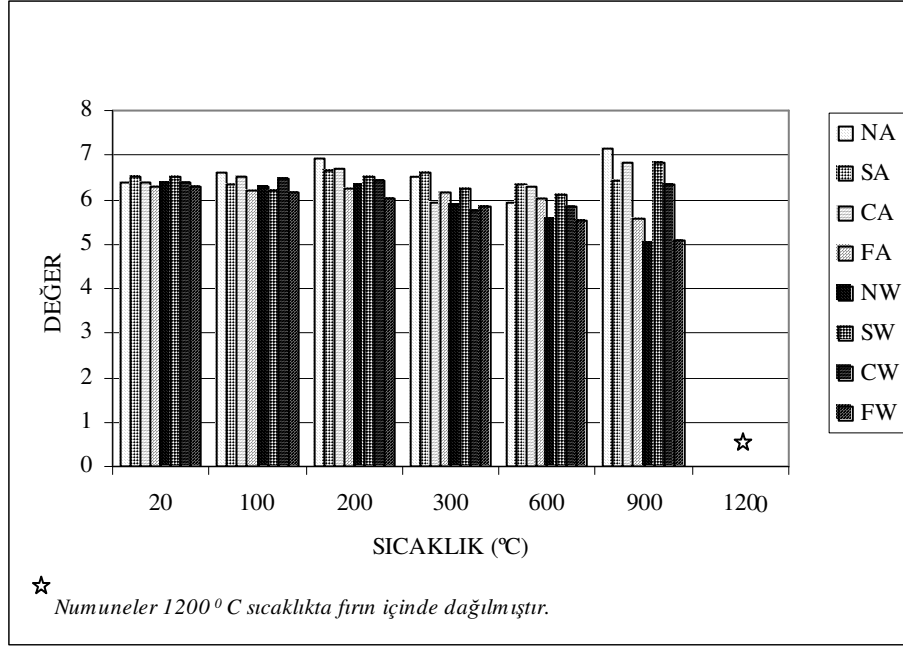


Şekil 4.2 Beton numunelerin renk değişimi (TÜR)-sıcaklık ilişkisi

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, 600 °C’den sonra yeniden açığa çıkmaktadır. Rengin değer boyutundaki değişim, tür boyutundaki değişimden farklı olarak, ele alınan tüm numunelerde her bir değişik sıcaklık için aynı doğrultuda olmamaktadır (Şekil 4.3, Çizelge 4.2).

Çizelge 4.2 Rengin değeriindeki değişimin büyüklüğü

Sıcaklık	Rengin Değer Bileşeni
20 °C – 600 °C	~0,44 adım ↓
600 °C – 900 °C	~0,20 adım ↑

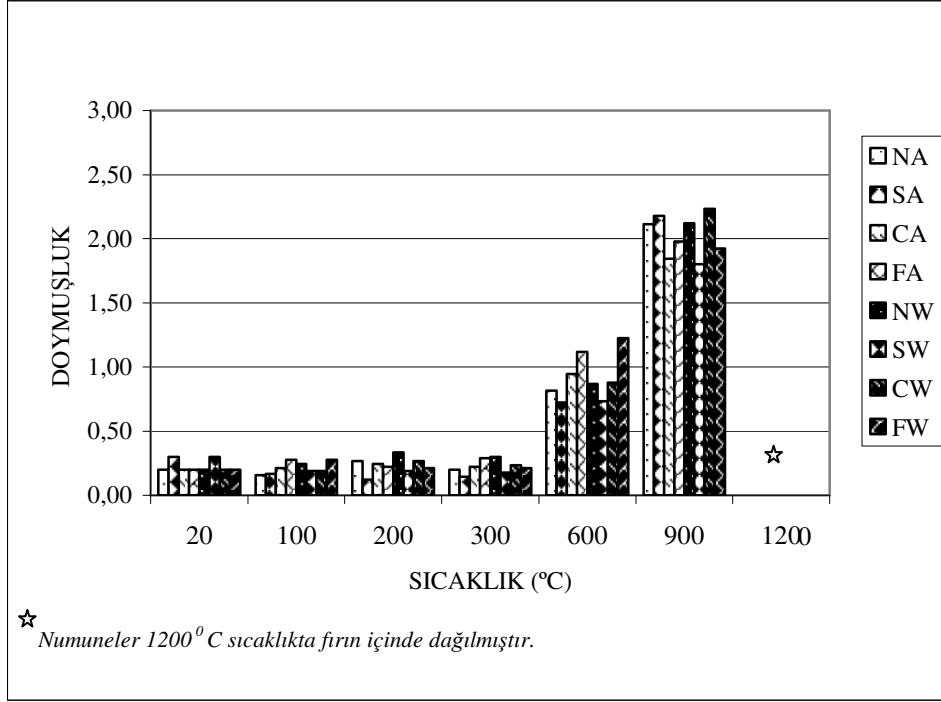


Şekil 4.3 Beton numunelerin renk değişimi (DEĞER)-sıcaklık ilişkisi

Rengin doymuşluk bileşeni açısından yapılan incelemede, numunelerin oda sıcaklığında çok az doymuş olduğu saptanmıştır. 20 °C sıcaklıkta doymuşluğun büyüklüğü ~0,23 olarak belirlenmiştir. Tüm gruplarda numune renklerinin doymuşluğu 300 °C'ye kadar hemen hemen hiç değişmemektedir. Bu sıcaklıktan sonra doymuşluk bileşeninde önemli artışlar görülmüş, sıcaklığın yükselmesi ile doymuşluk da artmıştır. Şekil 4.4 ve Çizelge 4.3'ten görüldüğü gibi, sıcaklığın yükselmesine dayalı 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 4.3 Rengin doymuşluğundaki değişimin büyüklüğü

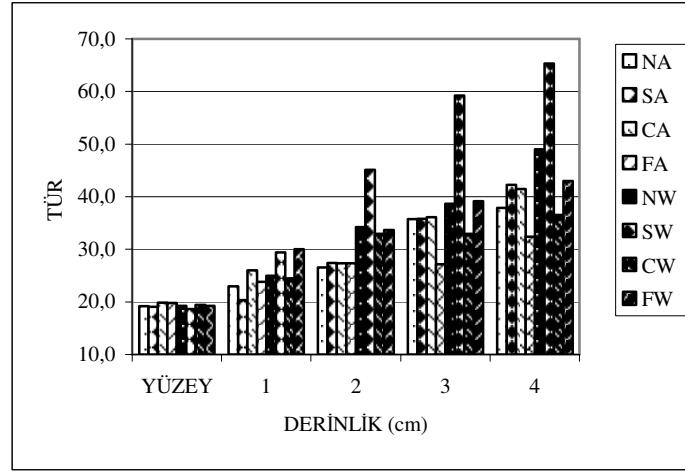
Sıcaklık	Rengin Doymuşluk Bileşeni
20 °C – 300 °C	~0,01 adım ↓
300 °C – 600 °C	~0,70 adım ↑
600 °C – 900 °C	~1,11 adım ↑



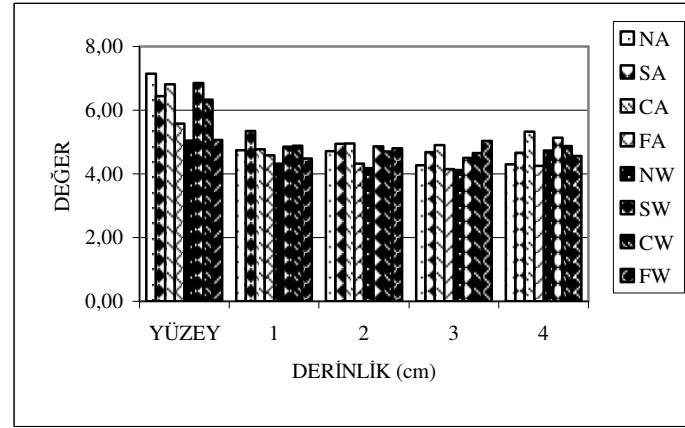
Şekil 4.4 Beton numunelerin renk değişimi (DOYMUŞLUK)-sıcaklık ilişkisi

4.1.2 Derinliğe Bağlı Renk Değişiminin Değerlendirilmesi ve İrdelenmesi

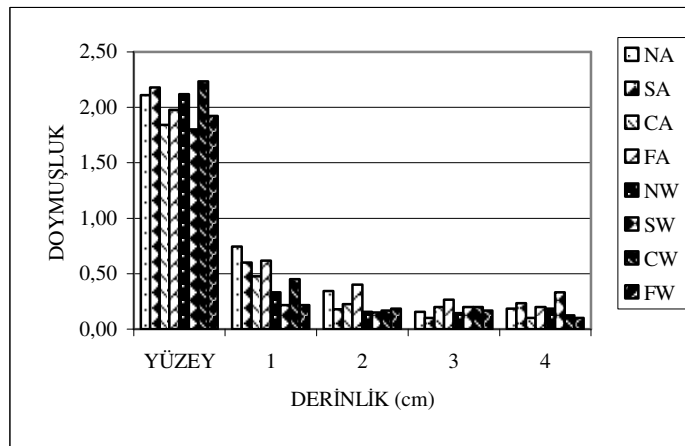
Rengin tür ve doymuşluk bileşenleri Şekil 4.5 ve 4.7’de görüldüğü gibi yüzeyden itibaren derinlikle anlamlı bir değişiklik göstermişlerdir. Şekil 4.6’da görülen rengin değer bileşeni ise önemli bir değişiklik göstermemiştir. Buradan yüksek sıcaklık etkisinde kalan betondan karot numune alınarak, betonun rengindeki değişiklikler derinliğe bağlı olarak da incelenebilir. Yangın esnasında en önemli parametre olan aderans dayanımının kritik sıcaklığa ulaşım ulaşmadığı ve donatının eriştiği sıcaklık tahmin edilebilir.



Şekil 4.5 Betonda renk (TÜR) değişimi-derinlik ilişkisi



Şekil 4.6 Betonda renk (DEĞER) değişimi-derinlik ilişkisi



Şekil 4.7 Betonda renk (DOYMUŞLUK) değişimi-derinlik ilişkisi

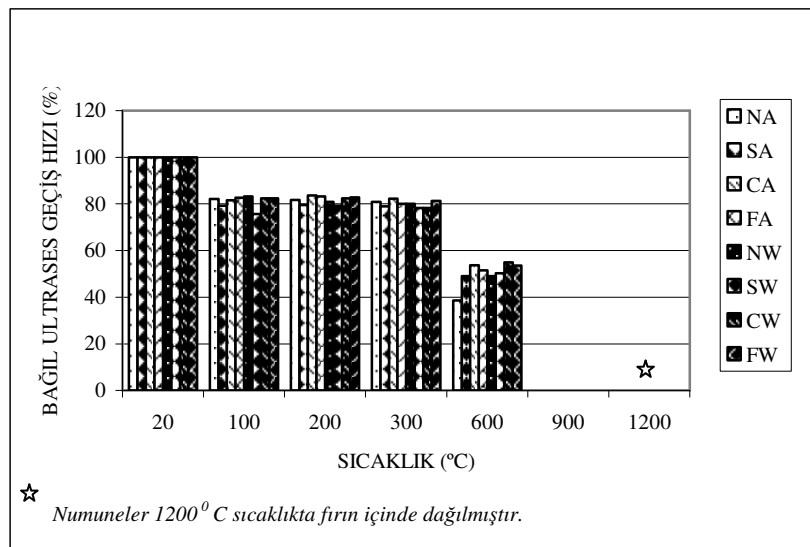
4.2 Ultrases Geçiş Değerlerinin Değerlendirilmesi ve İrdelenmesi

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 dalgaının 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 7’de verilmiştir.

Şekil 4.8’de bağıl ses geçiş hızının sıcaklıkla değişimi verilmiştir. Bu çalışmadaki kontrol numunelerinden en düşük ses geçiş hızı 5,02 mm/μs ile CA-W grubunda, en büyük değer ise 5,34 mm/μs ile SA-W grubunda elde edilmiştir.

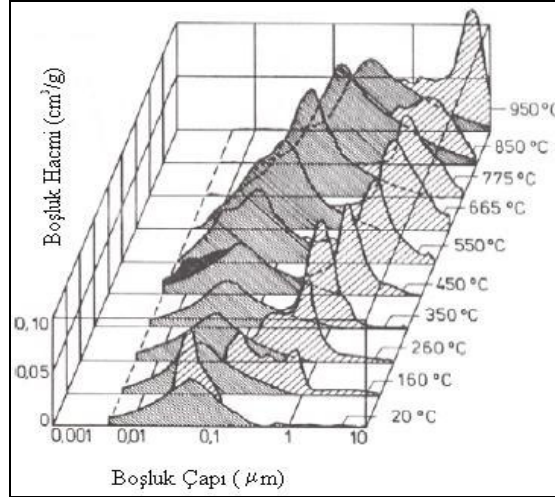
Ultrases deneyi sonuçlarına göre ses geçiş hızlarında 100 °C’de yaklaşık %18,9 kadar düşüş olmuştur. 100 °C-300 °C arasında önemli bir değişiklik olmamış, 600 °C’de tüm gruplarda belirgin bir şekilde azalma gözlenmiş, 900 °C’de ise ses geçiş hızı ultrasonik test aletinin kapasitesini aştığı için değer 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 4.8’de görüldüğü üzere sıcaklık artışıyla ultrases geçiş hızı azalmaktadır. Bu durum sıcaklığın etkisiyle betondaki boşluk oranının artması ile açıklanabilir.



Şekil 4.8 Beton numunelerin bağıl ses geçiş hızı-sıcaklık ilişkisi

Alonso vd. (2003a) tarafından yapılan bir çalışmada boşluk çap ve hacminin sıcaklık etkisi ile değişimi gösterilmiştir (Şekil 4.9). 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.



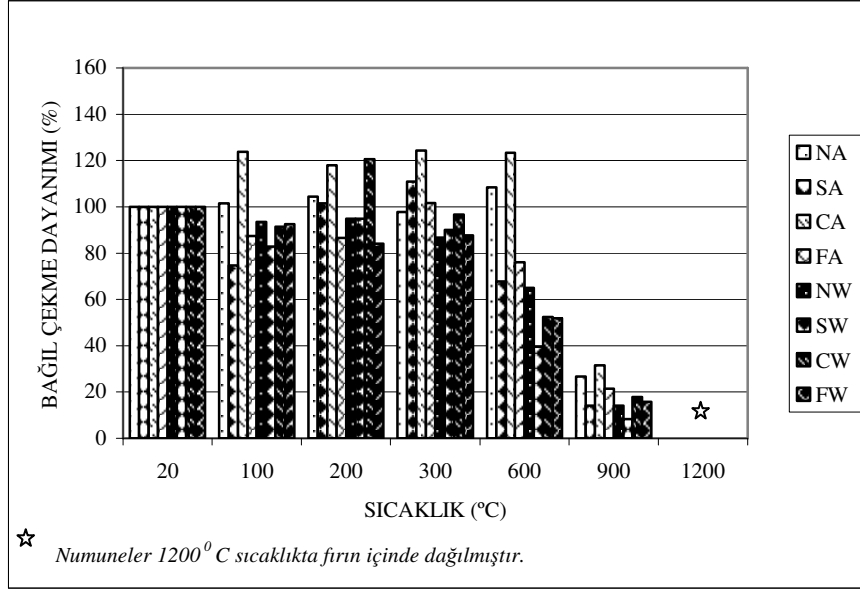
Şekil 4.9 Yüksek sıcaklık etkisindeki harcın boşluk yapısının değişimi (Alonso vd., 2003a)

Şekil 4.9'da 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., 2003a).

4.3 Çekme Dayanımının Değerlendirilmesi ve İrdelenmesi

Yüksek sıcaklık etkisine maruz kalan betonların yarmada çekme deneyi sonuçları Ek Çizelge 8'de verilmiştir. Kontrol gruplarının çekme dayanımlarına bakıldığında en yüksek değer 4,47 N/mm² olmak üzere silis dumanı katkılı gruptadır. Sıcaklık arttıkça çekme dayanımı değişimi her grupta farklı gözlenirken suda soğutulan grupların çekme dayanımları genel olarak sıcaklık artışıyla düşmüştür (Şekil 4.10).

Kullanılan puzolan türüne ve soğutma şekline göre değerlendirildiğinde yüksek fırın cürufu katkılı havada soğutulan grup tüm sıcaklıklarda en iyi performansı gösterirken 900 °C'de en fazla azalma suda soğutulan silis dumanı katkılı grupta görülmüştür. 900 °C'de çekme dayanımı ortalama %80 azalmıştır.



Şekil 4.10 Beton numunelerde çekme dayanımı-sıcaklık ilişkisi

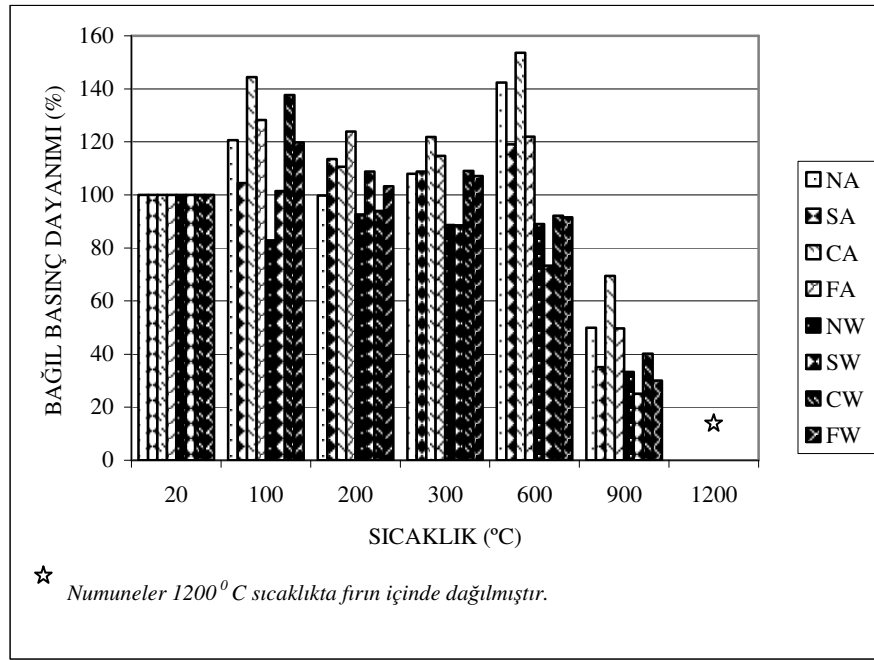
4.4 Basınç Dayanımının Değerlendirilmesi ve İrdelenmesi

Basınç deneyi sonuçları Ek Çizelge 9'da verilmiştir. Katkısız betonların kontrol grubunda basınç dayanımı 30,7 N/mm²'dir. Silis dumanı katkılı numunelerin kontrol grubunda basınç dayanımı 37,1 N/mm² ile en yüksek dayanımı verirken, en düşük dayanım 28,2 N/mm² ile yüksek fırın cürufu katkılılarda görülmüştür.

Yüksek sıcaklık etkisi basınç dayanımını olumsuz yönde etkilemiş, sıcaklık arttıkça 100 °C'de basınç dayanımı artmış, daha sonra 300 °C'ye kadar azalmış, 600 °C'de havada soğutulan gruplarda dayanım tekrar artarken, 900 °C'de ortalama dayanım kaybı %59'lara varmıştır (Şekil 4.11). 900 °C'de basınç dayanımında en fazla azalma silis dumanı katkılı suda soğutulan grupta görülmüştür. Suda soğutmanın zararlı etkisi havada soğutmaya nazaran daha fazla olmuştur.

Puzolan katkılı gruplar ile katkısız grup karşılaştırıldığında, soğutma şekline göre basınç dayanımları ile sıcaklık arasındaki ilişki farklılıklar göstermiştir. Suda soğutulan gruplarda 100 °C'de katkısız numune grubu dışında dayanımlar artmış en fazla artış yüksek fırın cürufu katkılı grupta görülmüştür. Sıcaklık yükseldikçe basınç dayanımı azalmıştır. 200 °C-900 °C arasında yüksek fırın cürufu katkılı numuneler diğer gruplara nazaran daha yüksek basınç dayanımlarına sahiptir. Havada soğutulan gruplarda 100 °C'de basınç dayanımında artış en fazla yüksek fırın cürufu katkılı numunelerde meydana gelirken, en az silis dumanı

katkılılarda görülmüştür. 200 °C-300 °C arasında basınç dayanımları azalmıştır. 600 °C’de tüm havada soğutulan gruplarda dayanımda önemli artışlar meydana gelmiştir. Silis dumanı katkılı gruplarda basınç dayanımı %119 olurken yüksek fırın cürufu katkılılarda %154’tür. 900 °C’de dayanımlar tekrar azalmış, katkısız ve uçucu kül katkılı gruplarda kalan dayanım %50 iken, silis dumanı katkılılarda %35, yüksek fırın cürufu numunelerde %69 olmuştur. Her iki soğutma şeklinde de en iyi performansı yüksek fırın cürufu katkılı gruplar göstermiştir.



Şekil 4.11 Beton numunelerde basınç dayanımı-sıcaklık ilişkisi

Sıcaklık etkisinden dolayı çimento pastasında ve agregada, termal uyumsuzluk nedeni ile betonun bu iki bileşenin ara yüzünde meydana gelen çatlaklar, boşluk oranının artması, su ile soğutma esnasında dehidrate olan ürünlerin rehidratasyonu ve bunun sonucunda meydana gelen büzülme ve genleşmeler betonun mekanik özelliklerini olumsuz yönde etkilemektedir (Akman, 2000; Andrade vd., 2003). Xu vd. (2001) tarafından yapılan, yüksek sıcaklığın uçucu kül katkılı betonlara etkisinin araştırıldığı çalışmada, 250 °C’de betonun durabilitesi zarar görse de basınç dayanımının arttığı belirtilmiştir. Aynı çalışmada basınç dayanımının, 450 °C’de %4-15 arasında azaldığı, 650 °C’de dayanımın yaklaşık yarısını kaybettiği, 800°C’de de geriye başlangıçtaki dayanımının %20-30’unun kaldığına işaret edilmiştir.

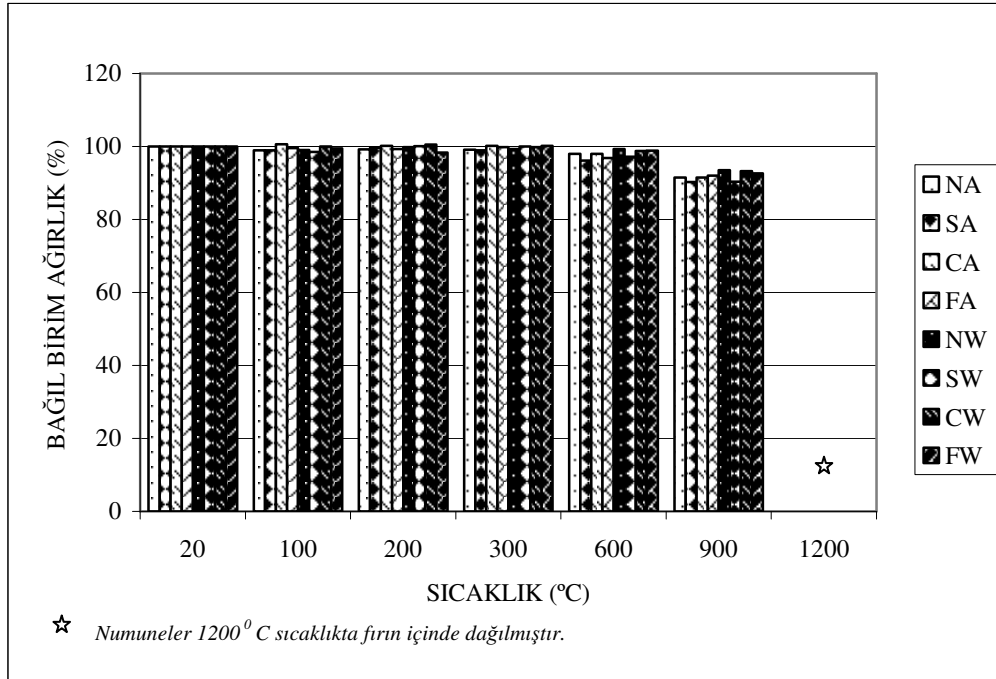
Xiao ve König’in (2004) araştırmasında, soğutma şeklinin basınç dayanımının değişiminde etkin bir rolünün olduğu sonucuna varılmıştır.

4.5 Birim Ağırlık ve Su Emme Deneylerinin Sonuçlarının Değerlendirilmesi ve İrdelenmesi

Birim ağırlığın ve su emme oranlarının sıcaklıkla değişimi incelenmiş, deney sonuçları Ek Çizelge 10-11’de verilmiştir. Kontrol numunelerinde en düşük birim ağırlık 2351 kg/m^3 ile yüksek fırın cürufu katkılılarda gözlenirken en yüksek 2388 kg/m^3 ile silis dumanı katkılılarda gözlenmiştir.

Deney sonuçlarına göre, birim ağırlık, önemli bir değişiklik olmamasına karşın tüm gruplarda sıcaklık arttıkça azalmaktadır. Belirgin azalmalar özellikle 900°C ’de gözlenmiştir (Şekil 4.12). Genel olarak soğutma şeklinin etkisi pek görülmemekle birlikte suda soğutulan numunelerin birim ağırlığındaki azalma havada soğutulanlara nazaran daha düşüktür.

Tüm gruplarda birim ağırlıktaki ortalama azalma 600°C ’de %2,2, 900°C ’de %8,2’dir. Birim hacim ağırlıktaki en fazla azalma silis dumanı katkılı grupta görülürken, en iyi performansı havada soğutulan gruplarda uçucu kül katkılı numuneler, suda soğutulan gruplarda katkısız numuneler göstermiştir. Sıcaklığın etkisi ile serbest ve kimyasal bağlı suyun buharlaşması, malzemenin genleşerek hacminin artması birim ağırlığın azalmasına sebep olmaktadır (Aköz vd., 1995; Anderberg, 2003).

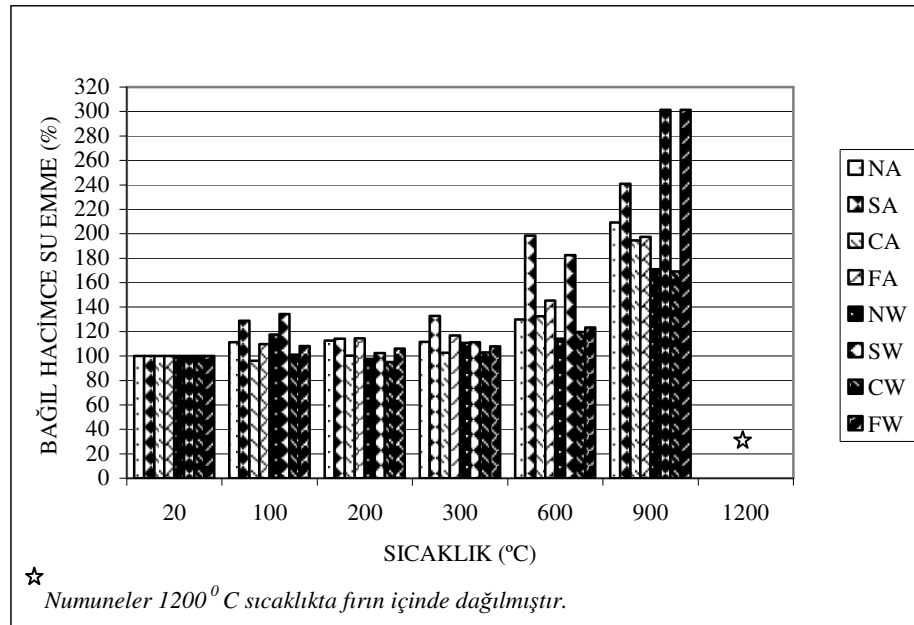


Şekil 4.12 Beton numunelerin birim ağırlık-sıcaklık ilişkisi

Mineral katkıların, betonun dayanıklılığını arttıran fonksiyonlarının en önemlisi beton boşluk yapısını iyileştirmesi ve dolayısı ile geçirimliliği azaltmasıdır (Uyan vd., 1998). Silis dumanı çok ince taneli olması nedeni ile, çimento hamuru-agrega arayüzü ve çimento hamuru içindeki boşlukları doldurarak, kılcal boşlukların azalmasını sağlar (Yüzer 1998).

Hacimce su emme deneyi sonuçlarına (Ek Çizelge 11) göre, kontrol numunelerinde silis dumanı katkıları %7,3 ile en düşük hacimce su emme oranını göstermiştir. Diğer kontrol numunesi gruplarında ise hacimce su emme oranları birbirlerine çok yakın değerlerde olup oranlar %10,3 ile %11,3 arasında değişmektedir (Şekil 4.13).

Yüksek sıcaklık etkisinde silis dumanı katkılı tüm gruplarda diğer gruplara nazaran su emme oranındaki artış daha fazladır. Örneğin 600 °C’de silis dumanı katkılı gruplarda artış oranı %83 ile %98 arasında değişirken, diğer gruplarda bu oran %14 ile %45 arasındadır. Tüm gruplarda 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.



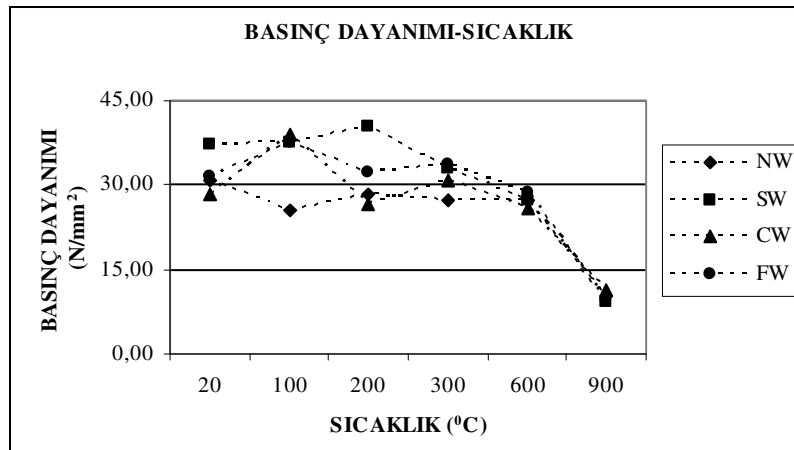
Şekil 4.13 Beton numunelerin hacimce su emme-sıcaklık ilişkisi

5. BASINÇ DAYANIMI-RENK DEĞİŞİMİ İLİŞKİSİNİN ARAŞTIRILMASI

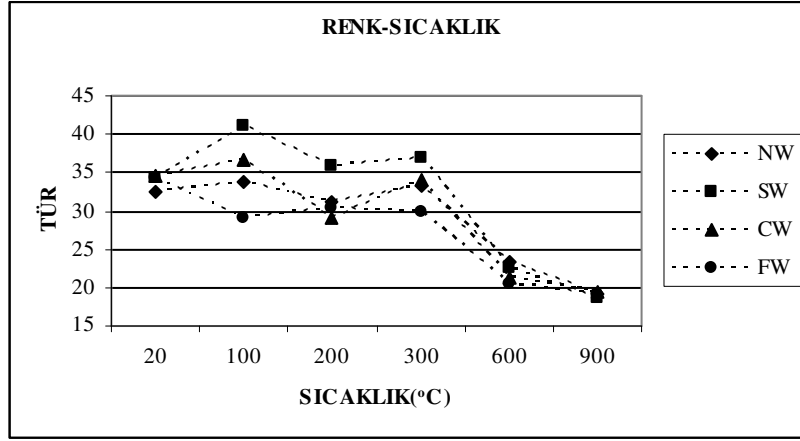
Bölüm 2.2.3.7’de açıklanan Yüzer vd. (2001) tarafından yapılan Munsell renk dizgesinin kullanıldığı deneysel çalışmada, yüksek sıcaklığın silis esaslı agregaya kullanılan, silis dumanı katkılı ve katkısız harçlara olan etkileri araştırılmış, harçların basınç dayanımında ve renginde benzer değişikliklerin olduğu görülmüş, rengin tür bileşeni ile basınç dayanımı arasında bir ilişki kurulabileceği sonucuna varılmıştır. Yine aynı bölümde açıklanan farklı agregaya 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 agregaya türüne bağlı olarak basınç dayanımı-renk değişimi ilişkisi araştırılmıştır (Kızılkant, 2004). Yüksek sıcaklık etkisinde kalan harcın yüzey rengi ölçülerek, harcın ve/veya betonun basınç dayanımının tahmin edilebileceği yargısına varılmıştır.

Konu ile ilgili daha önce yapılmış diğer çalışmalarda betonun renk değişimi ile basınç dayanımı arasında herhangi bir ilişki kurulmamış, renk ölçümünün agregadan bağımsız olması ve harç fazında yapılması gerektiği belirtilmiştir (Short vd., 2001).

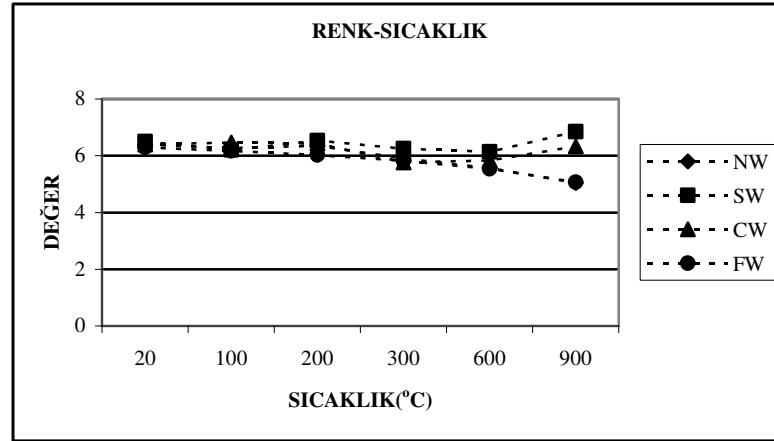
Bu çalışma kapsamında Bölüm 3’te açıklandığı gibi silis esaslı agregaya ve mineral katkı türleri ile üretilmiş beton numunelere yüksek sıcaklığın etkisi mekanik ve fiziksel deneyler ile araştırılmış, yapılan deneylerden elde edilen sonuçlara göre yüksek sıcaklık etkisinde, betonun basınç dayanımının azaldığı, aynı zamanda yüzey renginin de yeşilimsi sarıdan kırmızıya doğru değişerek kırmızımsı sarı olduğu, ayrıca doymuşluk bileşeni ve betonun basınç dayanımında ortaya çıkan değişimler arasında ters orantılı olarak ilişki kurulabileceği görülmüştür (Şekil 5.1-5.4).



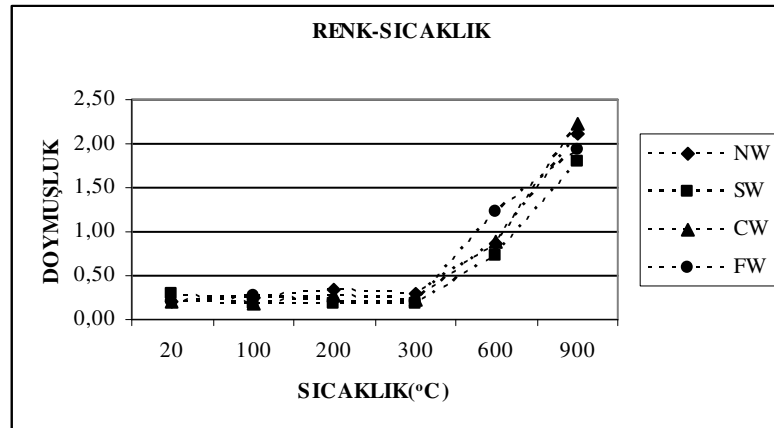
Şekil 5.1 Betonda basınç dayanımı-sıcaklık ilişkisi



Şekil 5.2 Betonda renk değişimi (TÜR)-sıcaklık ilişkisi



Şekil 5.3 Betonda renk değişimi (DEĞER)-sıcaklık ilişkisi



Şekil 5.4 Betonda renk değişimi (DOYMUŞLUK)-sıcaklık ilişkisi

Betonun basınç dayanımında sıcaklığa bağlı olarak meydana gelen değişim ile rengin tür bileşeninde meydana gelen değişim karşılaştırıldığında, Şekil 5.1 ve Şekil 5.2’de görüldüğü gibi benzerlik vardır. Rengin değer bileşeninde Şekil 5.3’te görüldüğü gibi yüksek sıcaklıkla birlikte önemli bir değişim gözlenmemiştir. Basınç dayanımı ile rengin doymuşluk bileşeni arasında ise Şekil 5.1 ve 5.4’ te görüldüğü gibi ters orantılı bir benzerlik görülmektedir. Benzer durum Şekil 4.5 ve Şekil 4.7’de görüldüğü gibi, rengin tür ve doymuşluk bileşenleri yüzeyden itibaren derinliğe bağlı olarak anlamlı bir değişiklik göstermiştir. Buradan, yangın görmüş yapılarda beton yüzeyindeki rengin incelenmesi, tür ve doymuşluk bileşenlerinin değerlendirilmesi sonucundan elde edilen verilerin, basınç dayanımındaki değişim hakkında fikir vereceği söylenebilir. Yangın geçirmiş yapılarda beton kalitesinin belirlenmesinde, renk ölçümünün tahribatsız deney yöntemi olarak kullanılabilirliğini araştırmak amacıyla, her sıcaklık etkisinden sonra numunelerin renk özelliği, tür, değer ve doymuşluk bileşenleri ile sayısal olarak belirlenmiş, basınç dayanımı ile renk değişimi ilişkilendirilmiştir.

Yüksek sıcaklığa maruz betonun basınç dayanımını tahmin etmek için, istatistiksel yöntemden yararlanarak yüzey rengi ile betonun basınç dayanımı arasında korelasyon katsayısı yüksek ($r=0,84$) 5.1 bağıntısı elde edilmiştir. Bağıntının elde edilmesinde 132 adet beton numunenin deney sonucundan yararlanılmıştır.

Yüksek sıcaklık etkisinde beton numuneler için;

$$f_{teo}=e^{4,151-0,014H+0,0018V-0,609C} \quad 5.1$$

Bağıntıda, H, rengin tür bileşeni, V, değer bileşeni, C, doymuşluk bileşeni, f_{teo} , teorik basınç dayanımıdır.

6. SONUÇLAR

Yüksek sıcaklık etkisinde kalan betonun fiziksel ve mekanik özelliklerindeki değişimin araştırıldığı bu çalışma kapsamında, silis esaslı agregaya ve silis dumanı, uçucu kül, cüruf gibi farklı mineral katkıları kullanılarak üretilen beton numuneleri yüksek sıcaklığa maruz bırakılmış, fiziksel ve mekanik özelliklerindeki değişimlerin belirlenmesi için kontrol deneyleri yapılmıştır. Yüksek sıcaklık etkisinde kalan betonda yüzey rengi ölçülerek, basınç dayanımındaki değişimin tahmini için bir ilişki önerilmiştir. Deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlar aşağıda açıklanmıştır.

- Yüksek sıcaklık etkisinden sonra suda soğutmanın zararlı etkisi tüm gruplarda havada soğutmaya nazaran daha fazla olmuştur. Diğer soğutma türlerinin etkisi ayrıca incelenmelidir.
- Yüksek sıcaklık etkisinde kalan betonların birim ağırlıklarında önemli bir değişiklik olmamış ancak 900°C’de birim ağırlıklar azalmıştır. Hacimce su emme oranları özellikle 600°C ve daha yüksek sıcaklıklarda ani artışlar göstermiştir.
- Çimento hamurunda boşlukları azaltan ve daha yoğun mikro boşluk oluşmasını sağlayan silis dumanı, kontrol numunelerinde ses geçiş sürelerini kısaltmış, en yüksek ses geçiş hızlarını vermiştir. Diğer katkıların kontrol numunelerinde ultrases geçiş hızına etkisi olmamış, bunların ses geçiş hızı katkısız numuneye yakın değerler vermiştir. Yüksek sıcaklık etkisi ile betonlarda artan boşluklardan dolayı, ultrases geçiş hızları tüm gruplarda sıcaklık yükseldikçe azalmıştır.
- Sıcaklık arttıkça çekme dayanımı değişimi her grupta farklı gözlenirken suda soğutulan grupların çekme dayanımları genel olarak sıcaklık artışıyla düşmüştür. Yüksek fırın cürufu katkılı havada soğutulan numuneler tüm sıcaklıklarda en iyi performansı göstermiştir. 900 °C’de çekme dayanımı ortalama %80 azalmıştır.
- Munsell renk dizgesinin kullanıldığı bu çalışmada, rengin tür bileşeni sıcaklık etkisi ile numunelerde yeşilimsi sarıdan kırmızıya doğru değişmiştir. Değer bileşeninde önemli bir değişiklik gözlenmezken, rengin doymuşluk bileşeni 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.
- Betonların mekanik özelliklerindeki değişim, bazı farklılıklar olsa da sıcaklık artışı ile

dayanımların azalması şeklinde görülmüştür. Basınç dayanımı, havada soğutulan numunelerde 600°C'ye kadar artışı, 900°C'de belirgin bir azalma göstermiştir. Suda soğutulan gruplarda ise 100°C'den sonra dayanımlarda azalma görülmüş, bu azalma 300°C'den sonra daha belirgin hale gelmiştir.

- Yüksek sıcaklık etkisinde kalan puzolan katkılı numunelerin dayanım kaybında, puzolan katkısız numunelere göre önemli bir fark görülmemiştir. Ancak uçucu kül ve cüruf, silis dumanına göre daha iyi performans göstermiştir.
- Yüksek sıcaklık etkisinde kalan betonların renginin tür bileşeninde yeşilimsi sarıdan kırmızıya doğru bir değişim gözlenmiş, bu değişim 600°C'de belirgin hale gelmiştir. Renkte meydana gelen değişim ile basınç dayanımındaki değişim arasında, havada soğutulanlarda 300°C'ye, suda soğutulanlarda 900°C'ye kadar paralellik gözlenmiştir. Buradan, renk incelemesi ile betonun hangi sıcaklığa maruz kaldığı, dolayısı ile basınç dayanımındaki değişim hakkında fikir edinilebileceği sonucuna varılmıştır.
- 1200°C'de beton numuneler fırın içinde dağılmıştır.
- Yüksek sıcaklık etkisinde, silis esaslı agregası ve farklı puzolan katkıları ile üretilen betonun basınç dayanımındaki değişim ile renk bileşenleri arasında ilişki kurulmuş, korelasyon katsayısı yüksek bir bağıntı elde edilmiştir:

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

Sonuç olarak bu bağıntıdan yararlanılarak yüksek sıcaklık etkisinde kalan betonun yüzey rengi ölçülecek, rengin, Tür (H), Değer (V) ve Doymuşluk (C) bileşenleri belirlenecek, bu agregası türü için betonun basınç dayanımı tahmin edilebilecektir.

- Rengin tür ve doymuşluk bileşenleri yüzeyden itibaren derinlikle anlamlı bir değişiklik göstermişlerdir. Buradan yüksek sıcaklık etkisinde kalan betondan karot numune alınarak, betonun rengindeki değişiklikler derinliğe bağlı olarak da incelenebilir. Yangın esnasında en önemli parametre olan aderans dayanımının kritik sıcaklığa ulaşmış ve donatının eriştiği sıcaklık tahmin edilebilir.

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.
- Aköz F. ve Yüzer N., (1994), “Yüksek Sıcaklığın Nedenleri ve Betonarme Elemanlara Etkileri”, Yıldız Teknik Üniversitesi Dergisi, sayı 3, İstanbul.
- Aköz F., Yüzer N. ve Koral S., (1995), “Portland Çimentolu ve Silis Dumanı Katkılı Harçların Fiziksel ve Mekanik Özelliklerine Yüksek Sıcaklığın Etkileri”, İMO Teknik Dergi, sayı 1, İstanbul.
- Alarcon-Ruiz 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, sayı 35, sayfa 609-613.
- Allen D.C. ve Desai P.M., (1967), “The Influence of Aggregate on the Behaviour of Concrete at Elevated Temperatures”, Nuclear Engineering and Design, sayı 6, sayfa 75-77.
- Alonso C., Andrade C. ve Khoury G.A., (2003a), “Porosity&Microcracking”, International Centre for Mechanical Sciences, Course on Effect of Heat on Concrete, Udine/Italy.
- Alonso C., Andrade C. ve Castellote M. ve Khoury G.A., (2003b), “Microstructure-Solid Phases”, International Centre for Mechanical Sciences, Course on Effect of Heat on Concrete, Udine/Italy.
- Anderberg Y., (2003), “Thermal Properties & 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, bölüm 15.
- ASTM C 597-02, (2002), “Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete”.
- ASTM D 1535-68, (1974), “Specifying Color by The Munsell System”.
- Avcı A.U., (1984), “Dökümde Enerji Tasarrufu”, Yıldız Teknik Üniversitesi Yayınları, sayı178, İstanbul.
- Aydın S., Baradan B., (2003), “Yüksek Sıcaklığa Dayanıklı Geliştirilmesi”, TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası 5. Ulusal Beton Kongresi, sayfa 451-460, İstanbul.
- Binaların Yangından Korunması Hakkında Yönetmelik, (2002), Resmi Gazete, tarih 26.7.2002, sayı 24827.

Baradan B., Yazıcı H. ve Ün H., (2002), “Betonarme Yapılarda Kalıcılık (Durabilite)”, Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Yayınları, yayın no 298, İzmir.

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

CEB, Bulletin D’Information, (1991), “Fire Design of Concrete Structures”, Lausanne.

Chan Y.N., 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, sayı 30, sayfa 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 on 13-19 October 1993, sayfa 263-268.

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

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

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

Diederichs U. ve Schneider U., (1981) “Bond Strength at High Temperatures”, Magazine of Concrete Research, sayı 33, sayfa 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.

Guise S.E., Short N.R. ve 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.

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

Haksever A., (1991), “Yangın Odalarının Teorik-Nümerik Yangın Analizleri İçin Modelleştirilmesi”, Akdeniz Üniversitesi Isparta Mühendislik Fakültesi Dergisi, sayı 6, sayfa 57-66.

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

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

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

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

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

Khoury G.A., (2003c), "Fire & Assessment", 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.

Li M., Qian C. ve Sun W., (2004), "Mechanical Properties of High-Strength Concrete After Fire", Cement and Concrete Research, sayı 34, sayfa 1001-1005.

Luke J.T., (1996), "The Munsell Color System: A Language for COLOR" Fairchild Publications, USA.

Neville A.M., (2000), "Properties of Concrete", Fourth Edition, Longman Scientific and Technical, New York/USA.

Onaran K., (2000), "Malzeme Bilimi", Yedinci Basım, Bilim Teknik Yayınevi, İstanbul.

Öztürk L.D., (2002), "Munsell Renk Örnekleri Yansıtma Çarpanlarının Rengin Bileşenlerine Göre Değişimi", Yıldız Teknik Üniversitesi Dergisi, sayı 2, sayfa 19-29.

Paksoy A.S., (1999), "Boya El Kitabı", TMMOB Kimya Mühendisleri Odası, İstanbul.

Papayianni I. ve Valliasis Th., (2005), "Heat Deformation of Fly Ash Concrete", Cement & Concrete Composites, sayı 27, sayfa 249-254.

Perkins P.H., (1986), "Repair, Protection and Waterproofing, of Concrete Structures", Elsevier Applied Science Publishers Ltd., England.

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, sayı 31, sayfa 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, Uncorrected proof.

Postacıoğlu B., (1987), "Beton", Cilt 2, Teknik Kitaplar Yayınevi, İstanbul.

Ramakrishnan V., Shafai H.F. ve Wu G., (1991) "Cyclic Heating and Cooling Effects on Concrete Durability", Concrete Durability.

Riley, M.A., (1991), "Possible New Method for the Assessment of Fire Damaged Concrete", Magazine of Concrete Research, sayı 43, sayfa 87-92.

Sakr K. ve EL-Hakim E., (2005), "Effect of Temperature or Fire on Heavy Weight Concrete Properties", Cement and Concrete Research, sayı 35, sayfa 590-596.

Savva A., Manita P. ve Sideris K.K., (2005), "Influence of Elevated Temperatures on the Mechanical Properties of Blended Cement Concretes Prepared with Limestone and Siliceous Aggregates", Cement & Concrete Composites, sayı 27, sayfa 239-248.

Schrefler B.A., Brunello P., Gawin D., Majorana C.E. ve Pesavento F., (2002), "Concrete at High Temperature with Application to Tunnel Fire", Computational Mechanics, sayı 29, sayfa

43-51.

Schrefler B.A., Gawin D., Khoury G.A. ve Majorana C.E., (2003), “Physical, Mathematical & Numerical Modelling”, International Centre for Mechanical Sciences, Course on Effect of Heat on Concrete, Udine/Italy.

Shoaib M.M., Ahmed S.A. ve Balaha M.M., (2001), “Effect of Fire and Cooling Mode on the Properties of Slag Mortars”, Cement and Concrete Research, sayı 31, sayfa 1533-1538.

Short N.R., Purkiss, J.A. ve Guise, S.E., (2001), “Assesment of Fire Damaged Concrete Using Colour Image Analysis”, Cement and Concrete Research, sayı 15, sayfa 9-15.

Sirel Ş., (1974), “Kuramsal Renk Bilgisi”, Kutulmuş Matbaası, İstanbul.

Taşdemir M.A., Bayramov F., Ağar Ş., Yerlikaya M., (2005), “Çelik Tel Donatılı Betonların Performansa Dayalı Tasarımı”, TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası 6. Ulusal Beton Kongresi, sayfa 33-44, İstanbul.

TS EN 196-1, (2002), “Çimento Deney Metotları-Bölüm 1: Dayanım Tayini”.

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

Uyan M., Özcan M. ve Yıldırım H., (1998), “Tunçbilek ve Seyitömer Uçucu Küllerinin Betonun Kılcallık ve Su Emme Özelliklerine Etkisi”, D.S.İ. Beton-Çimento ve Boya Semineri, Ankara.

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

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

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

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

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

Yüzer N., (1998), “Silis Dumanı Katkılı Betonarme Elemanlara Klorür Etkisinin Hızlandırılmış Korozyon Deneyi ile Araştırılması”, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı Doktora Tezi.

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

Yüzer N., Aköz F., Öztürk L.D. ve Kızılkant A.B., (2003), “Yüksek Sıcaklık Etkisinde Kalan Çimento Harcında Hasar Oranının Renk Ölçümü ile Araştırılması”, TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası 5. Ulusal Beton Kongresi, sayfa 461-470, İstanbul.

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

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

Yüzer N., Aköz F., Kızılkanaat A.B., Mahsanlar N., (2005), “Yüksek Sıcaklık Etkisinde Kalan Betonda Hasar Oranının Renk Ölçümü ile Araştırılması”, TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası 6. Ulusal Beton Kongresi, sayfa 81-90, 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, sayı 32, sayfa 363-371.

EKLER

Ek Çizelge 1	Beton numunelerin renk değişimi (TÜR)
Ek Çizelge 2	Beton numunelerin renk değişimi (DEĞER)
Ek Çizelge 3	Beton numunelerin renk değişimi (DOYMUŞLUK)
Ek Çizelge 4	Beton numunelerin derinliğe bağlı renk değişimi (TÜR)
Ek Çizelge 5	Beton numunelerin derinliğe bağlı renk değişimi (DEĞER)
Ek Çizelge 6	Beton numunelerin derinliğe bağlı renk değişimi (DOYMUŞLUK)
Ek Çizelge 7	Beton numunelerin ultrases geçiş hızları (mm/μs)
Ek Çizelge 8	Beton numunelerin çekme dayanımları (N/mm ²)
Ek Çizelge 9	Beton numunelerin basınç dayanımları (N/mm ²)
Ek Çizelge 10	Beton numunelerin birim ağırlıkları (g/cm ³)
Ek Çizelge 11	Beton numunelerin hacimce su emme değerleri (%)

Ek Çizelge 1 Beton numunelerin renk değişimi (TÜR)

Sıcaklık (°C)	NA	NW	SA	SW	FA	FW	CA	CW
20	32,4		34,2		34,2		34,6	
100	39,1	33,9	43,9	41,2	28,8	29,2	36,3	36,5
200	33,4	31,2	40,0	36,0	30,4	30,3	30,2	29,1
300	39,7	33,3	39,9	36,9	29,9	29,9	36,4	34,0
600	22,7	23,4	22,4	22,5	20,4	20,4	20,1	21,3
900	19,2	19,2	19,0	18,7	19,8	19,3	19,9	19,4
1200	-	-	-	-	-	-	-	-

Ek Çizelge 2 Beton numunelerin renk değişimi (DEĞER)

Sıcaklık (°C)	NA	NW	SA	SW	FA	FW	CA	CW
20	6,4		6,5		6,3		6,4	
100	6,6	6,3	6,3	6,2	6,2	6,2	6,5	6,5
200	6,9	6,4	6,6	6,5	6,3	6,0	6,7	6,4
300	6,5	5,9	6,6	6,3	6,2	5,8	5,9	5,8
600	5,9	5,6	6,3	6,1	6,0	5,5	6,3	5,8
900	7,1	5,0	6,4	6,9	5,6	5,1	6,8	6,3
1200	-	-	-	-	-	-	-	-

Ek Çizelge 3 Beton numunelerin renk değişimi (DOYMUŞLUK)

Sıcaklık (°C)	NA	NW	SA	SW	FA	FW	CA	CW
20	0,2		0,3		0,2		0,2	
100	0,16	0,24	0,17	0,19	0,28	0,28	0,21	0,19
200	0,27	0,33	0,12	0,19	0,22	0,21	0,24	0,27
300	0,20	0,30	0,14	0,18	0,29	0,21	0,22	0,23
600	0,82	0,87	0,72	0,73	1,12	1,23	0,94	0,88
900	2,11	2,12	2,18	1,80	1,98	1,92	1,84	2,23
1200	-	-	-	-	-	-	-	-

Ek Çizelge 4 Beton numunelerin derinliğe bağlı renk değişimi (TÜR)

Derinlik (cm)	NA	NW	SA	SW	FA	FW	CA	CW
YÜZEY	19,2	19,2	19,0	18,7	19,8	19,3	19,9	19,4
1	23,0	25,0	20,4	29,4	23,8	30,1	26,0	24,5
2	26,5	34,2	27,4	45,1	27,3	33,7	27,3	32,9
3	35,7	38,7	35,8	59,3	27,2	39,1	36,1	33,0
4	37,9	49,0	42,3	65,3	32,4	43,0	41,5	36,6

Ek Çizelge 5 Beton numunelerin derinliğe bağlı renk değişimi (DEĞER)

Derinlik (cm)	NA	NW	SA	SW	FA	FW	CA	CW
YÜZEY	7,14	5,04	6,44	6,85	5,58	5,07	6,81	6,33
1	4,74	4,32	5,35	4,85	4,58	4,48	4,78	4,88
2	4,71	4,18	4,94	4,87	4,32	4,80	4,95	4,70
3	4,27	4,12	4,68	4,50	4,15	5,03	4,90	4,65
4	4,30	4,73	4,67	5,13	4,25	4,57	5,33	4,88

Ek Çizelge 6 Beton numunelerin derinliğe bağlı renk değişimi (DOYMUŞLUK)

Derinlik (cm)	NA	NW	SA	SW	FA	FW	CA	CW
YÜZEY	2,11	2,12	2,18	1,80	1,98	1,92	1,84	2,23
1	0,74	0,33	0,60	0,22	0,62	0,22	0,48	0,45
2	0,34	0,16	0,18	0,15	0,40	0,18	0,23	0,17
3	0,16	0,14	0,10	0,20	0,27	0,17	0,20	0,20
4	0,18	0,18	0,23	0,33	0,20	0,10	0,10	0,13

Ek Çizelge 7 Beton numunelerin ultrases geçiş hızları (mm/μs)

Sıcaklık (°C)	NA	NW	SA	SW	FA	FW	CA	CW
20	5,05		5,34		5,09		5,02	
100	4,14	4,20	4,23	4,03	4,20	4,19	4,10	4,14
200	4,12	4,08	4,24	4,23	4,23	4,21	4,20	4,14
300	4,08	4,04	4,21	4,18	4,07	4,13	4,13	4,09
600	2,02	2,47	2,61	2,68	2,61	2,72	2,69	2,75
900	-	-	-	-	-	-	-	-
1200	-	-	-	-	-	-	-	-

Ek Çizelge 8 Beton numunelerin yarmada çekme dayanımları (N/mm²)

Sıcaklık (°C)	NA	NW	SA	SW	FA	FW	CA	CW
20	3,43		4,47		3,45		2,89	
100	3,48	3,21	3,34	3,70	3,02	3,19	3,57	2,64
200	3,58	3,25	4,54	4,24	2,99	2,90	3,41	3,48
300	3,35	2,97	4,96	4,03	3,51	3,03	3,59	2,79
600	3,72	2,23	3,03	1,77	2,63	1,79	3,57	1,51
900	0,91	0,48	0,63	0,37	0,74	0,54	0,91	0,51
1200	-	-	-	-	-	-	-	-

Ek Çizelge 9 Beton numunelerin basınç dayanımları (N/mm²)

Sıcaklık (°C)	NA	NW	SA	SW	FA	FW	CA	CW
20	30,73		37,12		31,40		28,23	
100	37,06	25,45	38,79	37,63	40,28	37,63	40,77	38,86
200	30,67	28,48	42,11	40,39	38,90	32,42	31,23	26,51
300	33,17	27,24	40,39	32,85	36,04	33,65	34,38	30,79
600	43,74	27,35	44,18	27,19	38,30	28,76	43,35	26,00
900	15,37	10,25	13,04	9,31	15,63	9,44	19,58	11,33
1200	-	-	-	-	-	-	-	-

Ek Çizelge 10 Beton numunelerin birim ağırlıkları (kg/m³)

Sıcaklık (°C)	NA	NW	SA	SW	FA	FW	CA	CW
20	2371		2388		2361		2351	
100	2346	2349	2364	2353	2350	2350	2367	2351
200	2353	2367	2380	2390	2344	2322	2355	2365
300	2350	2256	2364	2388	2345	2365	2355	2347
600	2324	2354	2297	2321	2286	2333	2303	2322
900	2170	2217	2156	2158	2172	2186	2152	2193
1200	-	-	-	-	-	-	-	-

Ek Çizelge 11 Beton numunelerin hacimce su emme değerleri (%)

Sıcaklık (°C)	NA	NW	SA	SW	FA	FW	CA	CW
20	10,28		7,28		10,29		11,25	
100	11,44	12,10	9,37	9,77	11,28	11,13	10,81	11,36
200	11,58	10,05	8,31	7,45	11,78	10,92	11,27	10,69
300	11,46	11,39	9,65	8,09	12,03	11,09	11,55	11,59
600	13,36	11,73	14,44	13,28	14,96	12,70	14,93	13,47
900	21,52	17,58	17,53	21,93	20,32	19,97	21,91	19,03
1200	-	-	-	-	-	-	-	-

ÖZGEÇMİŞ

Doğum tarihi 17.06.1979

Doğum yeri Avustralya

Lise 1990-1996 K.Maraş Ç.E. Anadolu Lisesi
1996-1997 K.Maraş Lisesi

Lisans 1997-2002 Yıldız Teknik Üniversitesi
İnşaat Fakültesi
İnşaat Mühendisliği Bölümü

Yüksek Lisans 2003-Devam ediyor Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Müh. Anabilim Dalı, Yapı Programı

Çalıştığı kurum 2003-Devam ediyor YTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Araştırma Görevlisi