

154350

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK SICAKLIK ETKİSİNDE KALAN HARCIN
BASINÇ DAYANIMI-RENK DEĞİŞİMİ İLİŞKİSİNİN
ARAŞTIRILMASI

İnşaat Müh. Ahmet Beşer KIZILKANAT

FBE İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı Yapı Programında
Hazırlanan

YÜKSEK LİSANS TEZİ

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

Prof. Dr. Fevaiye AKÖZ

Prof. Dr. Turan ÖZTURAN

İSTANBUL, 2004

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
SİMGE LİSTESİ	iv
KISALTIMA LİSTESİ	v
ŞEKİL LİSTESİ	vi
ÇİZELGE LİSTESİ	viii
ÖNSÖZ	ix
ÖZET	x
ABSTRACT	xi
1. GİRİŞ	12
2. GENEL BİLGİ.....	13
2.1 Yüksek Sıcaklık Kaynakları	13
2.1.1 Yangın.....	13
2.1.2 Endüstri Fırın Bacaları.....	14
2.1.3 Hava Alanı Pistleri.....	14
2.2 Yüksek Sıcaklığın Betonarme Elemanlara Etkileri	14
2.2.1 Yüksek Sıcaklığın Betonarme Çeliğine Etkileri.....	16
2.2.2 Yüksek Sıcaklığın Betona Etkileri.....	16
2.2.2.1 Çimento Hamuru	17
2.2.2.2 Agregası.....	18
2.2.2.3 Mineral Katkı Malzemeleri.....	19
2.2.3 Yüksek Sıcaklığın Betonun Fiziksel Özelliklerine Etkileri.....	20
2.2.3.1 Isı Yayımlı Katsayısı	21
2.2.3.2 Isı İletkenlik Katsayısı	22
2.2.3.3 Genleşme Katsayısı	22
2.2.3.4 Özgül Isı.....	22
2.2.3.5 Birim Hacim Ağırlığı.....	23
2.2.3.6 Renk.....	23
2.2.4 Yüksek Sıcaklığın Betonun Mekanik Özelliklerine Etkileri	29
2.2.4.1 Basınç Dayanımı.....	29
2.2.4.2 Çekme Dayanımı	31
2.2.4.3 Elastisite Modülü	32
3. DENEYSEL ÇALIŞMA.....	34
3.1 Numune Üretiminde Kullanılan Malzemeler	34
3.1.1 Agregalar	34
3.1.2 Çimento.....	35
3.1.3 Mineral Katkı.....	35

3.1.4	Kimyasal Katkı	36
3.2	Numune Üretimi	36
3.3	Isıtma-Soğutma Süreci.....	37
3.4	Kontrol Deneyleri	38
3.4.1	Renk Ölçümü	38
3.4.2	Ultrases Geçiş Hızının Belirlenmesi.....	38
3.4.3	Eğilme Deneyi	39
3.4.4	Basınç Deneyi.....	39
3.4.5	Kılcal Su Emme Deneyi	39
3.4.6	Birim Ağırlık ve Hacimce Su Emme.....	39
4.	DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ ve İRDELENMESİ.....	40
4.1	Renk Değişiminin Değerlendirilmesi ve İrdelenmesi.....	40
4.2	Ultrases Geçiş Değerlerinin Değerlendirilmesi ve İrdelenmesi	44
4.3	Eğilme Dayanımının Değerlendirilmesi ve İrdelenmesi	47
4.4	Basınç Dayanımının Değerlendirilmesi ve İrdelenmesi	48
4.5	Kılcal Su Emme Deneylerinin Sonuçlarının Değerlendirilmesi ve İrdelenmesi ...	50
4.6	Birim Ağırlık ve Su Emme Deneylerinin Sonuçlarının Değerlendirilmesi ve İrdelenmesi	52
5.	BASINÇ DAYANIMI-RENK DEĞİŞİMİ İLİŞKİSİNİN ARAŞTIRILMASI.....	56
6.	SONUÇLAR.....	58
	KAYNAKLAR.....	61
	EKLER.....	64
	ÖZGEÇMİŞ.....	71

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

Şekil 2.1 Standart Sıcaklık-Zaman Eğrisi (TS 1263, 1983)	14
Şekil 2.2 Soğuk işlem görmüş çeliğin aderans gerilmesi-sıyrılma ilişkisi (Diederichs ve Schneider, 1981)	15
Şekil 2.3 Farklı tür yapı çeliklerinin akma ve çekme dayanımları (Baradan vd., 2002)	16
Şekil 2.4 Çimento pastasındaki tobermoritin (CSH) sıcaklığa bağlı olarak dönüşüm (dehidratasyon) derecesi ve oranı (Scherefler vd., 2003)	18
Şekil 2.5 Betonun bağıl basınç dayanımının kullanılan agregaya türüne göre sıcaklıkla değişimi (Khoury, 1992)	19
Şekil 2.6 Yangın hasarı görmüş betonun izotermine bağlı özellikleri (Riley, 1991)	21
Şekil 2.7 Çeşitli betonlar için a ısı yayılım katsayısı (CEB, 1991)	22
Şekil 2.8 Ağırlık kaybının sıcaklıkla değişimi (Anderberg, 2003)	23
Şekil 2.9 Betonda sıcaklığa bağlı dayanım kaybı renk değişimi (Baradan vd., 2002)	24
Şekil 2.10 Farklı ışıkların tayf eğrileri (Sirel, 1974)	24
Şekil 2.11 Yüzeylerin, ışığın dalga boyu-yansıtma çarpanı grafiği (Sirel, 1974)	25
Şekil 2.12 Mor yüzeyin farklı ışıklardaki tayf eğrileri (Sirel, 1974)	26
Şekil 2.13 Munsell Renk Dizgesinde rengin 3 bileşeni (ASTM D 1535-68, 1974)	27
Şekil 2.14 Munsell Tür Çemberi (ASTM D 1535-68, 1974)	27
Şekil 2.15 Basınç dayanımının sıcaklıkla değişimi (Yüzer vd., 2001)	28
Şekil 2.16 Renklerin (Tür) sıcaklıkla değişimi (Yüzer vd., 2001)	28
Şekil 2.17 Yüzeyden itibaren sıcaklığın derinlikle değişimi (Short vd., 2001)	29
Şekil 2.18 Yüksek sıcaklık etkisindeki betonun yüzey renginin derinlikle değişimi (Short, 2001)	29
Şekil 2.19 Betonun basınç dayanımının yükleme durumuna göre sıcaklıkla değişimi (Neville, 2000)	30
Şekil 2.20 Basınç dayanımının soğutma şekline göre sıcaklıkla değişimi (Neville, 2000)	31
Şekil 2.21 Puzolan katkılı ve katkısız Betonların Çekme dayanımının sıcaklıkla değişimi (Guise vd., 1996)	31
Şekil 2.22 Eğilme dayanımının sıcaklıkla değişimi (Aköz vd., 1995)	32
Şekil 2.23 Betonun elastisite modülünün sıcaklıkla değişimi (Neville, 2000)	32
Şekil 3.1 Agregaların granülometrik eğrileri	35
Şekil 3.2 Ultrasonik yöntem ile ses geçiş süresinin belirlenmesi	38
Şekil 3.3 Kılcal su emme deney düzeneği	39
Şekil 4.1 Silis esaslı agregaya ile üretilen harçların renk değişimi (TÜR)-sıcaklık ilişkisi	41
Şekil 4.2 Kalker esaslı agregaya ile üretilen harçların renk değişimi (TÜR)-sıcaklık ilişkisi	41
Şekil 4.3 Silis esaslı agregaya ile üretilen harçların renk değişimi (DEĞER)-sıcaklık ilişkisi	42
Şekil 4.4 Kalker esaslı agregaya ile üretilen harçların renk değişimi (DEĞER)-sıcaklık ilişkisi	42
Şekil 4.5 Silis esaslı agregaya ile üretilen harçların renk değişimi (DOYMUŞLUK)-sıcaklık ilişkisi	44
Şekil 4.6 Kalker esaslı agregaya ile üretilen harçların renk değişimi (DOYMUŞLUK)-sıcaklık ilişkisi	44
Şekil 4.7 Silis esaslı agregaya ile üretilen harçların bağıl ses geçiş hızı-sıcaklık ilişkisi	45
Şekil 4.8 Kalker esaslı agregaya ile üretilen harçların bağıl ses geçiş hızı-sıcaklık ilişkisi	46
Şekil 4.9 Yüksek sıcaklık etkisindeki harcın boşluk yapısının değişimi (Alonso vd., 2003) ..	46
Şekil 4.10 Silis esaslı agregaya ile üretilen harçların eğilme dayanımı-sıcaklık ilişkisi	47
Şekil 4.11 Kalker esaslı agregaya ile üretilen harçların eğilme dayanımı-sıcaklık ilişkisi	48
Şekil 4.12 Silis esaslı agregaya ile üretilen harçların basınç dayanımı-sıcaklık ilişkisi	49
Şekil 4.13 Kalker esaslı agregaya ile üretilen harçların basınç dayanımı-sıcaklık ilişkisi	49
Şekil 4.14 Silis esaslı agregaya ile üretilen harçların kılcal su emme-sıcaklık ilişkisi	51
Şekil 4.15 Kalker esaslı agregaya ile üretilen harçların kılcal su emme-sıcaklık ilişkisi	51

Şekil 4.16 Silis esaslı agregaya ile üretilen harçların birim ağırlık-sıcaklık ilişkisi	53
Şekil 4.17 Kalker esaslı agregaya ile üretilen harçların birim ağırlık-sıcaklık ilişkisi.....	53
Şekil 4.18 Silis esaslı agregaya ile üretilen harçların hacimce su emme-sıcaklık ilişkisi.....	54
Şekil 4.19 Kalker esaslı agregaya ile üretilen harçların hacimce su emme-sıcaklık ilişkisi	55
Şekil 5.1 Silis esaslı agregaya ile üretilen harçların basınç dayanımı-sıcaklık ilişkisi	56
Şekil 5.2 Silis esaslı agregaya ile üretilen harçların renk değişimi (TÜR)-sıcaklık ilişkisi.....	56



ÇİZELGE LİSTESİ

Çizelge 3.1 Numune grupları.....	34
Çizelge 3.2 Agregaların fiziksel özellikleri.....	35
Çizelge 3.3 Kullanılan malzemelerin kimyasal analizi ve fiziksel özellikleri	36
Çizelge 3.4 Harç üretiminde kullanılan gerçek malzeme miktarları ve taze harç birim ağırlığı	37
Çizelge 4.1 Rengin türündeki değişimin büyüklüğü	40
Çizelge 4.2 Rengin değerindeki değişimin büyüklüğü.....	42
Çizelge 4.3 Rengin doyumuşluğundaki değişimin büyüklüğü.....	43



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 yakın ilgi ve desteğini gördüğüm Sayın Yrd.Doç.Dr. Nabi Yüzer'e, konu ile ilgili bilgi ve deneyimlerinden yararlandığım Sayın Prof.Dr. Fevziye Aköz'e, "Yangına Maruz Yapılarda Beton Basınç Dayanımı-Renk Değişimi İlişkisi" başlıklı araştırma projesini destekleyen Yıldız Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projesi Koordinatörlüğü'ne, "Yangına Maruz Kalan Yapılarda Beton Basınç Dayanımı-Renk Değişimi İlişkisinin Araştırılması" başlıklı araştırma projesini destekleyen TÜBİTAK'a, ayrıca Araş.Gör. Özgür Çakır'a, Araş.Gör. Nihat Kabay'a, Araş.Gör. Nesil Özçiftçiye, deneysel çalışmalarında yardımcı olan Tek. Halil Yavaşçı'ya, Mahmut Gülsoy'a, çalışmalarım boyunca her zaman yanımda olan, yardımlarını ve desteklerini esirgemeyen aileme sonsuz teşekkür ederim.



ÖZET

Herhangi bir nedenle yüksek sıcaklık etkisine maruz kalan betonarme elemanlarda betonun ve çeliğin mekanik ve fiziksel özelliklerinde değişiklikler meydana gelir. Bu değişikliklerin sonucu olarak betonda çatlama ve parça atma gözlenirken aderansta 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. Yapılan çalışmalarda yüksek sıcaklık etkisinde kalan betonun mekanik özelliklerinde olduğu gibi renk özelliğinde de önemli değişiklikler olduğuna işaret edilmektedir, ancak bu çalışmalarda betonun dayanımı ile renk değişimi arasında ilişki kurulmamıştır.

Bu çalışmada yüksek sıcaklığın ve söndürme türünün harcın fiziksel ve mekanik özelliklerine etkileri deneysel olarak araştırılmıştır. Bu amaçla Portland Çimentosu, silis ve kalker esaslı olmak üzere farklı agregalar ve %10 ikameli olarak katılan silis dumanı, uçucu kül, cüruf gibi farklı puzolanlar kullanılarak üretilen harçlar 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 Munsell Renk bileşenleri olan tür, değer ve doymuşluk, dijital renk ölçer ile sayısal olarak belirlenmiştir.

Deney sonuçlarından, yüksek sıcaklık etkisinde kalan harcın basınç dayanımında meydana gelen değişim ile, rengin tür bileşeninde meydana gelen değişimin paralellik gösterdiği tespit edilmiştir. Harcın basınç dayanımı değişimi ile renk değişimi arasında ilişki kurulmuş ve agrega türüne bağlı olarak iki farklı bağıntı elde edilmiştir. Bu bağıntılardan 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, harç, 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 previous studies, it has been observed that significant changes took place in the color of concrete just as the changes in the mechanical properties but no relationship has been established between the strength and the color change.

In this study, the effects of temperature and cooling regimes on the physical and mechanical properties of the mortar were observed. The mortar production was made with siliceous and calcareous aggregates, Portland cement, silica fume, fly ash and slag. Mineral admixtures replaced 10 % cement by weight. These mortars 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 digital spectro photometer.

Test results showed similarities in the change of compressive strength and color of mortar which exposed to high temperature. A relationship is established between compressive strength and the color change of mortar. Two separate formulas are formed based on different types of aggregate. These formulas are 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: Color, compressive strength, high temperature, mortar, pozzolan.

1. GİRİŞ

Konut, okul, fabrika, işyeri gibi binalar, tünel, köprü, petrol platformu gibi yapılar, işlevleri gereği veya yangın nedeni ile yüksek sıcaklık etkisinde kalabilirler. Yüksek sıcaklığın kaynaklarından biri olan yangının betona ve betonarme yapılara etkisi 1922'den günümüze kadar araştırılmaktadır. 10 yıl öncesine kadarki çalışmalarda yüksek sıcaklığın normal dayanımlı betona etkileri üzerinde odaklanılmıştı (Khoury, 2003). 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). 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 yol açmıştır (Khoury, 2003). Özellikle yangın gibi yüksek sıcaklığın oluşturduğu hasarlara ülkemizde de çok sık rastlanmaktadır.

Betonarme eleman yüksek sıcaklığa maruz kaldığında fiziksel ve mekanik özelliklerinde değişiklikler görülür. Bu değişiklikler, betonun basınç dayanımında ve elastisite modülünde azalma, çatlak oluşumu, parçalanma ve dağılma, çelikte ise akma dayanımı, duktilite ve çekme dayanımında azalmadır (Guise vd., 1996).

Yangın nedeni ile yüksek sıcaklık etkisine maruz kalan betonarme bir yapının yıkım yada onarımına karar vermek için yerinde ve laboratuvarında tahribatlı ve tahribatsız deneyler yapılmalıdır. Yerinde yapılan ilk inceleme görsel incelemedir, bu aşamada betonda çatlakların, dağılmaların, renk değişiminin olup olmadığı araştırılır (Guise vd., 1996).

Beton dayanımı ile renk değişimi ilkesinin araştırıldığı bu çalışmanın birinci bölümünde yüksek sıcaklığın betonun bileşenlerine, fiziksel ve mekanik özelliklerine etkileri ele alınmıştır. İkinci bölümde yüksek sıcaklık etkisi, farklı harçlar ve sıcaklıklar için deneysel olarak araştırılmış, üçüncü bölümde ise yapılan deneylerden elde edilen sonuçlar değerlendirilmiş ve irdelenmiştir. Dördüncü bölümde deneysel çalışma sonucu elde edilen veriler kullanılarak, harcın basınç dayanımı değişimi ile renk değişimi arasında ilişki kurulmuş ve harç üretiminde kullanılan agrega türüne bağlı olarak iki farklı bağıntı elde edilmiştir.

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 olarak gösterilebilir (Aköz ve Yüzer, 1994). Bu etkiler aşağıda sırası ile açıklanmıştır.

2.1.1 Yangın

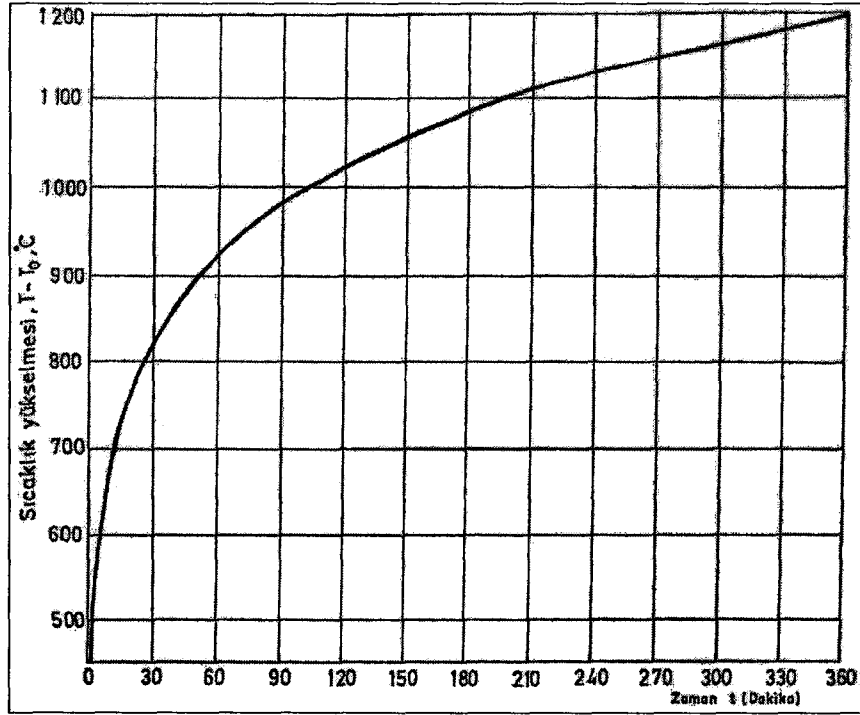
Yanma, yakacakların oksijenle hızlı bir şekilde reaksiyona girerek, yakacak içinde depolanmış bulunan enerjinin, ısı enerjisi biçiminde açığa çıktığı kimyasal bir işlemdir. Bu işlem sırasında çıkan enerji, genellikle sıcak gazlar şeklinde olmasına rağmen, çok küçük miktarlarda elektromanyetik (ışık),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

Yüksek sıcaklığa sebep olan yangın ise katı, sıvı ve/veya gaz halindeki maddelerin kontrol dışı yanması olayıdır. Araştırmalar, tabii bir yangının genel olarak ateşleme, yavaş yanma, ısınma ve soğuma olmak üzere dört fazdan oluştuğunu göstermektedir. Ateşleme ve yanma fazları tüm-parlama öncesi (pre-flashover), ısınma ve soğuma fazları ise tüm-parlama sonrası (post-flashover) fazları olarak adlandırılmaktadır. Tüm-parlama öncesi fazı gelişmekte olan yangın, tüm-parlama sonrası fazı ise gelişmiş olan yangın durumunu göstermektedir (Aköz ve Yüzer, 1994). Şekil 2.1'de verilen standart sıcaklık-zaman eğrisinde, sıcaklığın 10 dakika gibi kısa bir zamanda yaklaşık 650°C 'ye hızla yükseldiği ve yangın süresince de 1200°C 'ye ulaşabileceği görülmektedir, ISO-834 yangın eğrisi olarak tanımlanan bu eğri (2.1) bağıntısı ile ifade edilmektedir (TS 1263, 1983).

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

(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

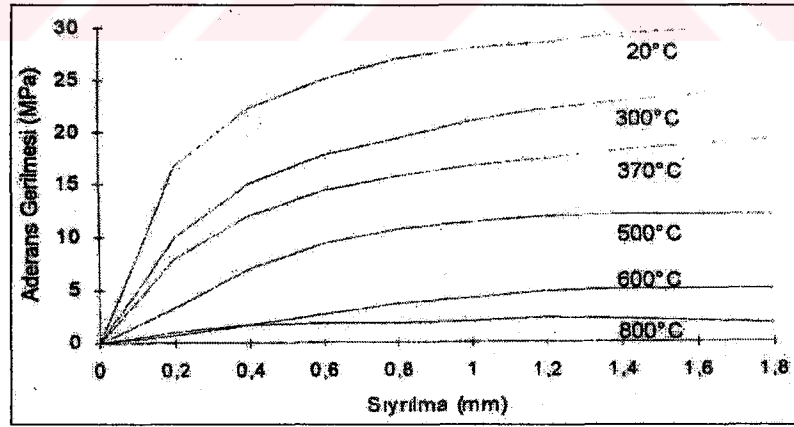
Uçakların kalkış ve inişlerindeki sürtünmeler ve jet motorlarından 260 km/saat hızla çıkan 196°C 'deki egzoz gazları, hava alanı pistlerinde sıcaklığın artmasına sebep olmaktadır. İniş ve kalkışlardaki tekrarlı ısınma ve soğuma etkisi ile pistlerde aşınma ve tozlanma görülmektedir. Pistler bu durumda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

2.2 Yüksek Sıcaklığın Betonarme Elemanlara Etkileri

Çelik ve beton yangınlık açısından A1 sınıfı "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 (pas payı) en az 4 cm kalınlığında beton ile kaplanmış olması gerekmektedir (Binaların Yangından Korunması Hakkında Yönetmelik, 2002).

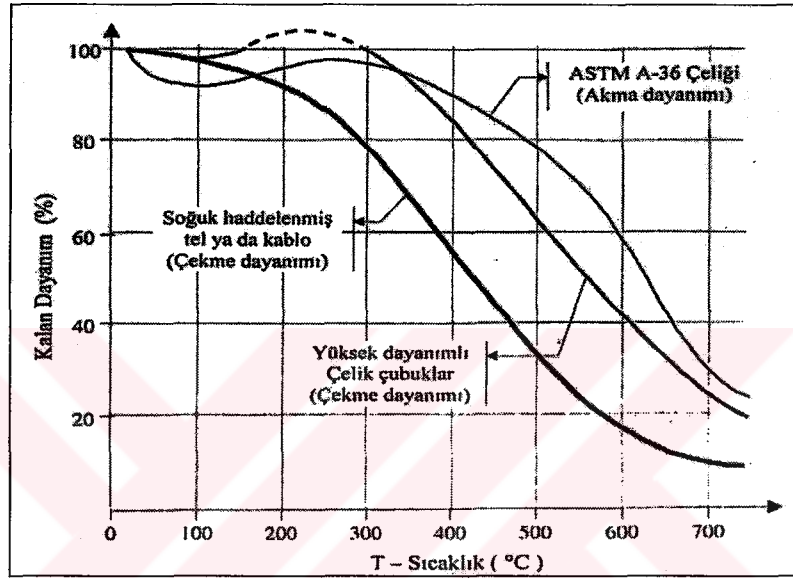
Yapılan deneysel çalışmalar, yüksek sıcaklığa maruz betonarme elemanların aderans dayanımının azaldığını ve betonarme yapıların yüksek sıcaklığa karşı davranışını belirlemedeki temel değişkenin aderans dayanımı olduğunu ortaya koymaktadır. Çünkü kritik beton sıcaklıkları, her zaman kritik aderans sıcaklığından 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 ulaşılabilir 600-1200°C 'de ise plastik deformasyon yapacağı bilinmektedir (Akman, 2000). Farklı tür yapı çeliklerinin akma ve çekme dayanımlarının sıcaklıkla değişimi Şekil 2.3 'de verilmiştir.



Şekil 2.3 Farklı tür yapı çeliklerinin akma ve çekme dayanımları (Baradan vd., 2002)

Yüksek sıcaklıklara 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).

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). Yüksek sıcaklığa maruz kalan beton, belirli bir süre için önemli bir zarar görmez, zehirli gaz veya duman çıkarmaz. Ancak bu dayanıklılık, sınırlı süre ve belirli sıcaklıklar için geçerlidir (Baradan vd., 2002). Örneğin 600°C 'ye maruz kalan beton dayanımının %70'ini kaybetmektedir (Akman, 2000).

Yüksek sıcaklığın betona etkisi, betonun maruz kaldığı sıcaklık ve sürenin yanı sıra çimento hamuru fazı ve agrega türüne bağlı olarak da değişir ve bu etki betonun basınç dayanımının belirgin bir şekilde azalması ile sonuçlanır (Akman, 2000; Riley, 1991). Çalışmanın konusu olması nedeni ile betonun yüksek sıcaklık etkisindeki davranışı, çimento hamuru, agregalar ve mineral katkı maddeleri gibi bileşenlerini ve özelliklerinin değişimi için ayrı ayrı ele alınmıştır.

2.2.2.1 Çimento Hamuru

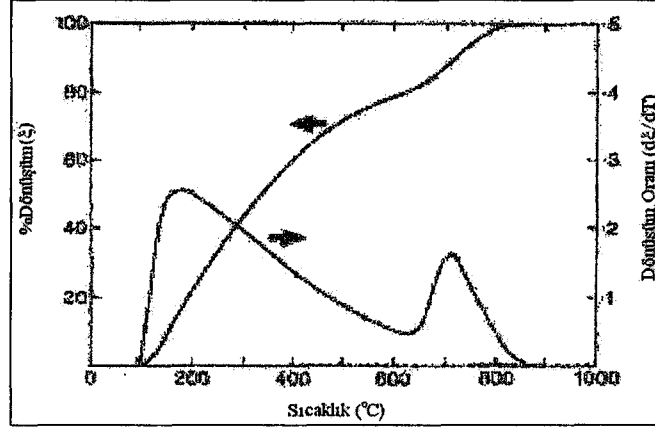
Çimento hamuru ilk ısıtma boyunca oldukça kararsız bir bileşendir, çünkü sıcaklık etkisi ile önemli fiziksel ve kimyasal dönüşümler geçirir. Bu dönüşümlerde, 100°C ve altındaki sıcaklıklarda serbest suyun buharlaşması, 100°C 'den sonra kimyasal bozulma ve bağlı suyun kaybı önemli bir rol oynamaktadır. 600°C 'den sonra termal etkiler önem kazanır ve erimeyle sonuçlanır (Khoury, 1992).

Beton bünyesinde su üç farklı şekilde bulunmaktadır. Bunlar, jel yapılı çimento hamurundaki kalsiyum silikat hidratenin (CSH) katı ögelerini birbirine bağlayan adsorpsiyon suyu, hidratlardaki kimyasal bağlı su ve kılcal boşluklarda serbest sudur. Çimento türüne ve üretim sırasındaki su/çimento oranına bağlı olarak, betonda hacminin %4 'ü kadar bulunabilen serbest su 100°C 'de, kimyasal bağlı su ise 300°C 'de buharlaşmaktadır. Sıcaklık etkisi ile bu mertebedeki suyun kaybı ile oluşacak büzülme ve beton içinde oluşan buhar basıncı, donatı beton örtüsünün çatlamasına ve parçalanarak kopmasına neden olur. Beton örtüsünün tahrip olması sonucu donatı daha yangının başlangıcında sıcak gazla temasa geçer (Akman, 2000).

Çimento hamurundaki bir diğer önemli bileşen kalsiyum hidroksittir. 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).

$\text{Ca}(\text{OH})_2$ 'in CaO ve H_2O 'ya dönüşümü 500°C civarında olurken, Şekil 2.4'te görüldüğü gibi CSH'in dehidratasyonu 110°C 'den itibaren başlamaktadır (Scherefler, 2003). Her iki olay da çimento pastasındaki katı madde miktarının azalmasına sebep olur.



Şekil 2.4 Çimento pastasındaki tobermoritin (CSH) sıcaklığa bağlı olarak dönüşüm (dehidratasyon) derecesi ve oranı (Scherefler vd., 2003)

2.2.2.2 Agregalar

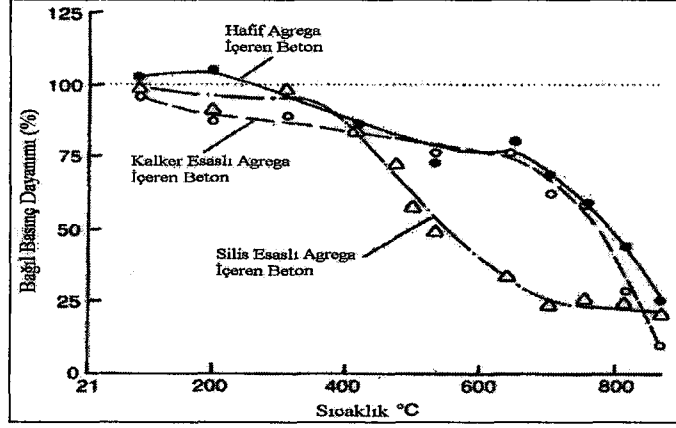
Beton hacminin %60-80'lik kısmını teşkil eden agreganın, ısıtma sürecinde özelliklerindeki değişim betonun performansını büyük ölçüde etkilemektedir (Alonso vd., 2003). Agregaların yüksek sıcaklıkta betona etkisi mineral yapılarına bağlıdır ve yüksek sıcaklığa dayanıklı oldukları söylenebilir.

Silis esaslı agregalar için kritik sıcaklıklar 250°C ile 575°C 'ler arasındadır (Perkins, 1986). Kumların büyük çoğunluğunu teşkil eden kuvarz, 570°C 'de polimorfik değişime uğrar, α kuvarzdan β kuvarza dönüşür. Bu olay %15 mertebesinde hacim artışına ve dolayısı ile betonda hasara neden olur (Akman, 2000).

Kalker ve dolomitten oluşan agregalarda ise $800-900^\circ\text{C}$ 'lerde CaO ve MgO 'ya dönüşüm söz konusudur (Akman, 2000). Kalkerin ve dolomitin kalsinasyonu endotermik bir olaydır ve sıcaklığın etkisi ile CO_2 'nin ayrışması, MgO ve CaO 'nun oluşması büzülmeye neden olur (Khoury, 1992). Gerek soğuma esnasında ortamdaki nemin absorplanması gerekse söndürme anında sıkılan suyun etkisiyle $\text{Ca}(\text{OH})_2$ tekrar oluşur. Bu büzülme ve genleşmeler dayanımda ciddi azalmalar meydana getirir (Perkins, 1986).

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 2.5).



Şekil 2.5 Betonun bağıl basınç dayanımının kullanılan agreganın 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).

Allen ve Desai (1967) tarafından yapılan deneysel bir çalışmada farklı tip agregaların kullanıldığı betonlar 300°C sıcaklığa maruz bırakılmış, agregalar 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).

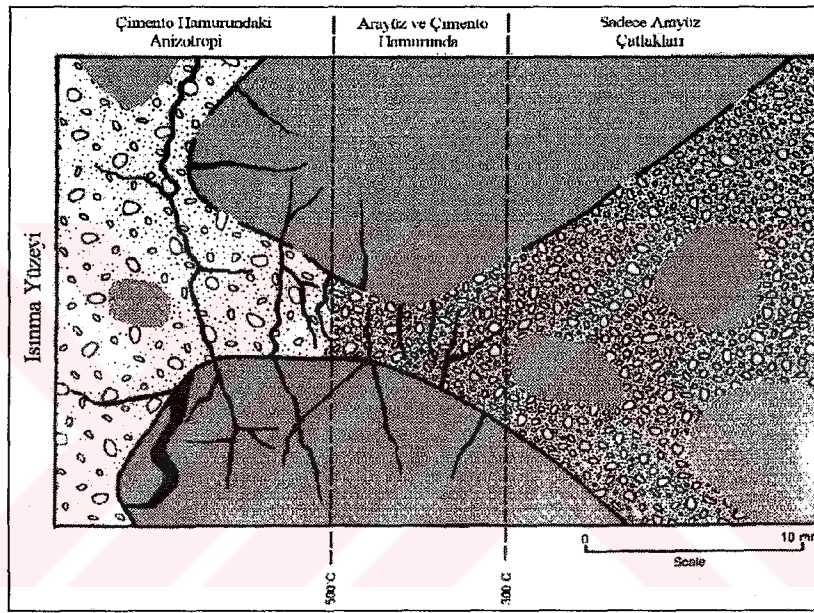
Silis dumanı, uçucu kül ve curuf gibi mineral katkı malzemelerinin kullanımı yüksek performanslı beton hazırlamada en etkin yoldur (Poon vd., 2004). Silis dumanı içeren betonlarda yüksek sıcaklıklara karşı direnç katkı miktarına ve dayanım düzeyine bağlı olarak değişebilmektedir. Silis dumanı %20'nin üzerinde olan yüksek dayanımlı betonların direnci normal betonlara göre daha azdır. Sıcaklık 300°C 'ı 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 (Yeğınobalı, 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 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; Yeğınobalı, 2002).

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 yayınımı azalır. Bunun sonucu olarak yüksek sıcaklığa maruz yüzey ile betonun iç kısımları arasında sıcaklık farkları oluşur. Riley

(1991) bir deneysel çalışmada, 30 mm çapında 60 mm yüksekliğinde silindir harç numuneleri yüzeyden itibaren ısıtmış ve sıcaklıkları 5 adet termokupul ile ölçerek izotermli çizmiş ve bu noktalardan aldığı ince kesitlerin analizi ile betonun fiziksel özelliklerinin bu izotermli benzer değişimler gösterdiğini belirtmiştir. Şekil 2.5'te görüldüğü gibi çatlak kısmı bütün denenen numunelerin, 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 'ler 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 2.6 Yangın hasarı görmüş betonun izotermine bağlı özellikleri (Riley, 1991)

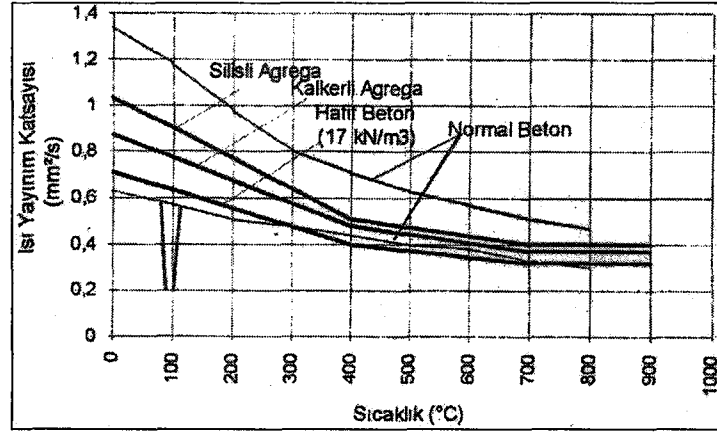
2.2.3.1 Isı Yayınım Katsayısı

Yüksek sıcaklık etkisinin nedenlerinden biri olan yangından, ısı enerjisinin bir kısmı emilir. Emilen ısı sıcaklığın yükselmesine neden olur. Bu olayda ısı yayınım katsayısı (a , mm^2/s) etkili olur. Isı yayınım katsayısı, malzemenin ısı iletkenlik 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) bağlı olarak 2.2 bağıntısı ile hesaplanır (CEB, 1991).

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

Isı yayınım katsayısı, Şekil 2.7'den de görüldüğü gibi, sıcaklık arttıkça azalmaktadır. Bu

azalma özellikle 100°C civarında bünyedeki suyun buharlaşması nedeniyle daha belirgindir.



Şekil 2.7 Çeşitli betonlar için ısı yayılım katsayısı (CEB, 1991)

2.2.3.2 Isı İletkenlik Katsayısı

Yapılan araştırmalar, betonun ısı iletkenliğine etki eden temel etkenin 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 iletkenlik katsayısına etki eden diğer iki önemli etken, 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 iletkenlik 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

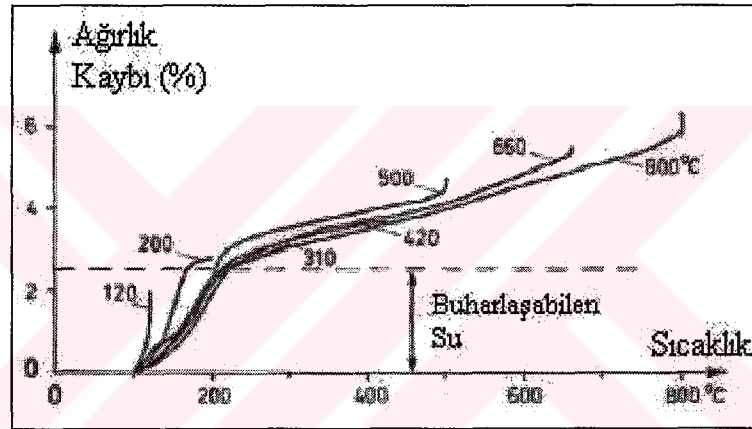
Betonun özgül ısısı, diğer bir deyişle bir gramının sıcaklığını 1°C arttırmak için gerekli olan

ısı enerjisi, sıcaklıkla çok az değişir. Bu büyüklüğe agreganın önemli etkisi yoktur (Aköz ve Yüzer, 1994; Aköz vd., 1995).

2.2.3.5 Birim Hacim Ağırlığı

Sıcaklığın artması ile boşluklardaki suyun buharlaşması sonucu ağırlık azalır, genişleme nedeniyle hacim artar. Ağırlık ve hacimdeki bu değişimler sonucu birim hacim ağırlığı (β) azalır. Ancak bu azalma ihmal edilebilir düzeydedir (Aköz vd., 1995).

Literatürde bu konuyla ilgili birçok çalışmaya rastlanmıştır. Anderberg-Thelanderson sıcaklığın etkisi ile birim ağırlığın azalmasına sebep olan ağırlık kaybını silis esaslı agrega ile üretilen betonda araştırmış, bu çalışma sonucunda ağırlık kaybının sıcaklıkla değişimi Şekil 2.8'de verilmiştir. Schneider ve Bazant yaptıkları çalışmada 1000°C 'ye kadar yoğunluğun %11-13 arasında azaldığını belirtmişlerdir (Anderberg, 2003).

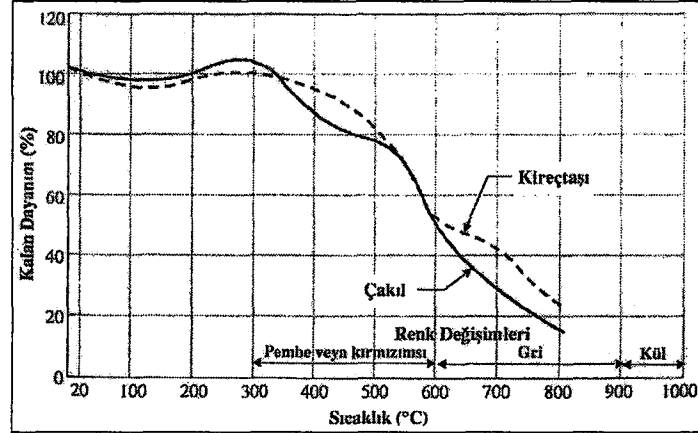


Şekil 2.8 Ağırlık kaybının sıcaklıkla değişimi (Anderberg, 2003)

2.2.3.6 Renk

Yüksek sıcaklığın etkisinde kalan betonun renginde bazen önemli değişiklikler meydana geldiği, bu değişikliklere bakılarak kalker ve silis esaslı agregalı betonun maruz kaldığı maksimum sıcaklık 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). Şekil 2.9'dan da görüldüğü üzere, sıcaklık 600°C 'ye ulaştığında beton, dayanımının %50 'sini, 800°C 'ye ulaştığında ise yaklaşık %80 'ini kaybettiği gözönüne alınırsa (Baradan vd., 2002), renk incelemesi ile betonun hangi sıcaklığa maruz kaldığı, dolayısı ile basınç dayanımındaki değişim hakkında fikir

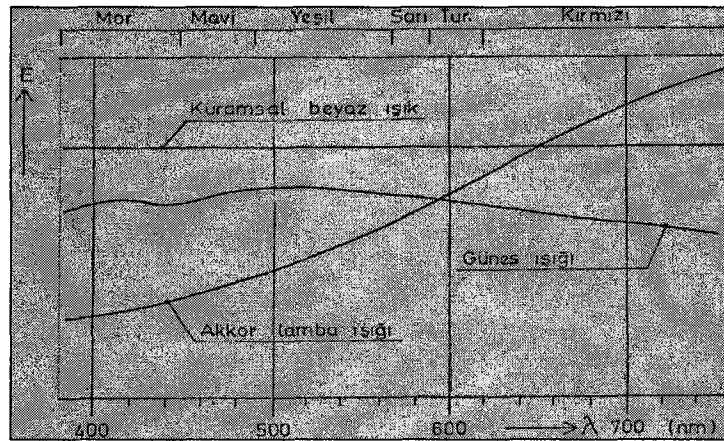
edinilebilir. Buradan yüksek sıcaklık etkisinde kalan betondaki renk değişiminin önemli bir parametre olduğu anlaşılmaktadır (Yüzer vd., 2003, Yüzer vd. 2004).



Şekil 2.9 Betonda sıcaklığa bağlı dayanım kaybı renk değişimi (Baradan vd., 2002)

Renk cisimlerin fiziksel özelliklerinden biridir. Rengin görülmesi kaynağından çıkan ışığın yüzeyden yansiyarak 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.

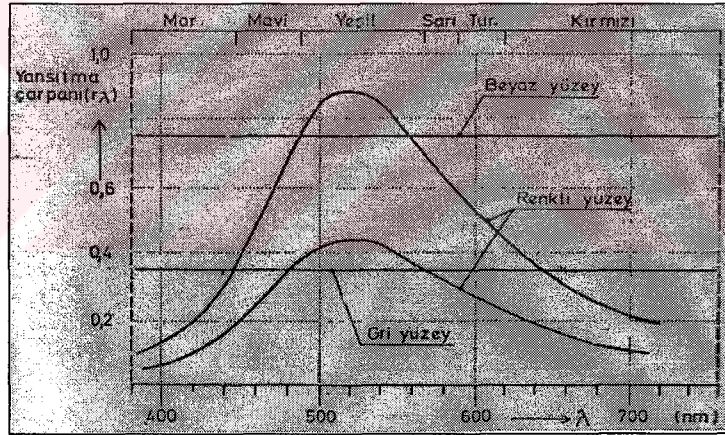
Işık ışınları dalga boyu 380 nm ile 760 nm arasında değişen ışınlardır. Beyaz ışık bütün tek renkli ışıkların eşit oranlarda karışmasından oluşmuştur. Şekil 2.10'da kuramsal beyaz ışığın, güneş ışığının ve akkor lamba ışığının tayfsal eğrileri görülmektedir. Grafiğin x ekseninde ışığın dalga boyu (λ , 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 2.10 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 ışığından farklı oluşu, yani yansyan ışığın renkli oluşu sonucudur. Örneğin bir yüzey kırmızı görüntüyorsa, 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).

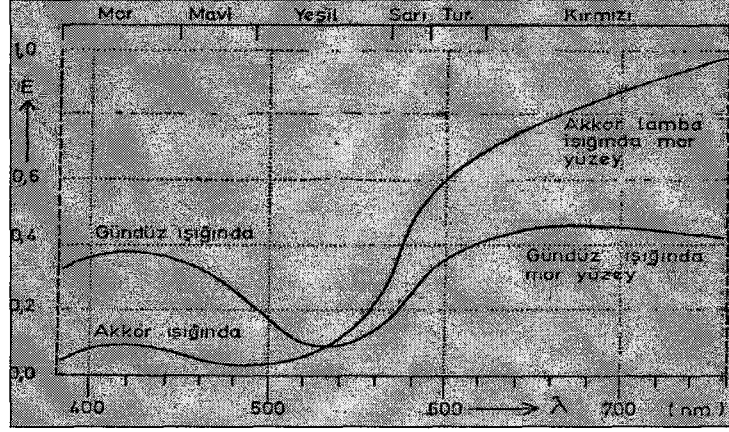
Yüzeylerin, ışığı yansıtma çarpanlarının, dalga boyuna göre değişme özellikleri grafiklerle gösterilir. Şekil 2.11 böyle bir grafiği göstermektedir. x ekseni dalga boylarını, y ekseni ise yüzeyin dalga boyuna göre değişen yansıtma çarpanlarını göstermektedir. Şekil 2.11'deki grafikten de görüldüğü üzere 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 2.11 Yüzeylerin, ışığın dalga boyu-yansıtma çarpanı grafiği (Sirel, 1974)

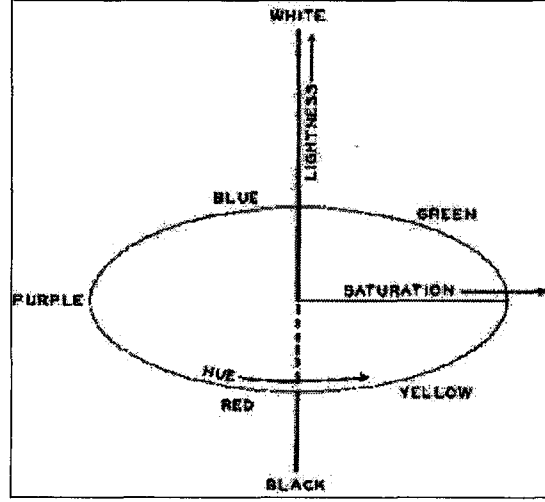
Bir yüzeyi aydınlatan ışığın tayf eğrisi, o yüzeyin yansıtma çarpanları eğrisiyle çarpılırsa yüzeyden yansyan ışığın tayf eğrisi elde edilir. Bir yüzeyden yansyan ışığın tayf eğrisi o yüzeyin görünen renginin eğrisidir. Bu tanıma göre yüzeyin görünen renginin yüzeyin yansıtma çarpanları eğrisi ve o yüzeyi aydınlatan ışığın tayf eğrisi olmak üzere iki değişkene bağlı olduğu anlaşılmaktadır. Bir yüzeyin görünen rengi, o yüzeyi aydınlatan ışığın tayfsal yapısına bağlıdır. Bu yapı değişikçe yüzeyin görünen rengi de değişir. Şekil 2.12'de mor

yüzeyin gündüz ışığında ve akkor lamba ışığında görünen renkleri gösterilmiştir. Bu çalışmada, renk ölçümünde gün ışığından yararlanılmıştır (Sirel, 1974).

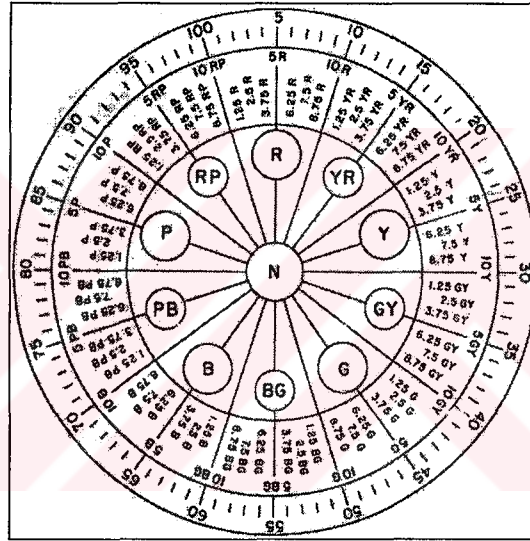


Şekil 2.12 Mor yüzeyin farklı ışıklardaki tayf eğrileri (Sirel, 1974)

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 2.13) 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 2.14). 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 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).

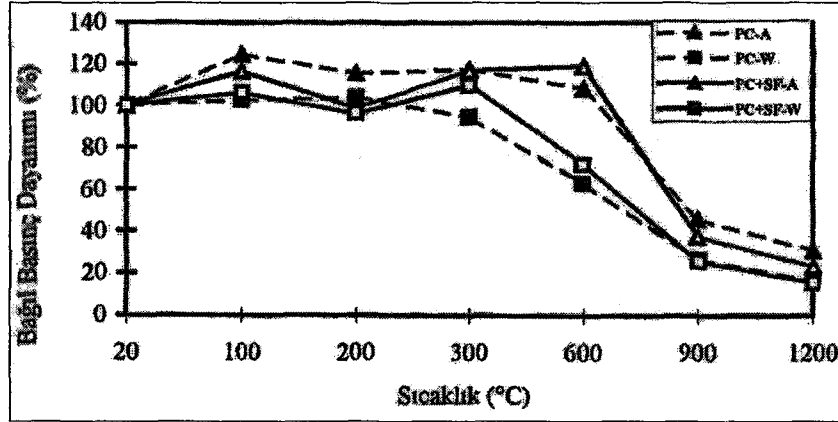


Şekil 2.13 Munsell Renk Dizgesinde rengin 3 bileşeni (ASTM D 1535-68, 1974)

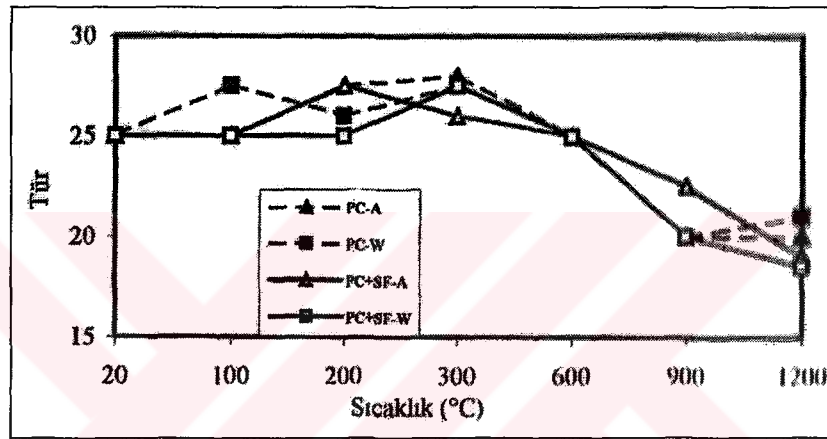


Şekil 2.14 Munsell Tür Çemberi (ASTM D 1535-68, 1974)

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 2.15 ve 2.16'da 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).



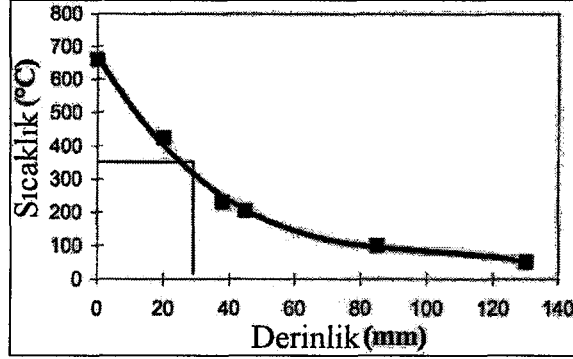
Şekil 2.15 Basınç dayanımının sıcaklıkla değişimi (Yüzer vd., 2001)



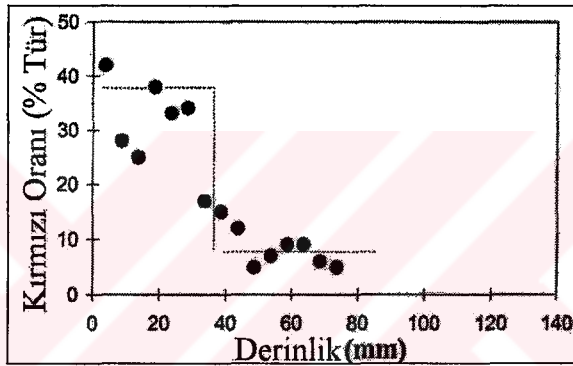
Şekil 2.16 Renklerin (Tür) sıcaklıkla değişimi (Yüzer vd., 2001)

Farklı bir renk dizgesinin kullanıldığı diğer bir çalışmada beton numunelerde farklı sıcaklıklar için basınç dayanımları ve yüzey renkleri ölçülmüş, silis esaslı agregaya kullanıldığında renk ile basınç dayanımı arasında bir ilişki kurulabileceği açıkça görülürken, farklı agregaya 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 agregaya ile üretilen betonun sıcaklığının derinlikle değişimi (Şekil 2.17) ve farklı derinliklerde ölçülen yüzey renkleri (Şekil 2.18) verilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre yüzeyden yaklaşık 30 mm derinlikteki rengin kırmızı oranı yüksek iken, 35 mm derinlikte sıcaklığın henüz 300°C'nin altına düşmediği 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 2.17 Yüzeiden itibaren sıcaklığın derinlikle değişimi (Short vd., 2001)



Şekil 2.18 Yüksek sıcaklık etkisindeki betonun yüzey renginin derinlikle değişimi (Short, 2001)

2.2.4 Yüksek Sıcaklığın Betonun Mekanik Özelliklerine Etkileri

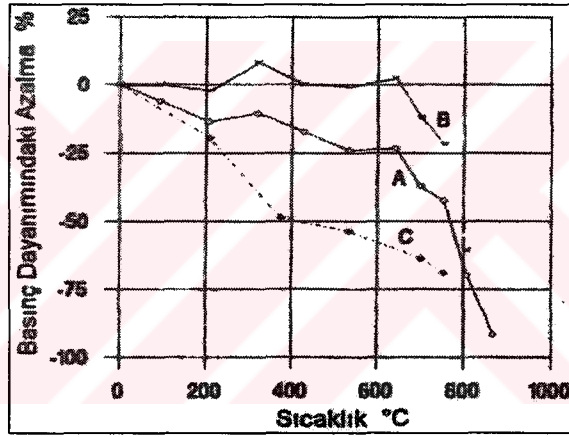
Betonarme yapılar, yangın, termal şok, endüstriyel uygulamaları vb. durumlarda yüksek sıcaklığa maruz kalmaktadır. Çoğu durumda yüksek sıcaklık beton elemanlarda ve taşıyıcı duvarlarda önemli hasarlara yol açmaktadır (Cülfik ve Özturan, 2001). Betonarme yapılarda ana taşıyıcının beton olduğunu düşünürsek, 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

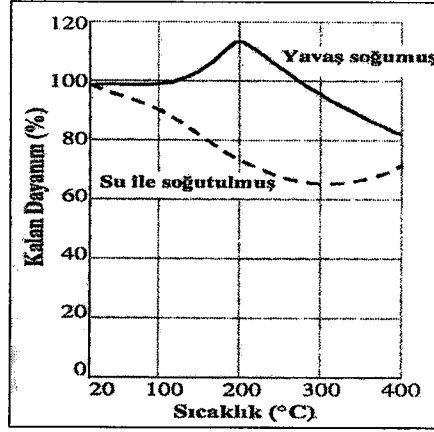
durumu, ısınma ve soğuma hızı, yükleme durumu gibi çevresel faktörler etken olmaktadır (Neville, 2000). Kullanılan malzeme bakımından agrega türünün dayanımdaki etkisi Bölüm 2.2.2.2’de incelenmiştir. Aşağıda çevresel faktörlerden yükleme durumu ve soğuma şeklinin basınç dayanımına etkisi verilmiştir.

Yükleme durumuna göre basınç dayanımındaki değişim Şekil 2.19’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 2.19’daki basınç deneyi sonuçları, C grubu numunelerin temsil ettiği, yüksüz durumda ısıtılıp soğutulduktan sonra basınç dayanımlarının belirlenmesi yönteminin daha güvenli bölgede kaldığını göstermektedir.



Şekil 2.19 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 2.20) havada soğutulan numunelere nazaran daha fazladır (Neville, 2000; Yüzer vd. 2004b).

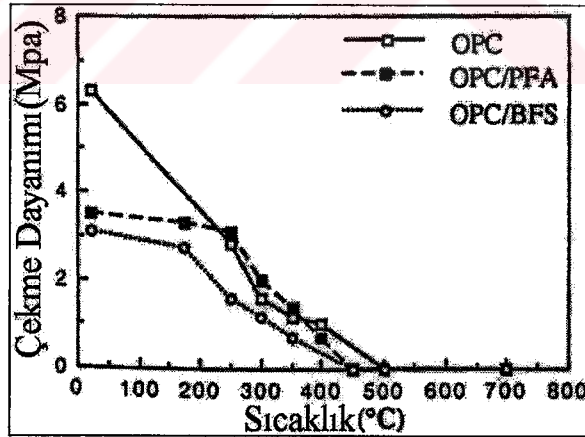


Şekil 2.20 Basınç dayanımının soğutma şekline göre sıcaklıkla değişimi (Neville, 2000)

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).

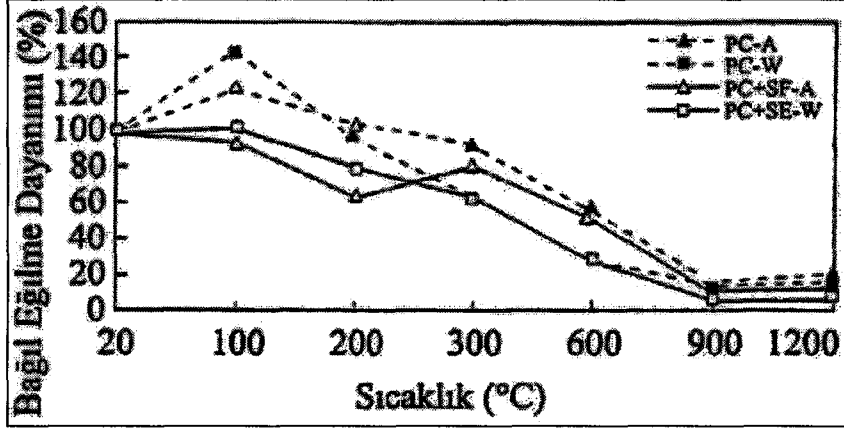
Guisse vd. (1996) tarafından yapılan deneysel çalışma sonucu yüksek sıcaklık etkisinde, uçucu kül ve yüksek fırın cürufu katkılı ve katkısız beton numunelerde, 200 ve 300°C 'de eğilmede çekme dayanımında önemli ölçüde azalma olduğu görülmüştür (Şekil 2.21).



Şekil 2.21 Puzolan katkılı ve katkısız Betonların Çekme dayanımının sıcaklıkla değişimi (Guisse vd., 1996)

Yüksek sıcaklık etkisinin araştırıldığı silis dumanı katkılı ve katkısız harçlar üzerinde yapılan diğer bir deneysel çalışmada, harçların eğilme dayanımı (Şekil 2.22) 100°C 'den itibaren

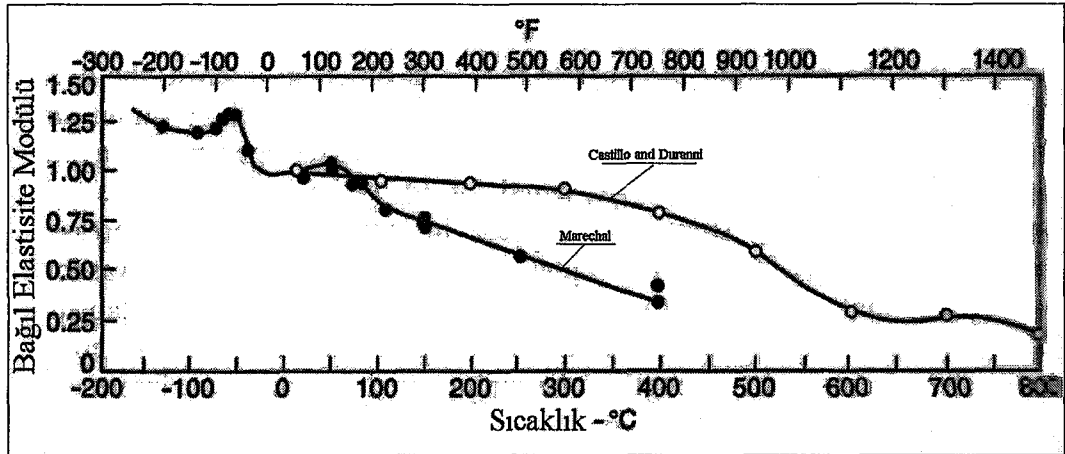
bütün gruplarda azalmaya başlamış, suda soğutulanlardaki kayıp, 300°C 'de yaklaşık %40'a varmıştır (Aköz vd., 1995).



Şekil 2.22 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 2.23'de 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 2.23 Betonun elastisite modülünün sıcaklıkla değişimi (Neville, 2000)

Bu alışma kapsamında silis ve kalker esaslı agrega kullanılarak üretilen ve yüksek sıcaklık etkisinde kalan puzolan katkılı ve katkısız harç numunelerin fiziksel ve mekanik özelliklerin, soğutma türünün etkisi deneysel olarak araştırılmıştır.



3. DENEYSEL ÇALIŞMA

Bu çalışma kapsamında farklı agrega ve farklı puzolan türleri kullanılarak üretilen ve yüksek sıcaklık etkisine maruz bırakılan harç 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 silis ve kalker esaslı agregalar, PÇ 42.5 çimentosu, silis dumanı, uçucu kül ve cüruf kullanılmıştır. Puzolan malzemeler, harca çimento ağırlığının %10'u oranında ikameli olarak katılmıştır. Her sıcaklık için üç adet olmak üzere toplam 336 adet 40x40x160 mm boyutlu harç numune üretilmiştir. Harçlarda yayılmanın sabit tutulması amacı ile farklı oranlarda süper akışkanlaştırıcı katkı maddesi kullanılmış, su/bağlayıcı oranı 0.5 ile sabit tutulmuştur. TS EN 196-1'e uygun olarak üretilen harçlar 24 saat sonra kalıptan çıkarılmış, 28. güne kadar 20 ± 2 °C sıcaklıktaki kirece doymun suda saklanmıştır. Numuneler, kullanılan agrega, puzolan türü ve soğutma şekline göre Çizelge 3.1'de gösterildiği gibi kodlanmıştır.

Çizelge 3.1 Numune grupları

Soğutma Türü	Havada (A)		Suda (W)	
	Silis (R)	Kalker (K)	Silis (R)	Kalker (K)
Portland Çimentosu (Katkısız) (N)	NRA	NKA	NRA	NKA
Silis Dumanı Katkılı (S)	SRA	SKA	SRA	SKA
Cüruf Katkılı (C)	CRA	CKA	CRA	CKA
Uçucu Kül Katkılı (F)	FRA	FKA	FRA	FKA

3.1 Numune Üretiminde Kullanılan Malzemeler

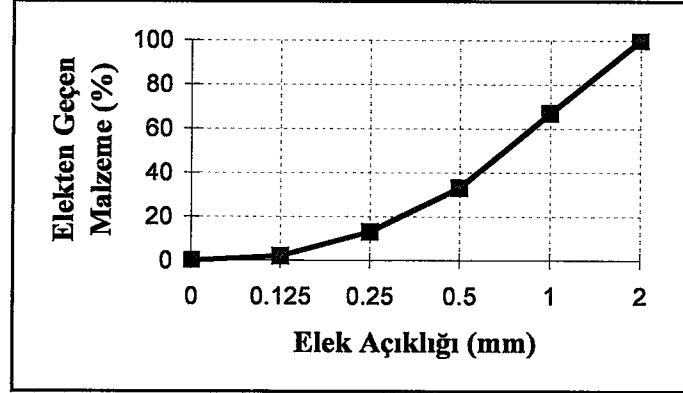
Harç üretiminde özellikleri aşağıda verilen agregalar, çimento, mineral katkı ve süper akışkanlaştırıcı katkı maddesi kullanılmıştır.

3.1.1 Agregalar

Harç üretiminde, fiziksel özellikleri Çizelge 3.2'de verilen silis ve kalker esaslı agregalar kullanılmıştır. Silis esaslı agrega olarak Rilem kumu (CEN) ve aynı granülometride kalker esaslı agrega kullanılmıştır. Agregalara ait granülometri eğrisi Şekil 3.1'de verilmiştir.

Çizelge 3.2 Agregaların fiziksel özellikleri

Agrega Türü	Birim Ağırlık (g/cm ³)	Özgül Ağırlık (g/cm ³)
Silis Esaslı	1,51	2,50
Kalker Esaslı	1,74	2,61



Şekil 3.1 Agregaların granülometrik eğrileri

3.1.2 Çimento

Harç üretiminde, fiziksel ve kimyasal özellikleri Çizelge 3.3'te verilen, AkçanSA çimento fabrikasından temin edilen PÇ 42,5 çimentosu kullanılmıştır.

3.1.3 Mineral Katkı

Mineral katkı olarak, harç üretiminde Antalya Ferro-Krom tesislerinden elde edilen silis dumanı, Ereğli Demir Çelik Fabrikasından elde edilen yüksek fırın cürufu ve Tunçbilek Termik 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 (%)	Portland Çimentosu	Silis Dumanı	Uçucu Kül	Yüksek Fırın Cürufu
CaO	64,01	0,57	8,72	33,48
SiO ₂	20,01	82,22	57,27	41,43
Al ₂ O ₃	5,28	0,17	14,15	10,28
Fe ₂ O ₃	3,65	0,53	12,52	3,48
MgO	1,21	5,43	1,33	6,05
SO ₃	2,47	1,42	0,56	
Kızdırma Kaybı	2,27	3,96		0,61
Çözünemeyen Kalıntı	0,32			
Özgül Ağırlık (g/cm ³)	3,14	2,02	2,01	2,80
Özgül Yüzey Blaine (cm ² /g)	3570	---	3621	3910

3.1.4 Kimyasal Katkı

İstenen yayılmanın sağlanması amacı ile katkı oranı %0,2-2 arasında değişen, katı madde miktarı %38 olan, melamin esaslı süper akışkanlaştırıcı, kimyasal katkı kullanılmıştır.

3.2 Numune Üretimi

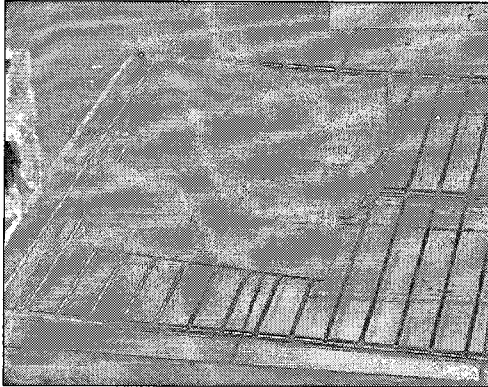
TS 196-1'e uygun olarak 336 adet 40x40x160 mm boyutlarında harç numune üretilmiştir. 1 m³ harç için gerekli gerçek malzeme miktarları ve taze harç birim ağırlıkları Çizelge 3.4'te verilmiştir.

Çizelge 3.4 Harç üretiminde kullanılan gerçek malzeme miktarları ve taze harç birim ağırlığı

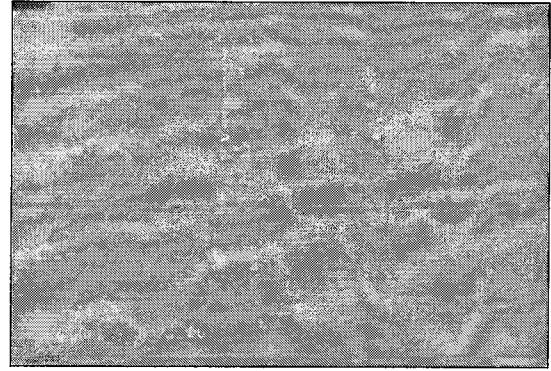
Katkı Türü	Agrega Türü	Çimento (kg)	Katkı (kg)	Agrega (kg)	Süper Akışkanlaştırıcı (%)	Taze Harç Birim Ağırlığı (kg/m ³)
Katkısız	Silis Esaslı	508,4	--	1525,2	0,5	2288
	Kalker Esaslı	517,3	--	1551,9	1,7	2328
Silis Dumanı Katkılı	Silis Esaslı	445,6	49,0	1483,8	0,4	2228
	Kalker Esaslı	458,4	50,4	1526,5	2,0	2292
Uçucu Kül Katkılı	Silis Esaslı	450,6	49,6	1500,5	0,4	2253
	Kalker Esaslı	459,2	50,5	1529,1	2,0	2296
Yüksek Fırın Cürufu Katkılı	Silis Esaslı	457,6	50,3	1523,8	0,4	2288
	Kalker Esaslı	461,4	50,8	1536,5	2,0	2307

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 $100 \pm 5^\circ\text{C}$ 'de 48 saat bekletilmiş, sonra her gruptan üçer adet numune, ısınma hızı $6-10^\circ\text{C}/\text{dak.}$ olan fırında 100, 200, 300, 600, 900 ve 1200°C sıcaklıklara kadar ısıtılmıştır. Fırından çıkarılan numuneler, havada soğutmada, bagetler üzerine yerleştirilerek 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.



Resim 3.1 Havada soğutma



Resim 3.2 Suda soğutma

3.4 Kontrol Deneyleri

Numuneler, yüksek sıcaklık etkisine maruz bırakmadan önce etüvde $100\pm 5^\circ\text{C}$ sıcaklıkta 48 saat bekletilmiştir. Yüksek sıcaklık etkisinde kalan harcın fiziksel ve mekanik özelliklerindeki değişimleri incelemek amacıyla, harçların sırasıyla yüzey renkleri ölçülmüş, ultrases geçiş süresi ölçülmüş, eğilme ve basınç deneyleri yapılmış, birim ağırlık, hacimce su emme ve kılcal su emme değerleri belirlenmiştir. Aşağıda fiziksel ve mekanik özelliklerin araştırıldığı deneyler, yapılış sırasına göre açıklanmıştır.

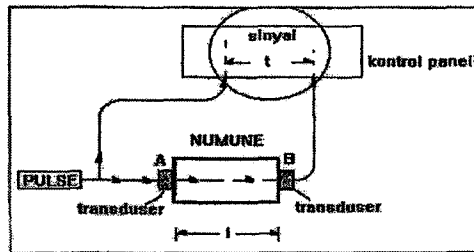
3.4.1 Renk Ölçümü

Yüksek sıcaklık etkisinden sonra havada ve suda soğutulan harç numunelerin yüzey renkleri Munsell Renk Dizgesinin kullanıldığı Minolta marka 2500-d model renk ölçer ile belirlenmiştir. Rengin tür, değer ve doymuşluk bileşenleri her numunede 3'er kez olmak üzere ölçülüp, ortalama değerler Ek Çizelge 1-6'da, yüksek sıcaklığa bağlı değişimler Şekil 4.1-4.6'da verilmiştir.

3.4.2 Ultrases Geçiş Hızının Belirlenmesi

Harç numunelerde, ASTM C 597 – BS 1881'e uygun $0,1 \mu\text{s}$ 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 3.2'de 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 4.7-4.8 ve Ek Çizelge 7-8'de verilmiştir.

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



Şekil 3.2 Ultrasonik yöntem ile ses geçiş süresinin belirlenmesi

3.4.3 Eğilme Deneyi

Eğilme deneyi 40x40x160 mm boyutlu toplam 336 adet numunede TS 196-1'e uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Bunun için numuneler eğilme aletinin altına mesnet açıklığı 100 mm olan 10 mm çaplı iki silindir çubuk üzerine yerleştirilmiş ve aynı özelliklere sahip yükleme silindiri ile açıklık ortasından 5 ± 1 kgf/s yükleme hızı ile kırılmıştır. Eğilme dayanımları 3.2 bağıntısından hesaplanmış, sonuçlar Şekil 4.10-4.11 ve Ek Çizelge 9-10'da verilmiştir.

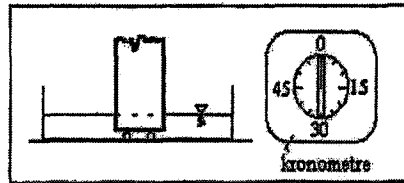
$$f_e = 1.5 \frac{P_k \times l}{a^3} \quad (3.2)$$

3.4.4 Basınç Deneyi

Eğilme deneyinde iki parçaya bölünmüş olan yarım prizmalar, yan yüzeyleri 40x40 mm'lik 2 adet çelik kırma başlığı altına konmak üzere TS 196-1'e uygun olarak tek eksenli basınç deneyine tabi tutulmuştur. Deney, 35 t kapasiteli Universal Basınç Aletinde 10-20 kgf/cm².s yükleme hızı ile gerçekleşmiş, sonuçlar Şekil 4.12-4.13 ve Ek Çizelge 11-12'de verilmiştir.

3.4.5 Kılcal Su Emme Deneyi

Kılcal su emme deneyi 3'er adet numunede 40x40 mm'lik yüzeyde yapılmıştır. Numuneler öncelikle $100 \pm 5^\circ\text{C}$ sıcaklıktaki etüvde değişmez ağırlığa kadar kurutulmuştur. Deney düzeneği Şekil 3.3'te verilen ve Darcy Kanunundan yararlanılarak yapılan kılcal su emme deneyi 3 numune için aynı anda başlatılmak ve 1., 4., 9., 16., 25., 36., 49. ve 64. dakikada tartım yapılmak üzere sürdürülmüştür. Deney sonuçlarından ve lineer regresyon analizinden yararlanılarak ortalama kılcal su emme katsayıları (K) hesaplanmıştır. Deney sonuçları Şekil 4.5-4.6 ve Ek Çizelge 14-15'de verilmiştir.



Şekil 3.3 Kılcal su emme deney düzeneği

3.4.6 Birim Ağırlık ve Hacimce Su Emme

Değişmez ağırlığa kadar kurutulmuş numuneler, suya doygun hale getirilmiş, hacimce su emme miktarları ve Arşimet prensibinden yararlanılarak hacimleri ve birim ağırlıkları belirlenmiştir. Deney sonuçları Şekil 4.16-4.19 ve Ek Çizelge 15-18'de verilmiştir.

4. DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ ve İRDELENMESİ

Üretimi ve kürtü tamamlanan ve yüksek sıcaklık etkisine maruz bırakılan numunelerde yapılan kontrol deneylerinin sonuçları Ek Çizelge 1-18'de verilmiş, bu sonuçlar Bölüm 4.1-4.6'da değerlendirilmiş ve irdelenmiştir. Silis esaslı agreganın kullanıldığı tüm gruplarda kontrol deneyleri yapılmış, kalker esaslı agreganın kullanıldığı gruplardan 1200°C 'ye maruz kalan numunelerin, havada soğuyan gruplarında mekanik deneylerin ardından değişmez ağırlığa gelinceye kadar kurutulurken numuneler toz haline geldiğinden birim ağırlık ve su emme deneyleri, suda soğutulan gruplarında ise soğutma esnasında su içerisinde dağıldığından bu numunelerde hiçbir kontrol deneyi yapılamamıştır.

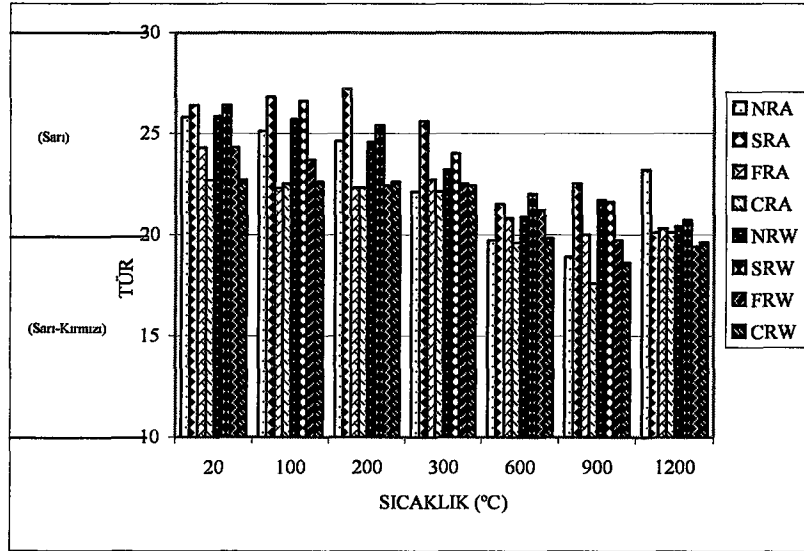
4.1 Renk Değişiminin Değerlendirilmesi ve İrdelenmesi

Sıcaklık değişimine bağlı olarak, harçların renklerinde ortaya çıkan değişimler, rengin tür, değer ve doymuşluk bileşenleri için ayrı ayrı aşağıda değerlendirilmiştir, deney sonuçları Ek Çizelge 1-6'da verilmiştir.

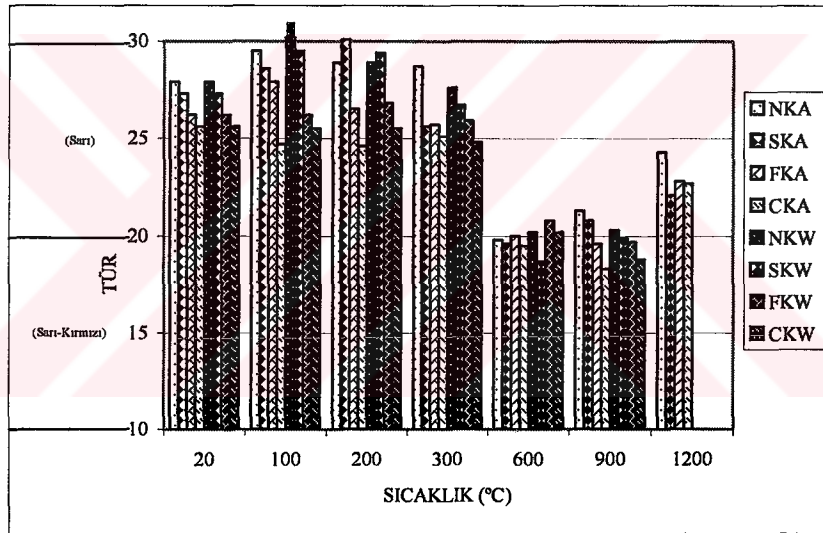
Renk türü, oda sıcaklığında silis esaslı kum ile üretilen harçlarda sarı (~24,8); kalker esaslı kum ile üretilen harçlarda hafif yeşilimsi sarıdır (~26,75). Silis ve kalker esaslı kum ile üretilen harçlarda sıcaklık yükseldikçe, rengin türü kırmızı doğrultusunda değişerek kırmızımsı sarı olmaktadır. Bu değişim, sıcaklık 20°C – 300°C arasında iken çok az, 300°C – 600°C arasında daha fazla, 600°C – 900°C arasında yok denecek kadar az olmaktadır. 900°C – 1200°C arasında ise rengin türü yeniden sarı doğrultusunda değişmektedir. Söz konusu değişim, silis esaslı kum ile üretilen harçlarda çok az, kalker esaslı kum ile üretilen harçlarda daha belirgindir (Çizelge 4.1, Şekil 4.1-4.2).

Çizelge 4.1 Rengin türündeki değişimin büyüklüğü

Sıcaklık	Silis esaslı agregaya ile üretilen harç	Kalker esaslı agregaya ile üretilen harç
20°C – 300°C	~1,73 adım kırmızıya doğru	~0,49 adım kırmızıya doğru
300°C – 600°C	~2,39 adım kırmızıya doğru	~6,41 adım kırmızıya doğru
600°C – 900°C	~0,61 adım kırmızıya doğru	~0,01 adım kırmızıya doğru
900°C – 1200°C	~0,40 adım sarıya doğru	~3,14 adım sarıya doğru



Şekil 4.1 Silis esaslı agrega ile üretilen harçların renk değişimi (TÜR)-sıcaklık ilişkisi

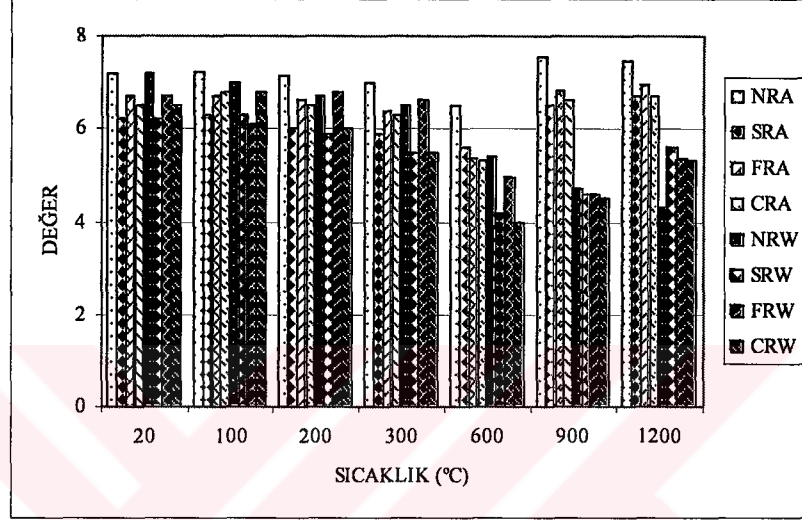


Şekil 4.2 Kalker esaslı agrega ile üretilen harçların renk değişimi (TÜR)-sıcaklık ilişkisi

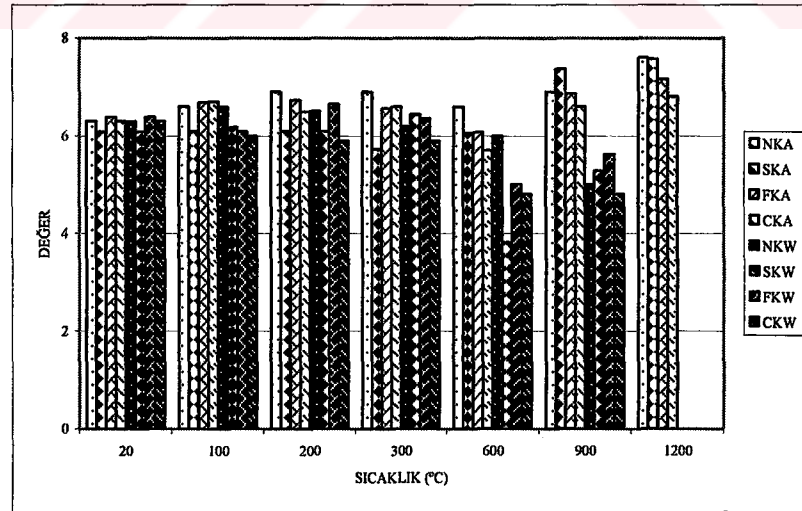
Rengin değeri, oda sıcaklığında orta koyulukta olup, silis esaslı kum ile üretilen harçlarda ~6,65, kalker esaslı kum ile üretilen harçlarda ~6,27 büyüklüğündedir. Sıcaklık yükseldikçe, numune renklerinin açıklık koyuluğu genel olarak sıcaklık 20°C – 300°C arasında iken belirgin bir değişim göstermemekte, 300°C – 600°C arasında 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 4.3-4.4, Çizelge 4.2).

Çizelge 4.2 Rengin değerindeki değişimin büyüklüğü

Sıcaklık	Silis esaslı agrega ile üretilen harç	Kalker esaslı agrega ile üretilen harç
20°C – 300°C	~0,43 adım ↓	~0,07 adım ↑
300°C – 600°C	~1,05 adım ↓	~0,83 adım ↓
600°C – 900°C	~0,57 adım ↑	~0,55 adım ↑
900°C – 1200°C	~0,32 adım ↑	~0,85 adım ↑



Şekil 4.3 Silis esaslı agrega ile üretilen harçların renk değişimi (DEĞER)-sıcaklık ilişkisi

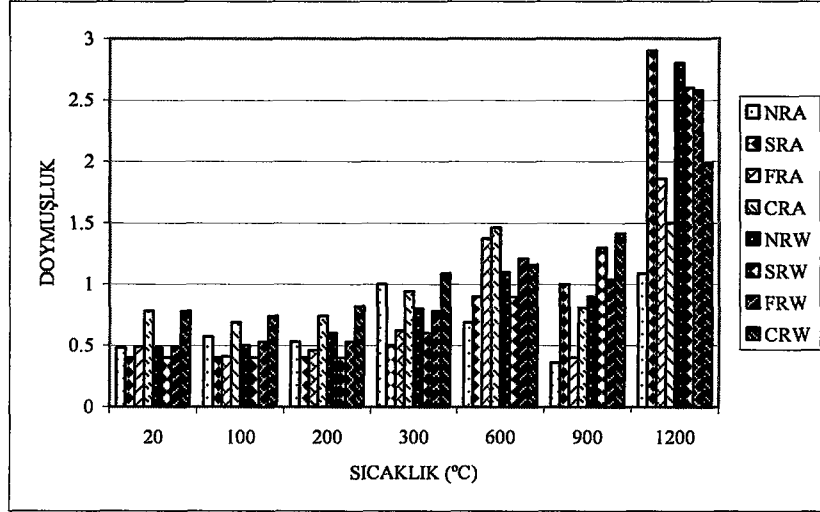


Şekil 4.4 Kalker esaslı agrega ile üretilen harçların renk değişimi (DEĞER)-sıcaklık ilişkisi

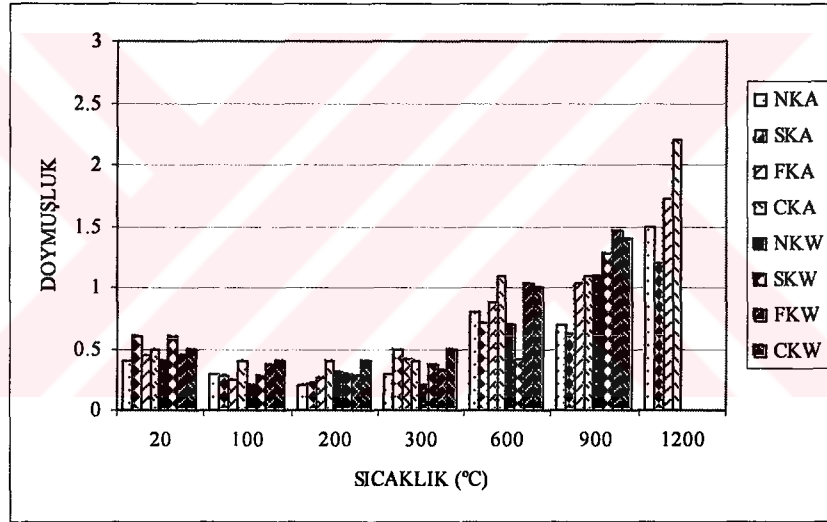
Rengin doymuşluk bileşeni açısından yapılan incelemede, numunelerin oda sıcaklığında çok az doymuş olduğu saptanmıştır. 20°C sıcaklıkta doymuşluğun büyüklüğü, silis esaslı kum ile üretilen harçlarda ~0,54, kalker esaslı kum ile üretilen harçlarda ~0,49 olarak belirlenmiştir. Silis esaslı kum ile üretilen harçlarda numune renklerinin doymuşluğu 200°C 'ye kadar olan sıcaklıkta hemen hemen hiç değişmemektedir. Sıcaklığın yükselmesi ile doymuşluk da genel olarak artmakta, 900°C 'de çok az bir azalma gözlemlendikten sonra daha yüksek sıcaklıklarda doymuşluk yeniden artmaktadır. Kalker esaslı kum ile üretilen harçlarda ise, renklerin doymuşlukları 20°C – 200°C arasında azalmakta, 200°C 'den itibaren sıcaklığın yükselmesi ile doymuşluk düzenli olarak artmaktadır (Şekil 4.5-4.6, Çizelge 4.3). Şekil 4.5-4.6 ve Çizelge 4.3'ten görüldüğü gibi, sıcaklığın yükselmesine dayalı olarak rengin doymuşluk bileşeni ve betonun basınç dayanımında ortaya çıkan değişimler arasında ters doğrultuda bir benzerlik söz konusudur. Yani, düşük sıcaklıklarda az da olsa harçların basınç dayanımı artarken numune renklerinin doymuşluğu azalmakta; orta ve yüksek sıcaklıklarda harçların basınç dayanımı düşerken doymuşluklar yükselmektedir.

Çizelge 4.3 Rengin doymuşluğundaki değişimin büyüklüğü

Sıcaklık	Silis esaslı agrega ile üretilen harç	Kalker esaslı agrega ile üretilen harç
20°C – 200°C	~0,02 adım ↑	~0,19 adım ↓
200°C – 300°C	~0,23 adım ↑	~0,08 adım ↑
300°C – 600°C	~0,31 adım ↑	~0,45 adım ↑
600°C – 900°C	~0,20 adım ↓	~0,26 adım ↑
900°C – 1200°C	~1,26 adım ↑	~0,42 adım ↑



Şekil 4.5 Silis esaslı agrega ile üretilen harçların renk değişimi (DOYMUŞLUK)-sıcaklık ilişkisi



Şekil 4.6 Kalker esaslı agrega ile üretilen harçların renk değişimi (DOYMUŞLUK)-sıcaklık ilişkisi

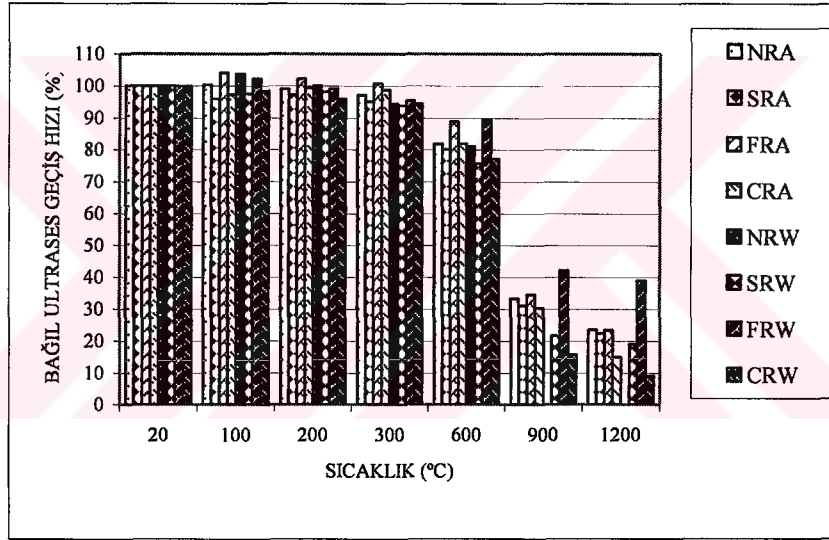
4.2 Ultrases Geçiş Değerlerinin Değerlendirilmesi ve İrdelenmesi

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 dalganın bir ortamda yayılma hızı o ortamın boşluk yapısına, dolayısı ile yoğunluğuna ve elastik özelliklerine bağlıdır. Bu

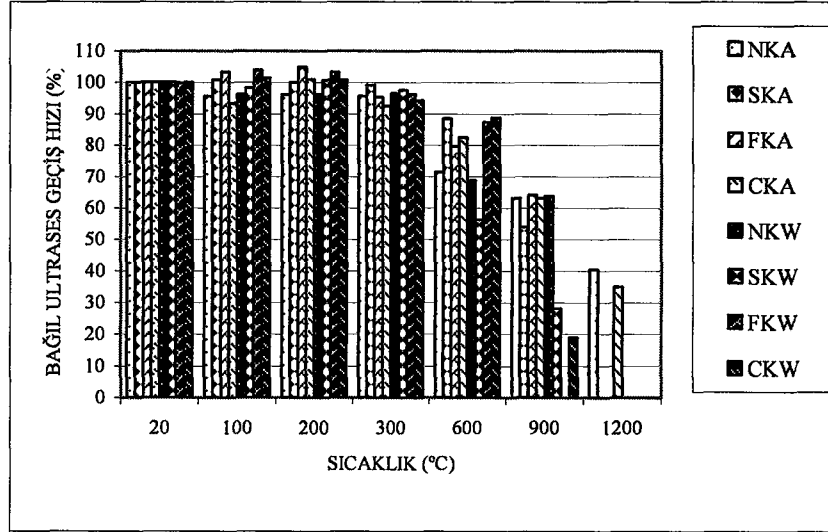
bölümde yapılan ultrases ölçümleri ile, yüksek sıcaklığın harcın boşluk yapısına etkileri değerlendirilmiş, sonuçlar Ek Çizelge 7-8'de verilmiştir.

Şekil 4.7-4.8'de bağıl ses geçiş hızının sıcaklıkla değişimi verilmiştir. Bu çalışmadaki kontrol numunelerinden en düşük ses geçiş hızı, 3,85 mm/μs ile FRA-W grubunda; en büyük değer ise 4,27 mm/μs ile SRA-W grubunda elde edilmiştir.

Ultrases deneyi sonuçlarına göre ses geçiş hızlarında 300°C 'ye kadar önemli bir değişiklik olmamış, 600°C 'de her iki tip agreganın da kullanıldığı gruplarda belirgin azalmalar başlamış, 900°C 'de ise ani düşmeler gözlenmiştir. 600°C 'ye kadar kullanılan agregaya türünün, soğutma şeklinin veya puzolan katkının yüksek sıcaklık nedeni ile ses geçiş hızına önemli bir etkisi olmamıştır. Ancak 900°C 'de kalker esaslı agreganın kullanıldığı numunelerin havada soğutulan grubu silis esaslı agreganın kullanıldığı numunelere göre daha iyi performans göstermiştir.



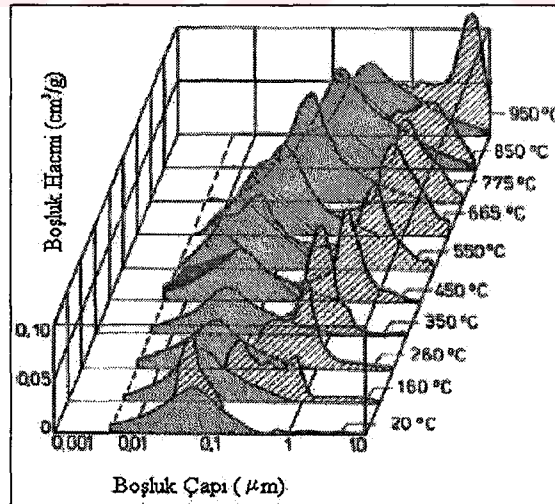
Şekil 4.7 Silis esaslı agregaya ile üretilen harçların bağıl ses geçiş hızı-sıcaklık ilişkisi



Şekil 4.8 Kalker esaslı agrega ile üretilen harçların bağıl ses geçiş hızı-sıcaklık ilişkisi

Her iki şekilde de görüldüğü üzere sıcaklık artışıyla ultrases geçiş hızı azalmaktadır. Bu durum sıcaklığın etkisiyle harçlardaki boşluk oranının artması olarak açıklanabilir.

Alonso vd. (2003) tarafından yapılan bir çalışmada boşluk çap ve hacminin sıcaklık etkisi ile değişimi gösterilmiştir (Şekil 4.9). Şekilde koyu renkle çimento pastası temsil edilmiştir. Pastadaki boşluk hacminde 450°C 'ye kadar önemli bir değişiklik olmadığı, sadece boyutunun değiştiği, bu sıcaklıktan sonra ise hidrate olmuş çimento ürünlerinin dehidratasyonu ile boşlukların şeklinin ve konumunun değiştiği belirtilmiştir.



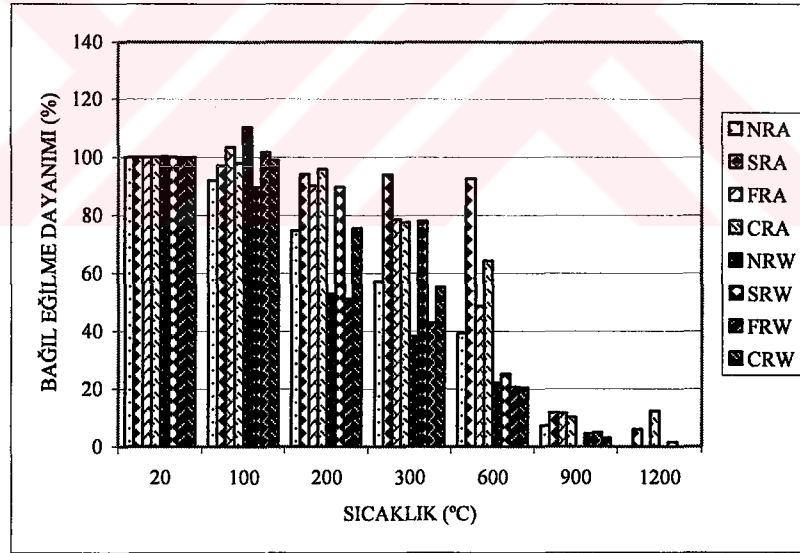
Şekil 4.9 Yüksek sıcaklık etkisindeki harcın boşluk yapısının değişimi (Alonso vd., 2003)

Şekil 4.9'daki açık renkler ise agrega ile çimento hamuru arasındaki boşlukları temsil etmektedir. Agrega ile çimento hamuru arasındaki termal uyumsuzluk sonucu sıcaklığın etkisi ile boşlukların arttığı görülmüştür (Alonso vd., 2003).

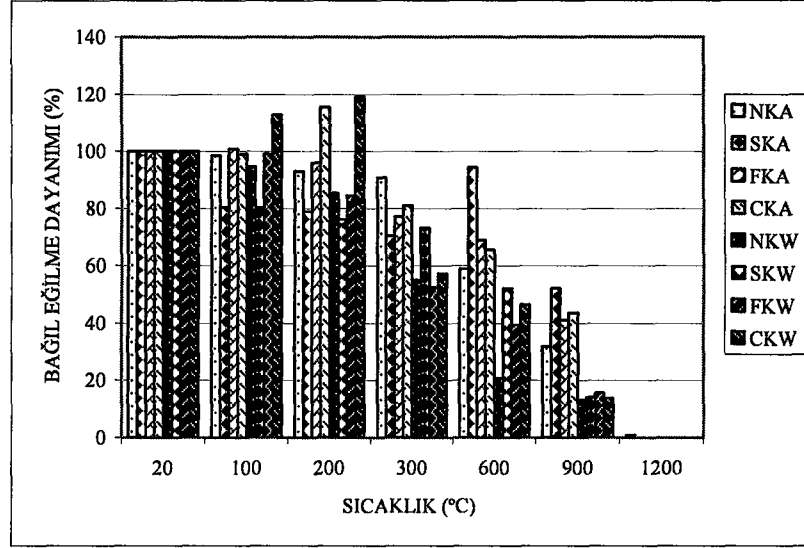
4.3 Eğilme Dayanımının Değerlendirilmesi ve İrdelenmesi

Yüksek sıcaklık etkisine maruz kalan harçların eğilme deneyi sonuçları Ek Çizelge 9-10'da verilmiştir. Kontrol gruplarının eğilme dayanımlarına bakıldığında her iki agrega türünün kullanıldığı numunelerde en yüksek değerler $12,6 \text{ N/mm}^2$ ve $12,9 \text{ N/mm}^2$ olmak üzere katkısız gruplarındadır. Sıcaklık arttıkça eğilme dayanımının azaldığı görülmektedir (Şekil 4.10-4.11). Suda soğutmanın zararlı etkisi havada soğutmaya nazaran daha fazladır.

Kullanılan agrega türüne göre değerlendirildiğinde kalker esaslı agreganın yüksek sıcaklık etkisine daha dayanıklı olduğu görülmektedir. Ancak 1200°C 'de silis esaslı agrega ile üretilen silis dumanı ve uçucu kül katkılı gruplarda az da olsa dayanım gözlenirken, kalker esaslı agregalılarda NKA grubu hariç havada soğuyan diğer grupların basınç dayanımları 0 N/mm^2 olarak belirlenmiş, suda soğutulanlar ise soğutma esnasında dağıldığı için ölçüm yapılamamıştır.



Şekil 4.10 Silis esaslı agrega ile üretilen harçların eğilme dayanımı-sıcaklık ilişkisi



Şekil 4.11 Kalker esaslı agrega ile üretilen harçların eğilme dayanımı-sıcaklık ilişkisi

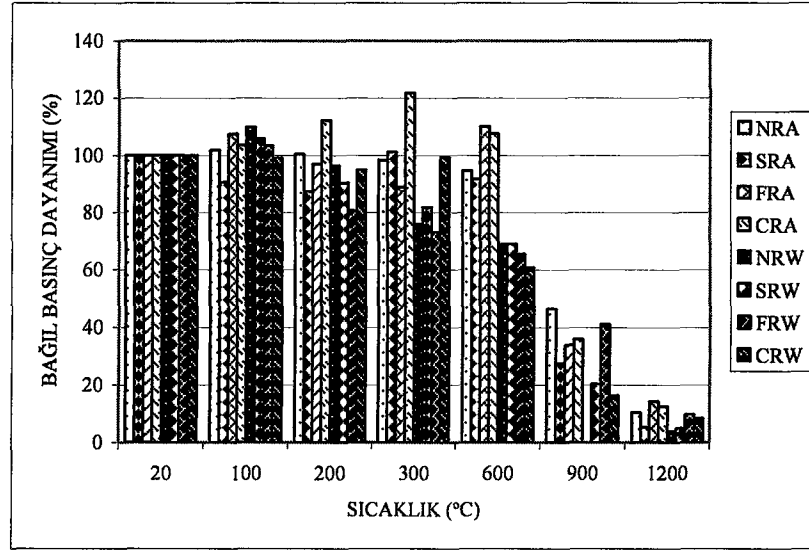
Silis esaslı agreganın kullanıldığı gruplarda her sıcaklık derecesi için, puzolan katkılıların dayanım kaybı katkısız oranla daha az olmuştur. 600°C 'de puzolan katkılılarda eğilme dayanımındaki ortalama kayıp oranı %34 iken katkısız grubunda bu oran %61'dir. Kalker esaslı agreganın kullanıldığı gruplarda ise 300°C 'de en iyi performansı katkısız grubu gösterirken 600°C ve 900°C 'lerde puzolan, özellikle silis dumanı katkılılar katkısız oranla daha iyi performans göstermiştir.

4.4 Basınç Dayanımının Değerlendirilmesi ve İrdelenmesi

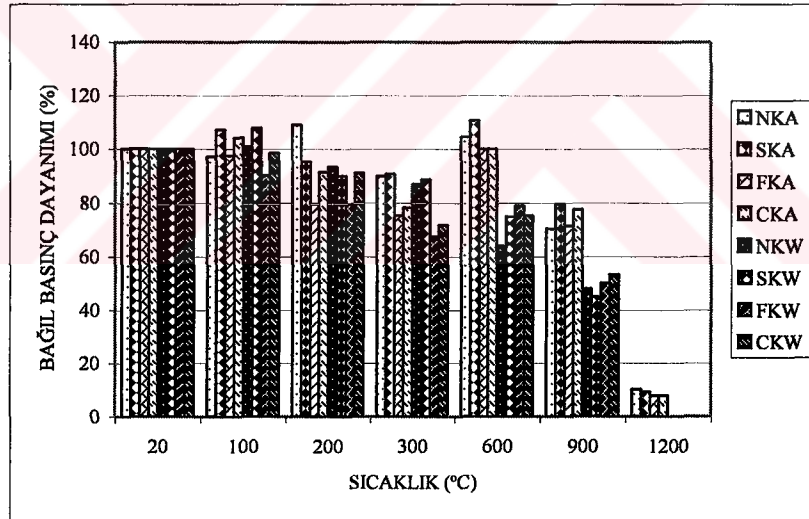
Basınç deneyi, eğilme deneyinde ikiye ayrılan numunelerde yapılmış sonuçlar Ek Çizelge 11-12'de verilmiştir. Kontrol gruplarında puzolan katkılılar katkısız göre daha yüksek dayanımlar göstermişlerdir. Silis esaslı agrega ile üretilen katkısız harçların kontrol grubunda basınç dayanımı 44,2 N/mm², yine aynı agreganın kullanıldığı silis dumanı katkılı numunelerin kontrol grubunda basınç dayanımı 56,6 N/mm² ile en yüksek dayanımı vermiştir. Kalker esaslı agreganın kullanıldığı numunelerin kontrol grubunda da 50,8 N/mm² ile en düşük dayanım katkısızlarda görülürken, en yüksek dayanım 57,7 N/mm² ile uçucu kül katkılı kontrol grubunda görülmüştür.

Yüksek sıcaklık etkisi basınç dayanımını olumsuz yönde etkilemiş, sıcaklık arttıkça basınç dayanımı azalmış, 900°C 'de dayanım kaybı %60 'lara varmıştır (Şekil 4.12-4.13). Suda soğutmanın zararlı etkisi havada soğutmaya nazaran daha fazla olmuştur. Özellikle 600°C 'de suda soğutulan numunelerde dayanım kaybı yaklaşık %30 iken havada soğutulanlarda bu oran

%5 civarındadır. Puzolan katkısız harçların havada soğutulan gruplarında 600°C 'den, suda soğutulan gruplarında ise 300°C 'den itibaren basınç dayanımında düşme başlamıştır.



Şekil 4.12 Silis esaslı agrega ile üretilen harçların basınç dayanımı-sıcaklık ilişkisi



Şekil 4.13 Kalker esaslı agrega ile üretilen harçların basınç dayanımı-sıcaklık ilişkisi

Silis esaslı agregaların kullanıldığı harçlarda basınç dayanımı kaybı kalker esaslı agregaların kullanıldığı harçlara nazaran daha fazla olmuştur. Örneğin 900°C 'de silis esaslı agreganın kullanıldığı havada soğutulan grupların dayanım kaybı %68 iken, aynı sıcaklık ve soğutma şeklinde kalker esaslılarda kayıp %25 'tir.

Puzolan katkılı gruplar ile katkısız grup karşılaştırıldığında, kullanılan agrega türüne göre basınç dayanımları ile sıcaklık arasındaki ilişki farklılıklar göstermiştir. Silis esaslı agregaların kullanıldığı gruplarda 300°C 'ye kadar yüksek fırın cürufu katkılı, 600°C 'de yüksek fırın cürufu ile beraber uçucu kül katkılılar, 900°C 'de ise katkısız grubu diğer gruplara nazaran daha yüksek basınç dayanımlarına sahiptir. Kalker esaslı agreganın kullanıldığı gruplarda ise uçucu kül katkılılar hemen hemen tüm sıcaklıklarda diğerlerine göre daha düşük dayanımlar göstermiş, silis dumanı katkılılar ise silis esaslı agreganın kullanıldığı grupların aksine 300°C, 600°C ve 900°C 'ler gibi yüksek sıcaklıklarda en yüksek basınç dayanımlarını vermiştir. Kalker esaslı agrega ile üretilen ve 1200°C sıcaklığa maruz bırakılan gruplar suda soğutulduğunda tamamen dağıldığı için değerlendirme yapılamamıştır.

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.

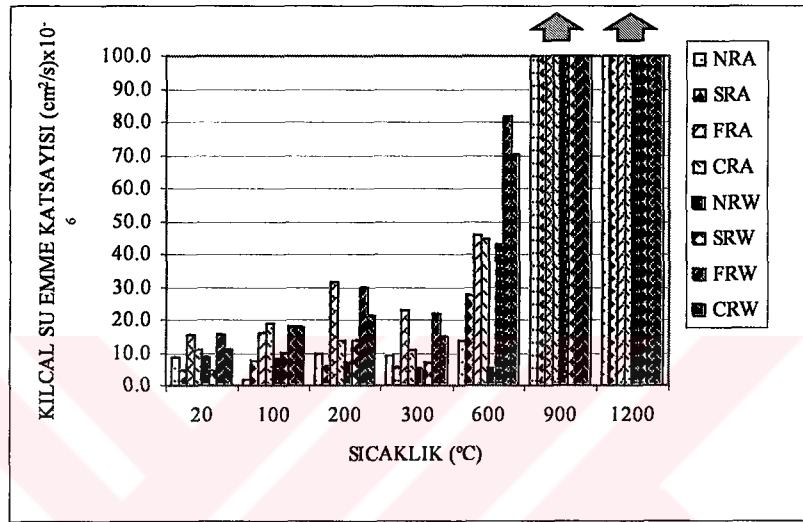
4.5 Kılcal Su Emme Deneylerinin Sonuçlarının Değerlendirilmesi ve İrdelenmesi

Yüksek sıcaklık etkisine maruz kalan numunelerde kılcal su emme deneyi yapılmış, deney sonuçları Ek Çizelge 13-14'te verilmiştir.

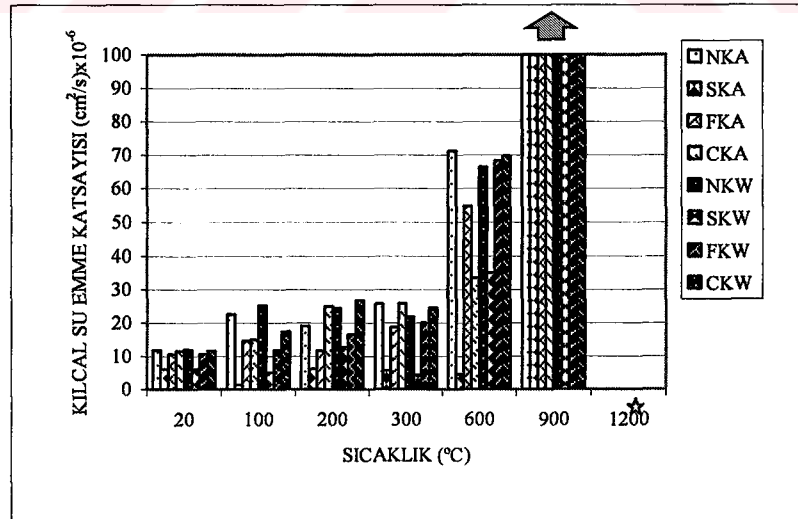
Mineral katkıların, betonun dayanıklılığını arttıran fonksiyonlarının en önemlisi beton boşluk yapısını iyileştirmesi ve dolayısı ile geçirimsizliği azaltmasıdır (Uyan vd., 1998). Silis dumanı çok ince taneli olması nedeni ile, çimento hamuru-agrega arayüzü ve çimento hamuru içindeki boşlukları doldurarak, kılcal boşlukların azalmasını sağlar (Yüzer 1998). Deney sonuçlarına göre, silis dumanı katkılı kontrol numunelerinin kılcal su emme katsayıları en düşüktür. Kullanılan agrega türüne göre bu değerler SRA grubunda $4,8 \times 10^{-6} \text{cm}^2/\text{s}$, SKA grubunda ise $6,13 \times 10^{-6} \text{cm}^2/\text{s}$ 'dir. Diğer gruplarda ise kontrol numunelerindeki silis ve kalker esaslı

agregalardaki minimum değerler, NRA-NRW için $8,3 \times 10^{-6} \text{ cm}^2/\text{s}$, FKA-FKW için ise $10,5 \times 10^{-6} \text{ cm}^2/\text{s}$ 'dir.

Yüksek sıcaklığa maruz kalan harçların kılcal su emme katsayılarının sıcaklıkla değişimi Şekil 4.14-4.15'de verilmiştir. Tüm gruplarda, kılcal su emme katsayılarının sıcaklığın etkisi ile arttığı görülmektedir. 600°C ve 900°C 'lerde tüm grupların kılcal su emme katsayılarında ani bir artış söz konusudur. Bu sıcaklıklarda suda soğutmanın zararlı etkisi havada soğutmadan daha fazladır.



Şekil 4.14 Silis esaslı agrega ile üretilen harçların kılcal su emme-sıcaklık ilişkisi



★ 1200°C'de ölçüm yapılamamıştır.

Şekil 4.15 Kalker esaslı agrega ile üretilen harçların kılcal su emme-sıcaklık ilişkisi

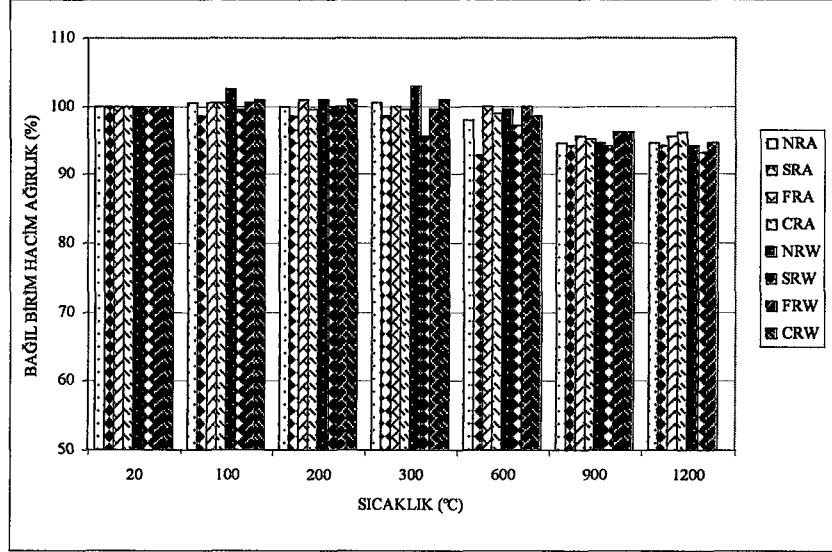
Silis esaslı agreganın kullanıldığı gruplarda en iyi performansı katkısız harçlar, kalker esaslı agreganın kullanıldığı gruplarda ise en iyi performansı silis dumanı katkılı harçlar göstermiştir. Örneğin 600°C 'de NRA ve SRA gruplarının kılcal su emme katsayıları sırasıyla $13,9 \times 10^{-6} \text{ cm}^2/\text{s}$ ve $27,2 \times 10^{-6} \text{ cm}^2/\text{s}$ iken aynı sıcaklıkta NKA ve SKA gruplarının kılcal su emme katsayıları $71,1 \times 10^{-6} \text{ cm}^2/\text{s}$ ve $4,54 \times 10^{-6} \text{ cm}^2/\text{s}$ 'dir.

4.6 Birim Ağırlık ve Su Emme Deneilerinin Sonuçlarının Değerlendirilmesi ve İrdelenmesi

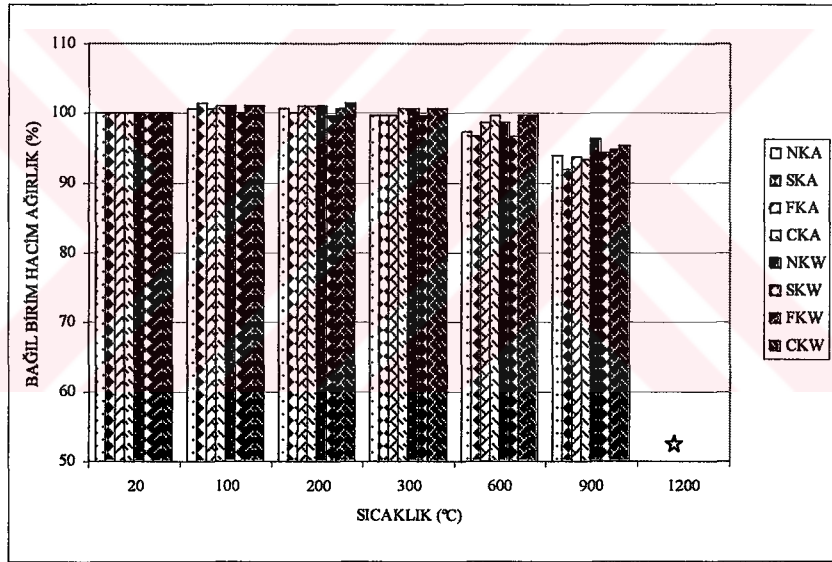
Birim ağırlığın ve su emme oranlarının sıcaklıkla değişimi incelenmiş, deney sonuçları Ek Çizelge 15-18'de verilmiştir. Kontrol numunelerinin birim ağırlık değerleri $2,05 \text{ g/cm}^3$ ile $2,11 \text{ g/cm}^3$ arasında değişmektedir. Her iki tip agreganın da kullanıldığı kontrol numunelerinde en düşük birim ağırlık değerleri uçucu kül katkılarda gözlenirken en yüksek değerler silis dumanı katkılılarda gözlenmiştir.

Deney sonuçlarına göre, birim ağırlık, önemli bir değişiklik olmamasına karşın tüm gruplarda sıcaklık arttıkça azalmaktadır. Azalmalar özellikle 300°C 'den sonra gözlenmiştir (Şekil 4.16-4.17). Genel olarak suda soğutulan numunelerin birim ağırlığındaki azalma havada soğutulanlara nazaran daha düşüktür. Her iki tip agreganın kullanıldığı numunelerde de birbirine yakın değişimler görülmüştür.

Silis esaslı agreganın kullanıldığı gruplarda birim ağırlıktaki azalma 600°C 'de %2-7, 900°C 'de %4-6 arasında değişmektedir. Birim hacim ağırlık kalker esaslı agrega ile üretilen numunelerde 900°C 'de %5 ile %8 oranında azalmıştır. Sıcaklığın etkisi ile serbest ve kimyasal bağlı suyun buharlaşması, malzemenin genleşerek hacminin artması birim ağırlığın azalmasına sebep olmaktadır (Aköz vd., 1995; Anderberg, 2003). Ağırlıkça %10 oranında ikameli olarak katılan puzolan katkının farklı sıcaklıklarda birim ağırlık değişimine herhangi bir etkisi olmamıştır.



Şekil 4.16 Silis esaslı agrega ile üretilen harçların birim ağırlık-sıcaklık ilişkisi



★ 1200°C 'de ölçüm yapılamamıştır.

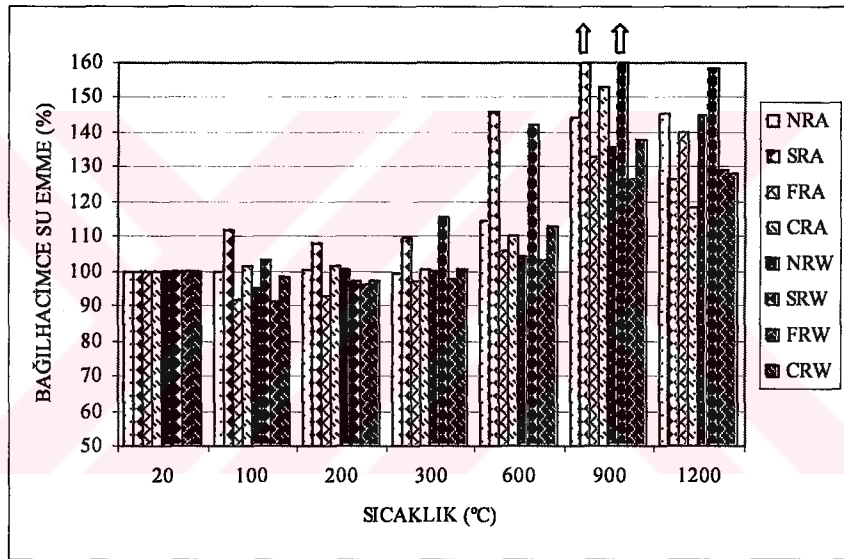
Şekil 4.17 Kalker esaslı agrega ile üretilen harçların birim ağırlık-sıcaklık ilişkisi

Hacimce su emme deneyi sonuçlarına (Ek Çizelge 17-18) göre, silis dumanı katkıları silis ve kalker esaslı agrega ile üretilen kontrol numunelerinde sırası ile %12,8 ve %13,5 ile en düşük hacimce su emme oranlarını göstermiştir. Diğer kontrol numunesi gruplarında ise hacimce su emme oranları birbirlerine çok yakın değerlerde olup silis esaslı agrega ile üretilen numunelerde oranlar %15,9 ile %16,7, kalker esaslı agregalılarda ise bu oranlar %17,4 ile

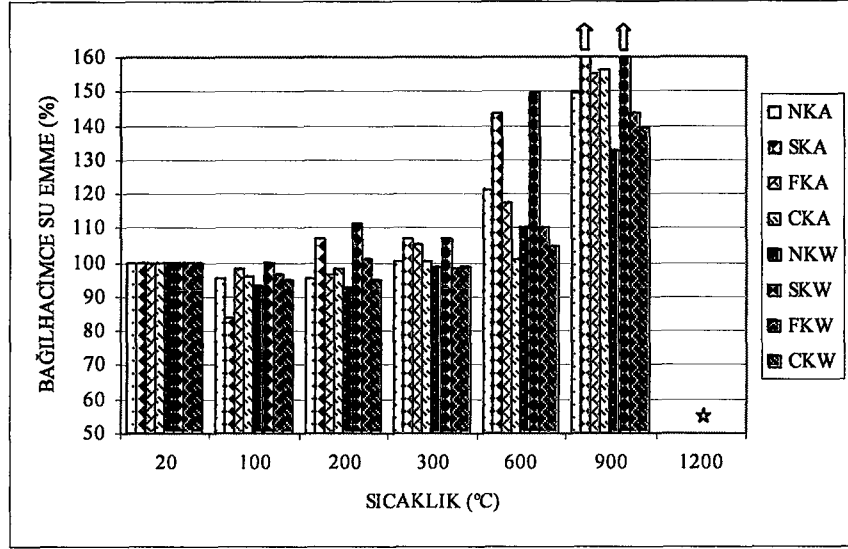
%17,6 arasında değişmektedir (Şekil 4.18-4.19).

Soğutma şeklinin ve agrega türünün hacimce su emme oranına önemli ölçüde etkisi olmamıştır.

Silis dumanı katkılı tüm gruplarda diğer gruplara nazaran su emme oranındaki artış daha fazladır. Örneğin 600°C 'de silis dumanı katkılı gruplarda artış oranı %42 ile %50 arasında değişirken, diğer gruplarda bu oran %3 ile %21 arasındadır. Silis esaslı agrega ile üretilen harçlardan uçucu kül katkılı numuneler hacimce su emme bakımından en iyi performansı göstermiştir. Kalker esaslı agreganın kullanıldığı gruplarda ise 600°C 'de yüksek fırın cürufu katkılı numunelerde hacimce su emme oranı kontrol numunesine çok yakın iken diğer gruplar bu sıcaklıkta %10 ile %20 arasında artış göstermiştir. Ancak genel olarak kalker esaslı agreganın kullanıldığı tüm gruplarda en iyi performansı katkısız numuneler göstermiştir.



Şekil 4.18 Silis esaslı agrega ile üretilen harçların hacimce su emme-sıcaklık ilişkisi



★ 1200°C'de ölçüm yapılamamıştır.

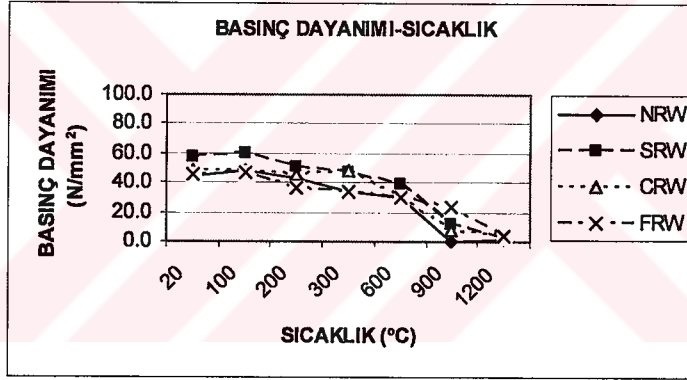
Şekil 4.19 Kalker esaslı agrega ile üretilen harçların hacimce su emme-sıcaklık ilişkisi

5. BASINÇ DAYANIMI-RENK DEĞİŞİMİ İLİŞKİSİNİN ARAŞTIRILMASI

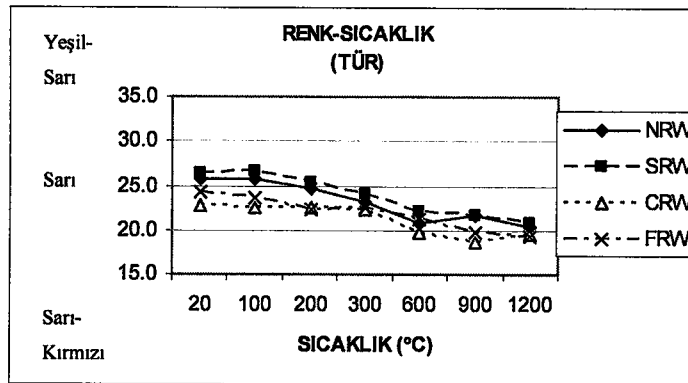
Bölüm 2.2.3.6'da açıklanan Yüzer vd. (2001) tarafından yapılan Munsell renk dizgesinin kullanıldığı deneysel çalışmada, yüksek sıcaklığın silis esaslı agrega kullanılan, silis dumanı katkılı ve katkısız harçlara olan etkileri araştırılmış, harçların basınç dayanımında ve renginde benzer değişikliklerin olduğu görülmüş, rengin tür bileşeni ile basınç dayanımı arasında bir ilişki kurulabileceği sonucuna varılmıştır.

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

Bu çalışma kapsamında farklı agrega ve mineral katkı türleri ile üretilmiş harçlara yüksek sıcaklığın etkisi mekanik ve fiziksel deneyler ile araştırılmış, yapılan deneylerden elde edilen sonuçlara göre yüksek sıcaklık etkisinde, harcın basınç dayanımının azaldığı, aynı zamanda yüzey renginin de sarıdan kırmızıya doğru değiştiği görülmüştür (Şekil 5.1-5.2).



Şekil 5.1 Silis esaslı agrega ile üretilen harçların basınç dayanımı-sıcaklık ilişkisi



Şekil 5.2 Silis esaslı agrega ile üretilen harçların renk değişimi (TÜR)-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. Buradan, yangın görmüş yapılarda beton yüzeyindeki rengin incelenmesi ve tür bileşeninin 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 kullanılan agregaya türüne göre ayrı ayrı ilişkilendirilmiştir.

Yüksek sıcaklığa maruz betonun basınç dayanımını belirlemek için, istatistiksel yöntemden yararlanarak yüzey rengi ile betonun basınç dayanımı arasında her iki agregaya türüne bağlı olarak korelasyon katsayısı yüksek ($r=0,85$) 5.1 ve 5.2 bağıntıları elde edilmiştir.

Silis esaslı agregaya ile üretilen harçlar için;

$$f_{teo} = e^{4,30+0,06H-0,20V-1,21C} \quad 5.1$$

Kalker esaslı agreganın kullanıldığı harçlar için;

$$f_{teo} = e^{7,33-0,06H-0,22V-1,44C} \quad 5.2$$

Her iki bağıntıda da, H, rengin tür bileşeni, V, değer bileşeni, C, doymuşluk bileşeni, f_{teo} , basınç dayanımıdır.

Bu çalışma kapsamında harç numuneler üzerinde deneysel çalışma, irdeleme ve değerlendirmeler yapılmıştır. Ancak basınç dayanımı ile renk değişimi arasında ilişkinin kurulması için beton numuneler üzerinde de deneysel çalışmalar yapılmalıdır. Beton üretiminde silis esaslı kum ile kalker esaslı iri agregaya birlikte yaygın olarak kullanıldığı için, bu çalışmalarda farklı agregaya türleri de bir arada ele alınmalıdır.

6. SONUÇLAR

Yüksek sıcaklık etkisinde kalan harcın basınç dayanımı ile rengindeki değişim arasındaki ilişkinin araştırıldığı bu çalışma kapsamında, silis ve kalker esaslı olmak üzere farklı agregalar ve silis dumanı, uçucu kül, cüruf gibi farklı mineral katkıları kullanılarak üretilen harçlar yüksek sıcaklığa maruz bırakılmış, harcın fiziksel ve mekanik özelliklerindeki değişimlerin belirlenmesi için kontrol deneyleri yapılmıştır. Yüksek sıcaklık etkisinde kalan harçta 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.
- Kalker esaslı agregaya ile üretilen numuneler 900°C 'ye kadarki sıcaklıklarda silis esaslı agregaya ile üretilen numunelere göre daha iyi performans göstermiştir.
- Yüksek sıcaklık etkisinde kalan harçların birim ağırlıklarında önemli bir değişiklik olmamış ancak artan sıcaklıkla birlikte birim ağırlıklar azalmıştır. Hacimce su emme oranları özellikle 600°C ve daha yüksek sıcaklıklarda ani artışlar göstermiştir.
- Kalker esaslı agreganın kullanıldığı harçlarda puzolan katkıları kılcal su emme katsayılarını azaltmıştır. Puzolan katkılı numuneler, bu davranışlarını kalker esaslı agreganın kullanıldığı harçlarda yüksek sıcaklık etkisinde de göstermiştir. Silis esaslı agregaya ile üretilen harçların kontrol numunelerinin kılcal su emme katsayıları ise silis dumanı kullanılması durumunda azalmış, ancak diğer puzolanlar katkısız olarak göre bu olumlu etkiyi göstermemiştir. Silis dumanı bu olumlu etkisini yüksek sıcaklık etkisinde kalker esaslı agregaya ile üretilen numunelerde devam ettirmiş silis esaslı agreganın kullanıldığı gruplarda ise silis dumanı da dahil diğer mineral katkıların herhangi bir yararı görülmemiştir.
- 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 harçlarda artan boşluklardan dolayı, ultrases geçiş hızları tüm gruplarda sıcaklık yükseldikçe azalmıştır.

- Munsell renk dizgesinin kullanıldığı bu çalışmada, rengin tür bileşeni sıcaklık etkisi ile her iki tip agreganın kullanıldığı numunelerde de sarıdan kırmızıya doğru değişmiştir. Değer bileşeninde önemli bir değişiklik gözlenmezken, rengin doymuşluk bileşeni artmıştır. Diğer bir deyişle sıcaklık etkisi ile harcın yüzey rengi sarıdan kırmızıya doğru değişim gösterirken, açıklık ve koyuluğunda belirgin bir değişiklik olmamış, rengin içindeki gri miktarı azalmıştır.
- Harçların mekanik özelliklerindeki değişim, bazı farklılıklar olsa da sıcaklık artışı ile dayanımların azalması şeklinde görülmüştür. Bu azalma, eğilme dayanımlarında, havada ve suda soğutulanlarda 100°C 'den itibaren başlarken, basınç dayanımlarında, önemli ölçüdeki azalma havada soğutulanlarda 600°C 'den, suda soğutulanlarda ise 100°C 'den sonra görülmeye başlamıştır.
- Silis esaslı agreganın kullanıldığı numunelerin basınç dayanımında 600°C 'den sonra önemli ölçüde azalma görülmüştür. Kalker esaslı agreganın kullanıldığı gruplarda ise dayanımdaki bu belirgin azalma 900°C 'den sonra gözlenmiştir.
- Silis dumanı, kalker esaslı agregaya ile üretilen harçlarda 600°C ve 900°C gibi yüksek sıcaklıklarda basınç dayanımı kaybını azaltmış, silis esaslı agregaya ile üretilenlerde ise dayanım kaybını arttırmıştır. Silis dumanı, kalker esaslı agregaya ile kullanıldığında olumlu, silis esaslı agregaya ile kullanıldığında olumsuz etki göstermiştir. Silis dumanının kullanıldığı harçlardaki bu davranış fiziksel özelliklerdeki değişime paralellik göstermiştir.
- Silis dumanı ile kalker esaslı agregaya, uçucu kül ve yüksek fırın cürufu ile silis esaslı agregaya kullanılarak üretilen harçlar, yüksek sıcaklık etkisine maruz kaldıklarında basınç dayanımı açısından iyi sonuçlar vermiştir.
- Renk bileşenlerinde meydana gelen değişim ile basınç dayanımındaki değişim arasında paralellik görülmüştür. Bu özellik, farklı agregaya türü, farklı mineral katkıları ve soğutma rejimleri için benzerlik göstermiştir. Renkteki bu değişimler, betonun maruz kaldığı sıcaklık derecesi hakkında fikir verebilir. Böylelikle yüksek sıcaklığa maruz kalan betonun basınç dayanımı tahmin edilebilir.
- Yüksek sıcaklık etkisinde, harcın basınç dayanımındaki değişim ile renk bileşenleri arasında ilişki kurulmuş, agregaya türüne bağlı olarak korelasyonu yüksek iki farklı bağıntı elde edilmiştir.

Silis esaslı agrega ile üretilen harçlar için;

$$f_{\text{teo}} = e^{4,30+0,06H-0,20V-1,21C}, (r=0,85)$$

Kalker esaslı agrega ile üretilen harçlar için;

$$f_{\text{teo}} = e^{7,33-0,06H-0,22V-1,44C}, (r=0,85)$$

Sonuç olarak bu bağıntılardan yararlanılarak yüksek sıcaklık etkisinde kalan harcın yüzey rengi ölçülecek, rengin, Tür (H), Değer (V) ve Doymuşluk (C) bileşenleri belirlenecek, harcın ve/veya betonun basınç dayanımı tahmin edilebilecektir.



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.

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.

Alonsa C., Andrade C., Castellote M. ve Khoury G.A., (2003), "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., (2003), "Relating Microstructure to Properties", 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.

Binaların Yangından Korunması Hakkında Yönetmelik, 2002.

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.

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.
- Guisse 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*.
- 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., (2003), "Fire & Assessment", *International Centre for Mechanical Sciences, Course on Effect of Heat on Concrete, Udine/Italy*.
- 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.
- Paksoy A.S., (1999), "Boya El Kitabı", TMMOB Kimya Mühendisleri Odası, İstanbul.
- 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, sayı 87-92.
- 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*.

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.

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.

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.

Yeğınobalı, 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, Uncorrected proof.

EKLER

- Ek Çizelge 1 Silis esaslı agregaya ile üretilen harçların renk değişimi (TÜR)
- Ek Çizelge 2 Kalker esaslı agregaya ile üretilen harçların renk değişimi (TÜR)
- Ek Çizelge 3 Silis esaslı agregaya ile üretilen harçların renk değişimi (DEĞER)
- Ek Çizelge 4 Kalker esaslı agregaya ile üretilen harçların renk değişimi (DEĞER)
- Ek Çizelge 5 Silis esaslı agregaya ile üretilen harçların renk değişimi (DOYMUŞLUK)
- Ek Çizelge 6 Kalker esaslı agregaya ile üretilen harçların renk değişimi (DOYMUŞLUK)
- Ek Çizelge 7 Silis esaslı agregaya ile üretilen harçların ultrases geçiş hızları (mm/μs)
- Ek Çizelge 8 Kalker esaslı agregaya ile üretilen harçların ultrases geçiş hızları (mm/μs)
- Ek Çizelge 9 Silis esaslı agregaya ile üretilen harçların eğilme dayanımları (N/mm²)
- Ek Çizelge 10 Kalker esaslı agregaya ile üretilen harçların eğilme dayanımları (N/mm²)
- Ek Çizelge 11 Silis esaslı agregaya ile üretilen harçların basınç dayanımları (N/mm²)
- Ek Çizelge 12 Kalker esaslı agregaya ile üretilen harçların basınç dayanımları (N/mm²)
- Ek Çizelge 13 Silis esaslı agregaya ile üretilen harçların kılcal su emme katsayıları (cm²/s)
- Ek Çizelge 14 Kalker esaslı agregaya ile üretilen harçların kılcal su emme katsayıları (cm²/s)
- Ek Çizelge 15 Silis esaslı agregaya ile üretilen harçların birim ağırlıkları (g/cm³)
- Ek Çizelge 16 Kalker esaslı agregaya ile üretilen harçların birim ağırlıkları (g/cm³)
- Ek Çizelge 17 Silis esaslı agregaya ile üretilen harçların hacimce su emme değerleri (%)
- Ek Çizelge 18 Kalker esaslı agregaya ile üretilen harçların hacimce su emme değerleri (%)

Ek Çizelge 1 Silis esaslı agrega ile üretilen harçların renk değişimi (TÜR)

Sıcaklık (°C)	NRA	NRW	SRA	SRW	FRA	FRW	CRA	CRW
20	25,8		26,4		24,3		22,7	
100	25,1	25,7	26,8	26,6	22,3	23,7	22,5	22,6
200	24,6	24,6	27,2	25,4	22,3	22,4	22,3	22,6
300	22,1	23,2	25,6	24,0	22,7	22,5	22,1	22,4
600	19,7	20,9	21,5	22,0	20,8	21,2	19,6	19,8
900	18,9	21,7	22,5	21,6	20,0	19,7	17,6	18,6
1200	23,2	20,4	20,1	20,7	20,3	19,4	20,1	19,6

Ek Çizelge 2 Kalker esaslı agrega ile üretilen harçların renk değişimi (TÜR)

Sıcaklık (°C)	NKA	NKW	SKA	SKW	FKA	FKW	CKA	CKW
20	27,9		27,3		26,2		25,6	
100	29,5	31,0	28,6	29,5	27,9	26,2	24,7	25,5
200	28,9	28,9	30,1	29,4	26,5	26,8	24,6	25,5
300	28,7	27,6	25,6	26,7	25,7	25,9	25,1	24,8
600	19,8	20,2	19,6	18,7	20,0	20,8	19,5	20,2
900	21,3	20,3	20,8	19,9	19,6	19,7	18,3	18,8
1200	24,3	--	22,1	--	22,8	--	22,7	--

Ek Çizelge 3 Silis esaslı agrega ile üretilen harçların renk değişimi (DEĞER)

Sıcaklık (°C)	NRA	NRW	SRA	SRW	FRA	FRW	CRA	CRW
20	7,2		6,2		6,7		6,5	
100	7,2	7,0	6,3	6,3	6,7	6,1	6,8	6,8
200	7,1	6,7	6,0	5,9	6,6	6,8	6,5	6,0
300	7,0	6,5	5,9	5,5	6,4	6,6	6,3	5,5
600	6,5	5,4	5,6	4,2	5,4	5,0	5,3	4,0
900	7,6	4,7	6,5	4,6	6,8	4,6	6,6	4,5
1200	7,5	4,3	6,7	5,6	6,9	5,4	6,7	5,3

Ek Çizelge 4 Kalker esaslı agrega ile üretilen harçların renk değişimi (DEĞER)

Sıcaklık (°C)	NKA	NKW	SKA	SKW	FKA	FKW	CKA	CKW
20	6,3		6,1		6,4		6,3	
100	6,6	6,6	6,1	6,2	6,7	6,1	6,7	6,0
200	6,9	6,5	6,1	6,1	6,7	6,7	6,5	5,9
300	6,9	6,2	5,7	6,4	6,6	6,4	6,6	5,9
600	6,6	6,0	6,1	3,8	6,1	5,0	5,7	4,8
900	6,9	5,0	7,4	5,3	6,9	5,6	6,6	4,8
1200	7,6	--	7,6	--	7,2	--	6,8	--

Ek Çizelge 5 Silis esaslı agrega ile üretilen harçların renk değişimi (DOYMUŞLUK)

Sıcaklık (°C)	NRA	NRW	SRA	SRW	FRA	FRW	CRA	CRW
20	0,5		0,4		0,5		0,8	
100	0,6	0,5	0,4	0,4	0,4	0,5	0,7	0,7
200	0,5	0,6	0,4	0,4	0,5	0,5	0,74	0,8
300	1,0	0,8	0,5	0,6	0,6	0,8	0,9	1,1
600	0,7	1,1	0,9	0,9	1,4	1,2	1,5	1,2
900	0,4	0,9	1,0	1,3	0,4	1,0	0,8	1,4
1200	1,1	2,8	2,9	2,6	1,9	2,6	1,5	2,0

Ek Çizelge 6 Kalker esaslı agrega ile üretilen harçların renk değişimi (DOYMUŞLUK)

Sıcaklık (°C)	NKA	NKW	SKA	SKW	FKA	FKW	CKA	CKW
20	0,4		0,6		0,5		0,5	
100	0,3	0,2	0,3	0,3	0,3	0,4	0,4	0,4
200	0,2	0,3	0,2	0,3	0,3	0,3	0,4	0,4
300	0,3	0,2	0,5	0,4	0,4	0,3	0,4	0,5
600	0,8	0,7	0,7	0,4	0,9	1,0	1,1	1,0
900	0,7	1,1	0,6	1,3	1,0	1,5	1,1	1,4
1200	1,5	--	1,2	--	1,7	--	2,2	--

Ek Çizelge 7 Silis esaslı agrega ile üretilen harçların ultrases geçiş hızları (mm/μs)

Sıcaklık (°C)	NRA	NRW	SRA	SRW	FRA	FRW	CRA	CRW
20	3,93		4,27		3,85		3,94	
100	3,95	4,08	4,09	4,17	4,01	3,94	3,83	3,88
200	3,89	3,93	4,15	4,19	3,94	3,82	3,92	3,78
300	3,82	3,72	4,06	4,01	3,88	3,67	3,89	3,72
600	3,22	3,19	3,42	3,24	3,42	3,45	3,23	3,04
900	1,31	--	1,33	1,36	1,33	1,62	1,20	1,45
1200	0,93	--	0,96	1,20	0,90	1,50	0,59	0,84

Ek Çizelge 8 Kalker esaslı agrega ile üretilen harçların ultrases geçiş hızları (mm/μs)

Sıcaklık (°C)	NKA	NKW	SKA	SKW	FKA	FKW	CKA	CKW
20	3,96		4,26		3,87		3,97	
100	3,79	3,81	4,30	4,19	4,00	4,02	3,71	4,02
200	3,81	3,81	4,26	4,29	4,06	4,00	4,01	4,00
300	3,79	3,82	4,23	4,15	3,69	3,73	3,67	3,74
600	2,83	2,72	3,77	3,71	3,08	3,38	3,28	3,52
900	2,50	2,52	2,30	1,85	2,48	2,25	2,50	2,32
1200	1,60	--	--	--	--	--	1,39	--

Ek Çizelge 9 Silis esaslı agrega ile üretilen harçların eğilme dayanımları (N/mm²)

Sıcaklık (°C)	NRA	NRW	SRA	SRW	FRA	FRW	CRA	CRW
20	12,5		6,3		10,8		9,2	
100	13,1	14,3	7,5	6,1	12,6	12,5	9,8	9,9
200	9,4	6,7	6,4	6,4	11,3	7,9	10,8	8,0
300	7,2	4,8	6,4	5,3	10,8	5,6	7,6	5,4
600	4,9	2,8	7,0	1,7	5,9	2,5	7,0	2,0
900	0,9	0,0	0,8	0,3	1,4	0,6	1,0	0,3
1200	0,0	--	0,4	0,1	0,0	0,0	1,2	0,0

Ek Çizelge 10 Kalker esaslı agrega ile üretilen harçların eğilme dayanımları (N/mm²)

Sıcaklık (°C)	NKA	NKW	SKA	SKW	FKA	FKW	CKA	CKW
20	13,3		6,6		12,5		12,3	
100	12,8	12,8	5,5	5,3	13,2	12,7	10,9	13,3
200	13,1	11,4	5,8	6,0	11,7	10,9	13,0	13,3
300	12,3	9,1	5,0	5,2	12,0	6,0	9,4	8,0
600	8,4	2,7	9,2	3,7	8,4	4,8	8,8	5,1
900	4,1	1,7	3,7	1,0	5,0	1,9	4,8	1,5
1200	0,1	--	0,0	--	0,0	--	0,0	--

Ek Çizelge 11 Silis esaslı agrega ile üretilen harçların basınç dayanımları (N/mm²)

Sıcaklık (°C)	NRA	NRW	SRA	SRW	FRA	FRW	CRA	CRW
20	44,2		56,6		45,8		48,3	
100	45,0	48,5	51,3	59,8	49,2	47,3	50,0	47,8
200	44,4	42,6	49,5	51,1	44,4	36,9	54,2	45,8
300	43,4	33,5	57,3	46,3	40,7	33,5	58,8	47,9
600	41,8	30,4	21,9	39,0	50,4	30,0	51,9	29,4
900	20,5	0,0	15,6	11,5	13,0	22,9	17,9	7,9
1200	4,6	1,7	3,1	2,8	6,5	4,4	6,0	4,1

Ek Çizelge 12 Kalker esaslı agrega ile üretilen harçların basınç dayanımları (N/mm²)

Sıcaklık (°C)	NKA	NKW	SKA	SKW	FKA	FKW	CKA	CKW
20	50,8		54,2		57,7		54,8	
100	49,9	51,3	58,1	58,5	56,3	52,1	57,1	54,0
200	55,4	47,5	51,7	48,8	46,0	46,0	50,2	50,0
300	45,7	44,2	49,2	48,1	43,5	39,0	42,9	39,4
600	53,1	32,5	60,0	40,6	57,7	45,6	54,8	41,3
900	35,8	24,4	43,1	24,4	41,3	29,0	42,5	29,2
1200	5,2	--	5,0	--	4,5	--	4,2	--

Ek Çizelge 13 Silis esaslı agrega ile üretilen harçların kılcal su emme katsayıları
(cm^2/s) $\times 10^{-6}$

Sıcaklık (°C)	NRA	NRW	SRA	SRW	FRA	FRW	CRA	CRW
20	8,3		4,8		15,3		11,0	
100	2,0	8,0	7,4	9,8	15,8	17,9	18,7	17,6
200	10,0	6,6	5,9	13,6	31,3	29,7	13,5	21,2
300	9,4	5,0	6,0	6,9	23,1	21,6	10,6	14,7
600	13,9	5,3	27,2	42,9	45,9	81,9	44,3	70,3
900	104,0	408,0	533,5	771,4	344,2	551,3	359,8	609,2
1200	331,0	398,0	702,8	585,3	354,0	793,3	785,6	997,5

Ek Çizelge 14 Kalker esaslı agrega ile üretilen harçların kılcal su emme katsayıları
(cm^2/s) $\times 10^{-6}$

Sıcaklık (°C)	NKA	NKW	SKA	SKW	FKA	FKW	CKA	CKW
20	11,8		6,1		10,5		11,5	
100	22,5	25,2	1,4	5,2	14,6	11,8	15,0	17,4
200	19,1	24,4	6,2	12,8	11,6	16,5	25,0	26,7
300	25,7	21,9	5,7	4,4	18,7	20,1	25,8	24,6
600	71,1	66,4	4,5	35,0	54,8	68,3	33,4	69,7
900	212,4	141,3	329,8	207,6	209,5	293,8	266,5	308,2
1200	--	--	--	--	--	--	--	--

Ek Çizelge 15 Silis esaslı agrega ile üretilen harçların birim ağırlıkları (g/cm^3)

Sıcaklık (°C)	NRA	NRW	SRA	SRW	FRA	FRW	CRA	CRW
20	2,06		2,07		2,05		2,06	
100	2,07	2,11	2,04	2,06	2,06	2,06	2,07	2,08
200	2,06	2,08	2,04	2,07	2,07	2,05	2,05	2,08
300	2,07	2,12	2,04	1,98	2,05	2,04	2,05	2,08
600	2,02	2,05	1,92	2,01	2,05	2,05	2,04	2,03
900	1,95	1,95	1,95	1,95	1,96	1,97	1,96	1,98
1200	1,95	1,94	1,95	1,93	1,96	1,94	1,98	1,98

ÖZGEÇMİŞ

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

