

YÜKSEK SICAKLIK UYGULANAN ÇİMENTO HARÇLARININ FARKLI SOĞUTMA KOŞULLARINDAKİ BAZI FİZİKSEL ÖZELLİKLERİ

Gökhan DURMUŞ ve Metin ARSLAN

Gazi Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi, Yapı Eğitimi Bölümü Teknikokullar/Ankara
gdurmus@gazi.edu.tr, metina@gazi.edu.tr

(Geliş/Received: 27.07.2009 ; Kabul/Accepted: 02.03.2010)

ÖZET

Bu çalışmada, yüksek sıcaklık etkisi altında kalmış çimento harçlarının farklı soğutma koşullarında eğilmede çekme dayanımı, basınç dayanımı ve boşluk oranı değişimi incelenmiştir. Çimento harç örneklerine 100, 300, 500, 700 ve 900 °C sıcaklıklar uygulanmıştır. Soğutma işlemi havada ve suda olmak üzere iki şekilde gerçekleştirilmiştir. Laboratuvar ısısına kadar soğutulan örneklerin eğilmede çekme dayanımı, basınç dayanımı ve boşluk değerleri belirlenmiştir. Farklı sıcaklıklar ve farklı soğutma şartlarında veriler kullanılarak çoklu doğrusal regresyon modelleri oluşturulmuştur. Harç örneklerinin eğilmede çekme ve basınç dayanımlarında 100 °C'de bir miktar artış olmasına rağmen bundan sonraki sıcaklıklarda sıcaklık ortalamasına bağlı olarak azalma eğilimi görülmüştür. Soğutma koşullarına göre; 500 °C'deki eğilmede çekme dayanımının havada soğutulmuş örneklerde % 29, suda soğutulmuş da ise % 58; basınç dayanımının havada soğutulmuş örneklerde % 10, suda soğutulmuş da ise % 35 oranında azaldığı görülmüştür. Aynı zamanda boşluk oranının havada soğutulmuş örneklerde % 3.3, suda soğutulmuş örneklerde ise % 9 oranında arttığı görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Yüksek sıcaklık, Civalı Porozimetre, Çimento harcı, porozite,

PHYSICAL PROPERTIES OF CEMENT MORTARS EXPOSED TO HIGH TEMPERATURE IN VARIOUS COOLING CONDITIONS

ABSTRACT

Tensile strength of bending, compressive strength and porosity rate change of cement mortars exposed to high temperature were examined in this study. 100, 300, 500, 700 and 900 C° temperatures were applied to cement mortar samples. Cooling process were implemented in two ways as in air and in water. Tensile strength of bending, compressive strength and porosity rates of samples, which were cooled to laboratory temperature, were determined. Multiple linear regression modeling were made up by using the data from different temperatures and cooling conditions. Although there is an increase in tensile strength and compressive strength of mortar samples in 100 C°, after this temperature it was seen that there was a decrease tendency according to average temperature. According to cooling conditions it was observed that the tensile strength of bending of the samples that were cooled in air were decreased 29%, and that were cooled in water were decreased 58%; the compressive strength of the samples that were cooled in air was decreased 10%, and that were cooled in water were decreased 35%. Furthermore, it was observed that porosity rate of the samples that were cooled in air were increased 3.3%, and that were cooled in water were increased 9%.

Key Words: High Temperature, Mercury Intrusion Porosimetry, Cement mortar, porosity,

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Yüksek sıcaklık altında betonun malzeme özellikleri ile mikro-yapısal değişiklikleri birbiri ile bağlantılıdır [1, 2]. Dolayısıyla, beton malzemelerin çoğunda,

boşluktan dolayı ısı-nem davranışının incelenmesi gerekir [3, 4]. Yapılan çalışmalarda, yüksek sıcaklık etkisi altında kalmış betonun mekanik özellikleri [5-8] ve fiziksel özellikleri (ısı iletkenlik, genleşme, boşluk oranı vb.) araştırıldığı görülmektedir [9-15]. Özellikle

100 °C üzerindeki çalışmalar bulunmaktadır [16-19]. Ayrıca, kütle betonun içerisinde gerçekleşen kimyasal değişiklikleri tahmin edebilmek için nümerik ve fiziko-kimyasal değişimler üzerinde eş zamanlı çalışmalar bulunmaktadır [20-27]. Bunların dışında, yüksek sıcaklıktan doğabilecek zararı değerlendirmenin belli yöntemleri bulunmaktadır. Bu yöntemlerden en kolayı gözlem yapmaktır. Betonda oluşan çatlaklar, dökülmeler ve renk değişiklikleri kolayca görülebilir [28].

Sıcaklık artışı ve çimento tipi gibi karakteristik özellikler araştırılan çalışmada, dayanım özellikleri incelendikten sonra numunelerin artık parçalarıyla civalı porozimetre (MIP, Mercury Intrusion Porosimetry) deneyi yapılmıştır. Sonuçta, çimento birleşiminde etkin olan portlandit, etringit, kalsit, kireç, larnite ve kalsiyum hidroksit silika jelinde artma ve/veya azalma olduğu gözlemlenmiştir [29]. Başka bir çalışmada dört farklı kireç taşı içeren çimentolarla üretilen harçların porozimetresi incelenmiş ve TS EN 197-1'de izin verilen kireç taşının en yüksek %35 miktarında yaklaşık 20 nm dan 40 nm kadar boşluk çaplarının sahip olduğu bulunmuştur [30].

Çimento/uçucu kül hamuru üzerine 1 °C/dk ısınma oranı ile 100 °C dan 600 °C kadar ısıtılan beton numuneleri üzerine basınç dayanım deneyi yapılmış ve sıcaklık artışı ile ters orantılı olarak azalma meydana gelmiştir. Ancak uçucu külün 300 °C sıcaklığa kadar olumlu etkisinin olduğu, literatür bilgilerine uygun olduğu görülmektedir [31].

Bu çalışmada, yangın esnasında oluşan yüksek sıcaklığın harç üzerindeki etkileri ve ani (su) soğutma sırasındaki eğilmede çekme ve basınç dayanımı üzerindeki değişimler araştırılmıştır.

2. MALZEMELER VE METOT (MATERIALS AND METHODS)

2.1. Malzemeler (Materials)

Araştırmada TS EN 197-1 standartlara uygun CEM I 42.5 R çimentosu [32], TS EN 196-1 [33] standarda uygun olarak yuvarlak tanecikli ve silisyum dioksit miktarı en az % 98 olan doğal silis içeren CEN standart kumu ve Ankara şehir içme suyu kullanılmıştır.

2.2. Metotlar (Methods)

2.2.1. Çimento deneyleri (Cement tests)

Çimento örnekleri üzerine standart kıvam, priz başlangıcı ve priz sonu süreleri analizleri TS EN 196-3'de belirtilen esaslara uygun olarak [34]; hacim genleşme değerleri TS EN 196-6 belirtilen esaslara uygun olarak [35]; özgül yüzey ASTM C 188-95'e belirtilen esaslara uygun olarak [36]; özgül ağırlık ve

çimento hamuru su ihtiyacı ASTM C 1437 belirtilen esaslara uygun olarak gerçekleştirilmiştir [37]. Çimentonun kimyasal analizleri, Set çimento sanayi T.A.Ş'de, fiziksel özelliklerine ilişkin deneyler Gazi Üniversitesi Yapı Eğitimi malzeme laboratuvarlarında gerçekleştirilmiştir (Tablo 1).

Tablo 1. Çimento örneklerinin kimyasal ve fiziksel özellikleri (Physical and chemical properties of cement samples)

Kimyasal özellikler		Fiziksel özellikler	
İçerik	%	Deneyler	Miktarı
SiO ₂	19,94	Özgül yüzey, cm ² /g	3305
Al ₂ O ₃	5,25	Su ihtiyacı, gr	28,9
Fe ₂ O ₃	3,38	Priz baş. dk	130
CaO	62,89	Priz sonu, dk.	205
MgO	1,52	Özgül ağırlık, g/cm ³	3,05
SO ₃	2,84	Genişleme, mm	3,12
Na ₂ O	0,8		
K ₂	0,71		
Cl	0,011		
HCl	0,28		
LOI (%)	0,96		

2.2.2. Harç örneklerinin hazırlanması (Making up the mortar samples)

Harç örnekleri, CEN standart kumu ile TS EN 196-1 [33] standardına uygun olarak 40x40x160 mm boyutlarında üçlü çelik harç kalıplarına dökülerek hazırlanmıştır. Bütün deney örneklerinde 0,50 s/ç oranına uygun olarak 450 g çimento ve 1350 g standart kum kullanılarak hazırlanmıştır. Üretilen harç çubukları 28. gün su içerisinde bekletilerek kür edilmiştir.

2.2.3. Yüksek sıcaklık uygulanması (Application of high temperature)

Yüksek sıcaklık uygulanması BS EN 13238 ve BS EN 13501-1 standartlarında belirtilen esaslara uygun olarak gerçekleştirilmiştir [38-39]. Harç örnekleri 1800 °C kapasiteli laboratuvar tipi fırında sıcaklık artış hızı 10 °C/dk olacak şekilde 20, 100, 300, 500, 700 ve 900 °C sıcaklıklar uygulanmış ve bütün sıcaklık değerlerinde 180 dk fırın içerisinde bekletilmiştir. Her sıcaklık değerleri için 54 adet numune kullanılmıştır. Bu numunelerden 27'si havada soğumaya bırakılmış, diğer 27'si ise 23 °C'deki suya daldırılmalı olarak ani soğutma işlemine tabi tutulmuştur. Havada ve suda soğumaya bırakılmış numuneler sıcaklık derecesine ve mevsim koşullarına bağlı olarak sırasıyla 20-180 dk ve 20-90 dk arasında 20 °C sıcaklığa gelinceye kadar bekletilmiştir.

2.2.4. Eğilmede çekme ve basınç dayanım testi (Test of tensile strength and compression strength)

Harç numuneleri TS EN 196-1 standardında belirtilen esaslara uygun olarak eğilmede çekme dayanımı ve basınç dayanımı deneyleri gerçekleştirilmiştir. Deney numunelerinin tümünde cihazın yükleme hızı 0,05 kN/sn olarak alınmıştır. Basınç dayanımı, eğilmede çekme dayanımı deneyi uygulanarak ortadan ikiye bölünen harç prizmaları üzerinde, bu deneyden hemen sonra uygulanmıştır. Deney numunelerinin tümünde cihazın yükleme hızı 0,5 kN/sn olarak alınmıştır.

2.2.5 Boşluk oranı tayini (Determination of pore rate)

Boşluk oranını bulabilmek için, en düşük eğilmede çekme dayanımı veren numuneler üzerinden 3 adet Ø25x30 mm ölçüsünde olmak üzere toplam 18 karot alınmış ve ASTM D 4404 standardında belirlenen esaslara uygun olarak civalı porozimetre cihazı ile boşluk miktarları belirlenerek boşluk oranları hesaplanmıştır [40].

2.2.6. İstatiksel değerlendirme (Statistical evaluation)

İki tür soğutma işlemine tabii tutulan numunelerden elde edilen veriler iki faktörlü tekrarlanan ölçümlü varyans analiz tekniği ile değerlendirilmiştir. Gerçekleştirilen varyans analizi tekniğinde soğuma faktörünün iki seviyesi (havada ve su ile soğuma), sıcaklık faktörünün ise (20, 100, 300, 500, 700 ve 900 °C) altı seviyesi bulunmaktadır. Soğutma ve sıcaklık ortalamaları arasındaki farkın belirlenmesinde çoklu karşılaştırma testlerinden Duncan testi kullanılmıştır.

3. BULGULAR VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSION)

3.1. Çimento bulguları (Cements of results)

Çimento örneklerinin kimyasal analiz sonuçlarına göre $CaO/SiO_2 \geq 2$ olduğu ve MgO muhtevası da kütlece % 5'den küçük olduğundan TS EN 197-1 standarda belirtilen şartlara uygun olduğu görülmüştür. Karışımda kullanılan çimento örneklerine gerçekleştirilen standart kıvam, priz başlama ve priz sonu süreleri ve genleşme değerleri TS EN 196-3'de, özgül yüzey değeri TS EN 196-6'da belirtilen sınırlar içerisinde kaldığı görülmüştür.

3.2. Harç bulguları (Mortar of results)

3.2.1. Eğilmede çekme dayanımı (Tensile strength of bending)

Eğilmede çekme dayanımı deney sonuçlarına ait açıklayıcı istatistikler Tablo 2'de verilmiştir. Eğilmede çekme dayanımı verileri arasında $\alpha=0.05$ anlamlılık düzeyinde farklılıklar olduğu görülmüştür (Tablo 3). Ortalamalar arasındaki farkın belirlenmesinde kullanılan Duncan testi sonuçları Tablo 4. verilmiştir.

Tablo 2'de havada soğutulan örneklerin eğilmede çekme dayanımlarının 100 °C % 2,7 oranında arttığı, 300 °C'de % 9,5, 500 °C'de % 28,7, 700 °C'de % 61,4 ve 900 °C'de % 74 oranında azaldığı; suda soğutulan örneklerin ise, 100 °C'de % 2,1, 300 °C'de % 25,3, 500 °C'de % 57,6, 700 °C'de % 75,5 ve 900 °C'de % 87,5 oranında eğilmede çekme dayanımı kaybı uğradığı görülmektedir.

Tablo 2. Eğilmede çekme dayanımına ait açıklayıcı istatistikler (Explanatory statistics relating to tensile strength of bending)

Soğ. Dur.	Sıcaklık, °C	N	Ort. (Mpa)	Std. Sap.	En küçük	En büyük	Kayıp mik., %
Havada soğutulmuş	20 (Ref)	27	7,217	1,042	4,1	8,7	--
	100	27	7,413	0,386	5,86	7,85	2,7
	300	27	6,528	1,010	4,92	7,94	-9,5
	500	27	5,146	0,600	4,45	6,74	-28,7
	700	27	2,785	0,454	2,01	3,64	-61,4
	900	27	1,879	0,261	1,31	2,36	-74,0
Su ile soğutulmuş	20 (Ref)	27	7,217	1,042	4,1	8,7	--
	100	27	7,067	0,528	5,22	7,77	-2,1
	300	27	5,392	0,427	4,85	6,13	-25,3
	500	27	3,061	0,346	2,4	3,69	-57,6
	700	27	1,766	0,202	1,17	2,04	-75,5
	900	27	0,903	0,205	0,49	1,32	-87,5

N:Örnek sayısı

Her iki soğutma grubundan (havada soğutma ve suda soğutma) bütün sıcaklıklar için eğilmede çekme değerleri referans örneklerden daha küçük olduğu ve sıcaklık artışına paralel olarak eğilmede çekme değerlerinin azaldığı görülmektedir (Tablo 2). Havada soğutma grubu verilerinin suda soğutma grubu verilerine göre; karşılıklı her sıcaklık uygulaması için daha yüksek olduğu görülmektedir (Tablo 2).

Tablo 3. Eğilmede çekme dayanımına ait varyans çözümleme tablosu (Variation analysis table relating to tensile strength of bending)

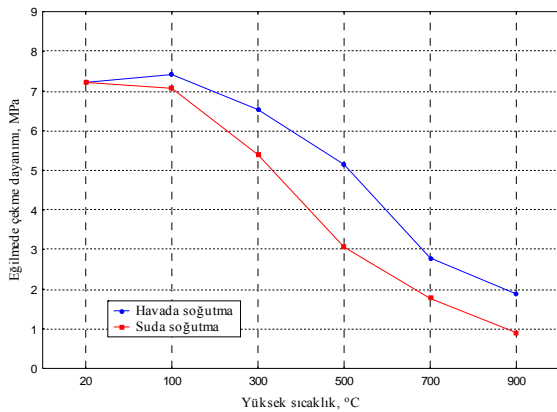
	Kareler Toplamı	Serbestlik dereceleri	Kareler ort.	F-testi	Anlamlılık düzeyi
Soğuma	69,7	1	69,7	544,3	0,00
Sıcaklık	1704,1	5	340,8	2662,3	0,00
Soğuma x Sıcaklık	35,0	5	7,0	54,8	0,00
Hata	27,7	216	0,1		

Tablo 4. Farklı olan gruplara ait Duncan test sonuçları (Duncan test results relating to different groups)

Faktörler	Faktörler	Farklı olan gruplar,					
		1	2	3	4	5	6
Hava soğutma	900	S*					
	700		S*				
	500			S*			
	300				S*		
	20 (Ref)					S*	
	100						S*
Su soğutma	900	S*					
	700		S*				
	500			S*			
	300				S*		
	100					S*	
	20 (Ref)						S*

S*: $\alpha < 0.05$ anlamlılık düzeyindeki farklılıklar

Tablo 3 incelendiğinde taraftan iki soğutma grubu arasında $\alpha=0.05$ anlamlılık düzeyinde fark olduğu görülmektedir. Ayrıca, havada soğutulan örneklerden 100 °C sıcaklık değeri için belirlenen değer referans değerinden büyük olduğu, buna karşın suda soğutulan örneklerden 100 °C'deki değerlerin referansla arasında anlamlı fark olmadığı görülmektedir (Tablo 4). Soğutma şartlarına göre altı sıcaklık değeri için elde edilen eğilmede çekme dayanım değerlerine ilişkin grafik Şekil 1'de verilmiştir.

**Şekil 1.** Eğilmede çekme dayanım sonuçları (The results of tensile strength of bending)

3.2.2. Basınç dayanımı (Compressive Strength)

Basınç dayanımı deney sonuçlarına ait açıklayıcı istatistikler sırasıyla Tablo 5'de verilmiştir. Basınç dayanımı verileri arasında $\alpha=0.05$ anlamlılık düzeyinde farklılıklar olduğu görülmüştür (Tablo 6). Ortalamalar arasındaki farkın belirlenmesinde çoklu karşılaştırma yöntemlerinden Duncan testi sonuçları Tablo 7. verilmiştir.

Tablo 5. Basınç dayanımına ait açıklayıcı istatistikler (Explanatory statistics relating to compressive strength)

Soğ. Dur.	Sıcak. °C	N	Ort. (MPa)	Std. Sapma	En küçük	En büyük	Kayıp mik. %
Havada soğutulmuş	20	54	50,08	7,44	26,96	66,2	-
	100	54	51,61	4,65	38,74	57,7	3,1
	300	54	49,92	3,24	42,63	57,1	-0,3
	500	54	44,99	3,70	38,28	53,9	-10,2
	700	54	33,07	6,51	23,24	43,7	-34,0
	900	54	18,49	4,05	11,20	26,9	-63,1
Su ile soğutulmuş	20	54	50,08	7,44	26,96	66,2	-
	100	54	46,09	3,49	35,75	50,5	-8,0
	300	54	42,10	3,76	31,99	45,9	-15,9
	500	54	32,52	5,46	24,25	39,0	-35,1
	700	54	19,19	0,93	15,87	20,7	-61,7
	900	54	11,11	2,57	6,28	15,4	-77,8

Havada soğutulan örneklerin basınç dayanımları 100 °C % 3.1 oranında arttığı, 300 °C'de % 0.3, 500 °C'de % 10.2, 700 °C'de % 34 ve 900 °C'de ise % 63.1 oranında azaldığı; suda soğutulan örneklerin ise, 100 °C'de % 8, 300 °C'de % 15.9, 500 °C'de % 35.1, 700 °C'de % 61.7 ve 900 °C'de ise % 77.8 oranında basınç dayanımı kaybı uğradığı görülmektedir.

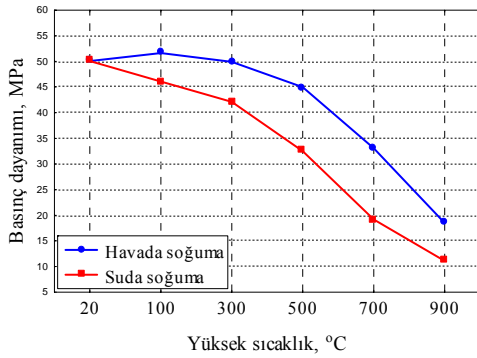
Tablo 6. Basınç dayanımına ait varyans çözümleme tablosu (Variation analysis table relating to compressive strength)

	Kare. Top.	Serbestlik dereceleri	Kareler ort.	F-testi	Anlamlılık düzeyi
Soğutma	9972,9	1	9972,9	428,58	0,00
Sıcaklık	10857,8,0	5	21715,6	933,22	0,00
Soğutma x Sıcaklık	3374,1	5	674,8	29,00	0,00
Hata	14776,1	635	23,3		

Her iki soğutma gruplarında (hava ve suda soğutma) 100 °C'de bir miktar arttığı diğer bütün sıcaklıklar için basınç dayanım değerleri referans örneklerden daha küçük olduğu ve sıcaklık artışına bağlı olarak basınç dayanım değerlerinin azaldığı görülmektedir (Tablo 5). Havada soğutma grubu verilerinin suda soğutma grubu verilerine göre; karşılıklı her sıcaklık uygulaması için daha yüksek olduğu görülmektedir (Tablo 5). Diğer taraftan havada soğutulan örneklerden 100 °C sıcaklık değeri için belirlenen değer referans değerinden büyük olduğu, buna karşın suda soğutulan örneklerden 100 ve 300 °C için elde edilen değerlerin referansla arasında anlamlı fark olmadığı görülmektedir (Tablo 7). Soğutma şartlarına göre 6 sıcaklık değeri için elde edilen basınç dayanım değerlerine ilişkin grafik Şekil 2'de görülmektedir.

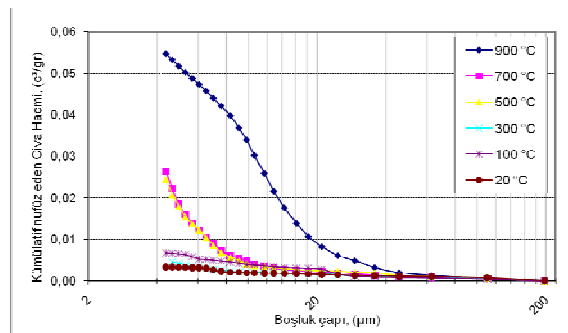
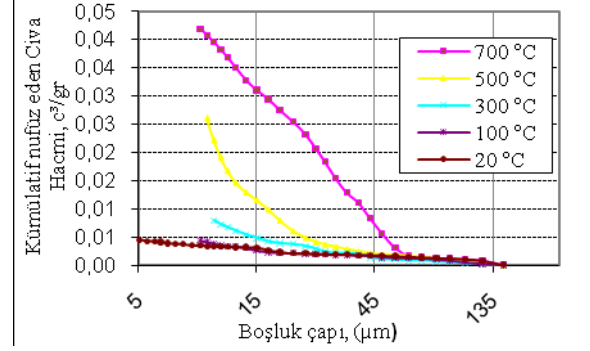
Tablo 7. Farklı olan gruplara ait Duncan test sonuçları (Duncan test results relating to different groups)

Faktörler	Faktörler	Farklı olan gruplar, MPa					
		1	2	3	4	5	6
Hava soğutma	900	S*					
	700	S*					
	500	S*					
	300	S*					
	100	S*					
	20 (Ref)	S*					
Su soğutma	900	S*					
	700	S*					
	500	S*					
	300	S*					
	100	S*					
	20 (Ref)	S*					

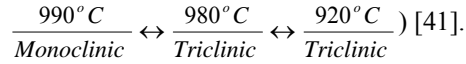
S*: $\alpha < 0.05$ anlamlılık düzeyindeki farklılıklar**Şekil 2.** Basınç dayanımı deneyi sonuçları (Results of compressive strength)

3.2.3. Boşluk yapısı (Pore structure)

Harç numuneleri üzerinden $\varnothing 25 \times 30$ mm boyutlarındaki karotlara sırasıyla havada ve suda soğutulan örneklerin sıcaklık derecelerine göre porozimetre verileri Şekil 4 ve 5’de gösterilmektedir. Şekil 3 ve 4’de yüksek sıcaklığa bağlı olarak boşluk çapı (μm) ile kümülatif nüfuz eden civa hacmi (cm^3/gr) arasındaki değişimleri incelenmiştir.

**Şekil 3.** Havada soğumuş numunelerin boşluk çapı değerleri (Pore diameter values of the samples that were cooled in air)**Şekil 4.** Suda soğumuş numunelerin boşluk çapı değerleri (Pore diameter values of the samples that were cooled in water)

Şekil 3 ve 4 incelendiğinde, sıcaklık değerini artmasıyla numunenin içine nüfuz eden toplam civa hacminde artma gözükmemektedir. Bunun nedenini, çimento hamurundaki jel yapıyı oluşturan kalsiyum silikat hidrate'nin (CSH) katı ögeleri etrafında bulunan adsorbsiyon suyu yardımıyla birbirine bağlanmakta ve yaklaşık 300 °C'den itibaren buharlaşmaya başlamaktadır [30]. Isı daha da artarsa çimento bünyesindeki hidratasyon sonucu oluşan kristal suyu uçarak molekül sistemi ve bağları değişime uğrar ($\frac{1060^\circ\text{C}}{\text{Monoclinic}} \leftrightarrow \frac{1050^\circ\text{C}}{\text{Orthor hom bic}} \leftrightarrow$



Bu değişim sonucunda çimentonun bağlayıcılık özelliği de yok olmaya başlamakta ve oluşan iç gerilmeler neticesinde harç örneklerinde dağılma meydana gelmektedir. Bu durum harç içindeki CaO ısı ve itfaiyenin püskürteceği suyla $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 'e (çözülebilir serbest kirece) dönüşmesiyle açıklanabilir. Hava soğutulmuş örneklerin 300–500 °C sıcaklık aralığında oluşan mikroçatlaklara en yüksek 0.027 cm^3/gr civa dolarken suda soğutulmuş örneklerde 0.032 cm^3/gr civa dolmuştur. Bu durum yüksek sıcaklık uygulanmış harç örneklerin suya ani olarak daldırılması sırasında gerçekleşen hızlı kimyasal tepkimeler sonucu boşluk oranının artmasıyla açıklanabilir. Ayrıca 500 °C'de ve sonraki yüksek sıcaklık değerlerinde 250–500 nm çapındaki kapiler boşluklarda önemli artış olmaktadır. Sıcaklık derecelerine göre havada ve su ile soğutulmuş numunelerin boşluk oranları % olarak Tablo 8’de verilmiştir.

Tablo 8. Karotların toplam boşluk yüzde değerleri (Total pore percentage value of samples)

Soğ. Dur.	Sıcak., (°C)	N	Boşluk oranı ort, (%)	En küçük, (%)	En büyük, (%)	Ref. göre boşluk artışı, (%)
Havada soğutma	20 (Ref)	3	0,298	0,287	0,309	--
	100	3	0,697	0,691	0,703	134
	300	3	0,937	0,912	0,953	215
	500	3	3,316	3,211	3,42	1013
	700	3	6,046	5,774	6,317	1929
	900	3	10,011	9,981	10,047	3259
Su ile soğutma	20 (Ref)	3	0,458	0,328	0,589	--
	100	3	0,881	0,813	0,948	196
	300	3	2,054	2,048	2,059	589
	500	3	8,931	8,454	9,407	2897
	700	3	13,578	13,258	13,898	4456
	900	3	Ölçüle miyor	---	--	--

Tablo 8 incelendiğinde, her iki soğutma durumunda sıcaklık artışına bağlı olarak boşluk oranı sürekli artış göstermektedir. Havada soğutma işleminde 20 °C – 900 °C aralığında boşluk oranı % 134 - % 3259 artış göstermiştir. Suda soğutma işleminde 20 °C – 900 °C aralığında boşluk oranı % 196 - % 4456 artış görülmüştür. Ayrıca, suda soğutma işlemleri sonucunda belirlenen eğilmede çekme ve basınç dayanımlarının her sıcaklık için, havada soğutma işlemlerine göre daha küçük olduğu görülmüştür. Su ile soğutmadaki bu artışların havada soğutmaya göre yüksek olması, ani soğutma sırasındaki harçlarda gerçekleşen kimyasal reaksiyonların sonucu kılcal boşluk hacminin arttığı şeklinde açıklanabilir. Sıcaklık değişimi ile boşluk yüzdeleri arasında çoklu doğrusal regresyon analizi yapılarak tahmin modeli belirlenmiş ve analiz sonuçları Tablo 9’da verilmiştir.

Tablo 9. Çoklu doğrusal regresyon analizi (Multiple linear regression analysis)

Soğ. Dur.	Mekanik deneyler	Regresyon Katsayısı, (R ²)	Ort. Hata. karesi	Regresyon Denklemi	Anlam. düzey
Hava	Eğilmede Çekme	0,971	0,173	Y=7.691-0.00318*S-0.324*B	0,00
	Basınç	0,975	4,545	Y=52.015-0.0113*S-1.807*B	0,00
Su	Eğilmede Çekme	0,977	0,177	Y=7.493-0.00808*S+0.00848*B	0,00
	Basınç	0,981	2,855	Y=50.905-0.0246*S-0.979*B	0,00

S: Sıcaklık, B:Boşluk oranı

Çoklu doğrusal regresyon sonuçlarına göre boşluk oranı ve sıcaklık değeri biliniirse basınç ve eğilmede çekme dayanımlarının küçük bir hata payı ile tahmin etmek mümkün olmaktadır.

4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Yüksek sıcaklık etkisi altında kalmış çimento harçların eğilmede çekme, basınç dayanımı ve boşluk oranı özelliklerinin üzerindeki etkileri araştırıldığı bu çalışmada aşağıdaki sonuçlara varılmıştır.

- Standart kıvam tayini, priz başlama ve priz bitiş süreleri ve genleşme değerleri TS EN 196-3 göre, hava geçirgenlik değeri TS EN 196-6’ya göre belirtilen sınırlar içerisinde.
- 20 °C den 900 °C ye kadar yüksek sıcaklık uygulanan çimento harç örneklerinin yüksek sıcaklık tesiri ile eğilmede çekme ve basınç dayanımlarında sıcaklık yükselişine paralel olarak azalmaları görülmüştür. Buna karşın, sadece havada soğutulan harç örneklerinde 100 °C sıcaklık uygulanmasında bir miktar artış olduğu belirlenmiştir.
- Suda soğutma işlemleri sonucunda belirlenen eğilmede çekme ve basınç dayanımlarının her sıcaklık için, havada soğutma işlemlerine göre daha küçük olduğu görülmüştür.
- Suda soğutma işlemlerinde 100 °C ile 900 °C aralığında eğilmede çekme dayanımı % 2.1 - % 87.5 azalırken basınç dayanımı % 8 - %77.8 azaldığı görülmüştür.
- Havada soğutma şartlarında; 100 °C de eğilmede çekme dayanımı % 2.7 artarken 200 °C de ve 900 °C aralığında % 9.5 - %74 azaldığı, basınç dayanımının ise 100 °C- 900 °C aralığında % 3.1 - % 63.1 azaldığı görülmüştür.
- Her iki soğutma şartlarına göre ~500 °C’de eğilmede çekme ve basınç dayanım değerleri referans örneğe göre % 50’si azalmıştır.
- Her iki soğutma durumunda sıcaklık artışına bağlı olarak boşluk oranı sürekli artış göstermektedir.
- Suda soğutulan beton örneklerinin boşluk oranları havada soğutulanlara göre daha yüksek almaktadır. 500 °C sıcaklıklarda suda soğutulan örneklerinin boşluk oranları havada soğutulanlara göre yaklaşık % 186 daha fazladır.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Bazant Z. B., Chern J.C., “Normal And Refractory Concrete For Lmfbr Applications, Final Report”, NP-2437, **Research Project** 1704-12, 1704-19 Northwestern University, Evanston, 1982.
2. Schneider U., “Behavior Of Concrete At High Temperatures”, **Deutscher Ausschuss Fur Stahlbeton**, Berlin, 15-24, 1982
3. Schneider U., “**Concrete At High Temperatures**”, University Kassel, Monchebergstr 55-82, 1988
4. Şensoy L., “**Betonun Yangın Dayanımı ve Yeniden Kullanılabilirliği**”, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 02-14, 1989

5. Bazant, Z.P., Kaplan, M.F., "Concrete At High Temperatures" **Material Properties and Mathematical Models**, Longman Group, England, (ISBN 0-582-08624-4), 1996
6. X. Fu, D.D.L. Chung, "Reversible Decrease Of The Flexural Dynamic Modulus Of Cement Pastes Up On Heating", **Cement and Concrete**. 27 (6) 839– 844, 1997
7. Malhotra, H.L. "The Effect Of Temperature On Compressive Strength Of Concrete", **Magazine of Concrete**, 875–894. 1956
8. Koury, G.A., Sarshar, R., Sullivan, P.J.E., Grainger, B.N., "Factors Affecting The Compressive Strength Of Unsealed Cement Paste And Concrete At Elevated Temperatures Up To 600", *Wiss. Z. Hochsch. Archit. Bauwes. Weimar*, B 36 (1– 2) 89–92, 1990
9. Rostasy, F.S. Ehm, C., Hinrismeyer K., "Structural Alterations In Concrete Due To Thermal And Mechanical Stresses", J.C. Maso (Ed.), **Pore Structure and Materials Properties**, vol. 1, Chapman & Hall, London-New York, 92– 99, 1987
10. Bazant, Z. P. Review Of Literature On High Temperature Behavior Of Concrete, Pp. 71-142 Of The Report. Evaluation Of The Structural Integrity Of LMFBR Equipment Cell Liners - Results Of Preliminary Investigations By W. J. McAfee, W. K. Sartory, Z. P. Bazant And P. A. Stancampiano. Tennessee, Oak Ridge National Laboratory, (Contract W-7405 Eng 26), January 1976. **Report ORNL-TM-514S. (Available From National Technical Information Service, Springfield, Va.)**
11. Becker, J. M. And Bresler, B. Reinforced Concrete Frames In Fire Environments. **Proceedings Of The American Society Of Civil Engineers**. Vol. 103, No. STL Pp. 211-224, January 1977.
12. Dougill, J. W. Conditions For Instability In Restrained Concrete Panels Exposed To Fire. **Magazine Of Concrete Research**. Vol. 24. Pp. 139-148, 1972.
13. Hundt, J. Zur Wärme- Und Feuchtigkeitsleitung In Beton. (**Heat And Moisture Conduction In Concrete**.) Berlin, Wilhelm Ernst Und Sohn, 1977. **Deutscher Ausschuss Fur Stahlbeton**. Heft 280. Pp. 21-41.
14. McDonald, J. E. Moisture Migration In Concrete. Vicksburg, Miss., U.S. Army Engineers Waterways Experimental Station, Concrete Laboratory, **Technical Report C-75-1**. Pp. 36 + Tables + Plates, May 1975.
15. Neville, A. M. Properties Of Concretes. New York, John Wiley And Sons, **A Halsted Press Book**, 1973.
16. England, G. L. And Ross, A. D. Shrinkage, Moisture, And Pore Pressures In Heated Concrete. Concrete For Nuclear Reactors. Detroit, **American Concrete Institute**, Special Publication SP-34. Vol. II. Pp. 883-907, 1972.
17. Fischer, R. Ober Das Verhalten Von Zementmörtel Und Beton Bei Hoheren Temperaturen. (On The Behaviour Of Cement Mortar And Concrete At High Temperatures.) Berlin, Wilhelm Ernst Und Sohn, 1970. **Deutscher Ausschuss Filr Stahlbeton**. Pp. 61-128, 216.
18. Harmathy, T. Z. Thermal Properties Of Concrete At Elevated Temperatures. **ASTM Journal Of Materials**. Vol. 5, No. 1. March 1970. Pp. 47-74. Reprint: Ottawa, National Research Council Of Canada, DBR Paper No. 426, 1970.
19. Harmathy, T. Z. And Allen, L. W. Thermal Properties Of Selected Masonry Unit Concretes. **Journal Of The American Concrete Institute**. Proceedings Vol. 70, No. 2. Pp. 132-144, February 1973.
20. Zdenek P. Bazant Pore Pressure In Heated Concrete Walls: Theoretical Prediction **Magazine Of Concrete Research** : Vol. 31, No. 107, June 1977
21. Koury, G.A., Grainger, V.N., Sullivan, P.J.E., "Transient Thermal Strain Of Concrete: Literature Review, Conditions Within Specimen And Behaviour Of Individuals Constituents", **Magazine Of Concrete Resource**, 37 (132) 131– 143. 1985
22. Consolazio, G.R., Mcvay, M.C., Rish, J.W., "Measurement And Prediction Of Pore Pressures In Saturated Cement Mortar Subject To Radiant Heating", **ACI Materials, J.** 95 (5) 525–536 1998
23. Rostasy, F.S., Weis, R., Wiedemann, G., "Changes Of Pore Structure Of Cement Mortars Due To Temperature", **Cement Of Concrete Resource**, 157– 164, 1980
24. Piasta, J., "Heat Transformations Of Cement Phases And The Microstructure Of Cement Paste", **Materials Of Construction**, 17 (102) 415– 420 1984
25. Alonso, C., Andrade, C., Menéndez, E., "Evolucio^N Microestructural De Hormigones De Altas Y Ultra Altas Resistencias A Elevadas Temperatures", **Hormigo^N Y Acero**, 221–222 97– 105, 2001
26. Heikal, M., "Effect Of Temperature On The Physico-Mechanical And Mineralogical Properties Of Homra Pozzolan^{ic} Cement Pastes", **Cement Of Concrete. Resource**, 30 1835–1839, 2000
27. Handoo, S.K., Agarwal, S., Agarwal, S.K., "Physicochemical, Mineralogical And Morphological Characteristics Of Concrete Exposed To Elevated Temperatures", **Cement Of Concrete. Resource**, 32 1009–1018, 2002
28. Yüzer N., Aköz F., Öztürk L., D., "Yangına Maruz Yapılarda Betonun Basınç Dayanım-Renk

- Değişimi İlişkisi”, **Yıldız Teknik Üniversitesi Dergisi**, 4, 2001
29. Castellote, M., Alonso, C., Andrade, C., Turrillas, X., Campo, J., “Composition And Microstructural Changes Of Cement Pastes Upon Heating, As Studied By Neutron Diffraction”, **Pergamon**, 1633-1644. 2004
30. P. Pipilikaki, M. Beazi-Katsioti “The Assessment Of Porosity And Pore Size Distribution Of Limestone Portland Cement Pastes” **Construction And Building Materials** 23;1966–1970, 2009
31. Sarshar, R., Khoury, G.A., “Material And Environmental Factors Influencing The Compressive Strength Of Unsealed Cement Paste And Concrete At High Temperatures”, **Magazine Of Concrete Resource**. 45 (162) 51–61, 1993
32. TS EN 197-1, “Çimento: Bölüm-1 Genel Çimentolar- Bileşim Özellikler Ve Genel Kuralları”, **Türk Standartları Enstitüsü**, Ankara, 2002.
33. TS EN 196-1, “Çimento Deney Metotları-Bölüm 1: Dayanım Tayini”, **Türk Standartları Enstitüsü**, Ankara 5-10. 2002
34. TS EN 196-3, “Çimento Deney Metotları-Bölüm 3: Priz Süresi Ve Genleşme Tayini”, **Türk Standartları Enstitüsü**, Ankara, 2002.
35. TS EN 196-6, “Çimento Deney Metotları-Bölüm 6 :İncelik Tayini”, **Türk Standartları Enstitüsü**, Ankara, 2002.
36. ASTM C188 - 95 “Standard Test Method For Density Of Hydraulic Cement”, **ASTM International**, 2003
37. ASTM C1437 - 07 “Standard Test Method For Flow Of Hydraulic Cement Mortar” **ASTM International**,
38. British Standards Institution, BS EN 13501-1, “Fire Classification Of Construction Products And Building Elements. Classification Using Data From Reaction To Fire Tests”. London: **BSI**. 2007.
39. International Standard, ISO 834., “Fire Resistance Test Elements Of Building **ISO Standard** 1975.
40. ASTM D 4404 “Standard Test Method For Determination Of Pore Volume And Pore Volume Distribution Of Soil And Rock By Mercury Intrusion Porosimetry”, **ASTM International**, Aug 31 1984.
41. Hewlett C.P., “Lea’s Chemistry of Cemets and Concrete”, **Fourth edition, Elsevier Book**, 95-126, 2007