

# YÜKSEK SICAKLIĞIN VE FARKLI SOĞUTMA KOŞULUNUN KALKER AGREGALI BETONLAR ÜZERİNDEKİ ETKİLERİNİN ARAŞTIRILMASI

Gökhan DURMUŞ<sup>a</sup>, İlknur BEKEM<sup>b</sup>

<sup>a</sup>Gazi Üniv. Teknoloji Fakültesi Teknikokullar / Beşevler/ ANKARA

<sup>b</sup>Ahi Evran Üniversitesi, Kaman M.Y.O. Kaman / KIRŞEHİR

(Geliş/Received: 25.11.2009; Kabul/Accepted: 19.07.2010)

## ÖZET

Bu çalışmada, yüksek sıcaklığın ve farklı soğutma koşulunun kalker kırmataşlı betonlar üzerindeki etkilerinin fiziksel ve mekanik özellikleri araştırılmıştır. Bu amaçla kalker kırma taş agregası, CEM I 42.5 R çimentosu, süper akışkanlaştırıcı katkı maddesi ve su kullanılarak C25 sınıfı beton üretilmiştir. Üretilen betonlar üzerinde taze ve sertleşmiş beton deneyleri gerçekleştirilmiştir. Taze betonlar 1000x1000x100 mm<sup>3</sup> boyutunda prizma numunelere dökülmüş ve 28 gün sonra bu numunelerden Ø50x100 mm boyutunda karotlar alınmıştır. Karot numunelere 20 (Ref), 100, 200, 300, 400, 500, 600, 700, 800 ve 900 °C yüksek sıcaklık uygulanmıştır. Fırından çıkarılan numuneler hava ve su ile soğutma olmak üzere iki şekilde soğutulmuştur. Bu işlemten sonra karot numunelere ultrases geçiş hızı ve basınç dayanımı deneyleri gerçekleştirilmiştir. Sonuçta, sıcaklık yükseldikçe beton kalitesinin ve dayanımının azaldığı, suda soğutulan örneklerin havada soğutulan örneklere göre basınç dayanımlarının daha yüksek olduğu bulunmuştur. Ayrıca soğutma şekline göre ultrases cihazı ile ölçülen beton kalitesinin değişmediği, 400 °C'de beton basınç dayanımının referans numuneye göre % 50 azaldığı, 700 °C üzerindeki sıcaklıklarda  $\text{CaO}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Ca(OH)}_2$ 'e dönüştüğünden basınç dayanımında % 82 azaldığı tespit edilmiştir.

**Anahtar kelimeler:** Kalker Kırmataş Agregası, Beton, Yüksek Sıcaklık, Basınç Dayanımı, Ultrases geçiş hızı.

## INVESTIGATION OF THE EFFECT OF HIGH TEMPERATURES AND DIFFERENT COOLING CONDITIONS ON THE CONCRETE WITH CALCEROUS AGGREGATES

### ABSTRACT

In this study, it was investigated the physical and mechanical properties of the concretes produced with calcareous aggregate under high temperature applications and different cooling conditions. For this reason, C25 class concrete has been produced by using calcareous crushed stone aggregate, CEM I 42.5 R cement, super plasticizer admixture and water as additional material. Fresh and hardened concrete tests were conducted on produced concrete samples. Concrete samples were casted to 1000x1000x100 mm<sup>3</sup> rectangular prisms and core samples were extracted from these prisms after 28 days. To core samples 20 (Reference), 100, 200, 300, 400, 500, 600, 700, 800 and 900 °C temperature were applied. These samples were cooled using water and air separately. Ultrasound and uniaxial compressive strength test were performed on these samples. As a result, it has been determined that the quality and the strength of the concrete decrease as the temperature increases; that the compressive strength of the samples cooled in water is higher than the ones cooled in air; that the quality of the concrete has not changed which was measured by the ultrasound device according to the cooling type; that the compressive strength of the concrete has decreased 50% when compared to the reference sample in 400 °C; and 82% decrease has been detected in the compressive strength in the temperatures higher than 700 °C since  $\text{CaO}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Ca(OH)}_2$  occurs.

**Keywords:** Calcareous crushed stone aggregate, concrete, high temperature, compressive strength, ultrasound transmission speed.

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Betonarme yapıların en önemli bileşeni olan beton; agregası, çimento, su ve gerektiğinde katkı maddesinin belirli oranlarda homojen olarak karıştırılması ile elde edilen başlangıçta plastik kıvamlı zamanla çimentonun hidratasyonu sebebiyle bulunduğu kalıbın şeklini alarak sertleşen kompozit bir yapı malzemesidir [1]. Oluşan bu kompozit malzeme ile üretilen yapı ve yapı ürünlerinin işlevlerini uzun yıllar boyunca bozulmadan yerine getirmeleri “dayanıklılık” (durability) olarak tanımlanmaktadır.

TS 13501-3 standardına göre yapı malzemelerin yangına dayanıklılık sınıfları açısından; beton: A1 sınıfına girmektedir [2]. Beton termal iletkenliği düşük olduğundan dolayı özellikle yüksek sıcaklıktan çok etkilenecek yapı malzemeleri (Örn: çelik) üzerine kaplama malzemesi olarak kullanıldığı bilinmektedir. Termal iletkenliğin yavaş olması yapı malzemesinin bünyesinde ısının birikmesine ve dış ortamdaki sıcaklık farklılığı nedeniyle yüzeyde su buharına dönüşerek yüzey çatlamalarına sebep olmaktadır [3-4]. Yüzey çatlamaları betonda 200–300 °C’de başlamakta ve sıcaklık yükseldikçe artmaktadır. Bununla beraber dayanıklılığın sağlanabilmesi için beton ve donatı sıcaklığının bu malzemeler için kritik olan sıcaklığa ulaşmaması gerekmektedir [5,6]. Sıcaklık 600°C’ye ulaştığında beton, dayanımının %50’sini, 800°C’de ise yaklaşık %80’ini kaybettiği bilinmektedir [7,8].

Beton hacminin % 60-80 oranında agregası kullanıldığı düşünülürse agregaların dayanım/dayanıklılık üzerindeki etkisinin küçükmeyecek kadar önemlidir [9]. Agregalar temin edildikleri kayaların fiziksel ve kimyasal özellikleri (örneğin; yoğunluğu, dayanımı, geçirimsizliği, boşluk oranı ve mineral yapısı gibi) çok önemli olmaktadır. Yaygın olarak kullanılan agregaların birçoğu belirli sıcaklıklarda ısıtıldığında fiziksel olarak bozulur. Örneğin, kumların büyük çoğunluğunu oluşturan kuvarz 570 °C’de polimorfik bir değişime uğrar, kireçtaşı ve bazalt agregaları 650 °C’ye kadar ısıtıldığında kalıcı termal genleşmeler gösterir. Karbonat kökenli agregalar 700 °C’nin üzerindeki sıcaklıklarda CaO ve CO<sub>2</sub>’e ayrışır. Artan sıcaklıklarda agregada görülen bütün bu kimyasal ve fiziksel değişiklikler betonda önemli sorunlar yaratır [4]. Bunlardan kalsiyum karbonat (CaCO<sub>3</sub>) ve magnezyum karbonat (MgCO<sub>3</sub>) betonda istenmeyen en önemli bileşiklerdir. CaO, su ile reaksiyona girdiğinde kalsiyum hidroksit (Ca(OH)<sub>2</sub>) yani sönmüş kireç meydana getirdiği de bilinmektedir [10,11].

Beton numuneler üzerine yüksek sıcaklık etkisi üzerine birçok çalışma mevcuttur. Bu çalışmadan bazıları; yüksek dayanımlı betonlar üzerinde [12,13], farklı tel takviyeli betonlar üzerinde [14,15], ve hafif agregalar üzerine [16,17] vb., şeklindedir. Ancak literatürde kalker içerikli agregalar kullanılarak

üretilen beton üzerine yüksek sıcaklık etkileri ve soğutma koşullarındaki dayanımlarını inceleyen araştırmaya rastlanmamıştır. Bu çalışmayla, kalker esaslı kırma agregası ile üretilmiş beton dayanımının farklı derecelerdeki sıcaklık ve alternatif söndürme-soğutma işlemlerinden sonra betonun nasıl etkileneceğinin belirlenmesidir.

## 2. MALZEMELER VE METOT (MATERIALS AND METHODS)

### 2.1. Malzemeler (Materials)

Araştırmada; Kırşehir ili Obruk taş ocağı’ndan temin edilmiş ve sırasıyla, birim hacim ağırlıkları 2.67, 2.69 ve 2.70 gr/cm<sup>3</sup> ve tane sınıfları 0-4, 4-16, 16-32 mm olan kalker kırmataş agregaları kullanılmıştır. Karışımlarda, çimento olarak Set Ankara çimento fabrikası ürünü CEM I 42.5 R, kimyasal katkı olarak süper akışkanlaştırıcı (SA) kullanılmıştır. Beton üretiminde kullanılan karışım suyu Ankara şehir şebeke suyudur. Çimentonun fiziksel, kimyasal ve mekanik özellikleri Tablo 1’de verilmiştir.

**Tablo 1.** Çimentonun kimyasal, fiziksel ve mekanik özellikleri (The properties of cement chemical, physical and mechanical)

	Yüzde	Değer	Deneyler	Değer
Kimyasal Analiz, %	SiO <sub>2</sub>	20,41	Özgül yüzey, cm <sup>2</sup> /g	3320
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5,35	Genişleme, mm	1,2
	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,30	Su ihtiyacı, gr	28,5
	CaO	63,50	Priz baş. sür., dak	163
	MgO	1,65	Priz bit. sür., dak	240
	SO <sub>3</sub>	2,93	Özgül ağırlık, g/cm <sup>3</sup>	3,12
	Na <sub>2</sub> O	0,15	Gün	MPa
	K <sub>2</sub>	0,71	3. gün	28,2
	Cl	0,011	7. gün	42,7
	HCl	0,28	28. gün	51,4

Karışımda, polikarboksilat bazlı yüksek oranda su azaltıcı SA katkı, çimento ağırlığının % 1 oranında kullanılmıştır. Katkı maddesinin teknik özellikleri Tablo 2’de verilmiştir.

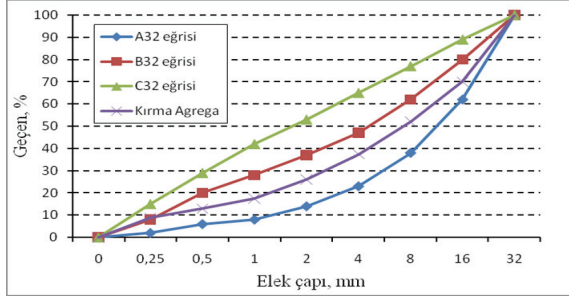
**Tablo 2.** SAK teknik özellikleri (Superplasticizer admixture specifications)

Analizler	Test Metodu	Analiz Sonuçları SA	Sınır Değerleri
Renk	Gözle	Kahverengi	--
Yoğunluk	TS 781 ISO 758 [18]	1,149	1,14 ± 0,03 gr/cm <sup>3</sup>
pH	TS 6365 EN 1262 [19]	7,39	7,5 ± 1
Katı Madde	TS EN 480-8 [20]	38,64	37,0 ± 1,85
Suda Çözüne. Klorür	TS EN 480-10 [21]	Uygundur	≤ % 0,1
Alkali Mik. (Na <sub>2</sub> O Eşdeğ.)	TS EN 480-12 [22]	Uygundur	

## 2.2. Metotlar (Methods)

### 2.2.1. Agrega deneyleri (Test of aggregate)

Agrega tene büyüklüğü dağılımını TS 3530 EN 933-1 [23] ve TS 130 standartlarına göre [24], gerçekleştirilmiş ve en büyük tane çapına bağlı olarak elde edilen gronülometrik eğrinin Şekil 1'de verilmiştir.



**Şekil 1.** En büyük tane çapına bağlı olarak agrega gronülometri sınır eğrileri (Aggregate granulometric boundary curves depending on the maximum grain)

Şekil 1'de elde edilen gronülometrik eğri A<sub>32</sub> ve B<sub>32</sub> eğrileri arasında kaldığı görülmektedir. Ayrıca kırma agreganın birim hacim ağırlığını TS 3529 standardı göre [25], özgül ağırlık ve su emme deneyi TS EN 1097-6 standardına göre [26]; gevşek ve sıkışık birim ağırlık, TS EN 1097-3, standardına göre [27] gerçekleştirilmiş ve elde edilen özellikleri ile literatür sınır değerleri Tablo 3'de verilmiştir.

**Tablo 3.** Kırma agregasının fiziksel özellikleri (Common properties of coarse aggregate)

Tür	Agrega deneyleri	0-4. Agr.	4-16. Agr.	16-32 Agr.	Sınır değerleri
Kırma Agregası	Gevşek birim hacim ağırlık (g/cm <sup>3</sup> )	4,34	4,325	4,10	1,2-1,8 [11]
	Sıkışık birim hacim ağırlık (g/cm <sup>3</sup> )	5,56	4,80	4,75	1,2-1,8 [11]
	Birim Ağırlık (kg/dm <sup>3</sup> )	2,67	2,69	2,70	2,5-2,8 [28]
	Su Emme, (%)	1,0	0,42	0,37	1,00 [29]

Tablo 3'de kırma agreganın gevşek ve sıkışık birim hacim ağırlık, özgül ağırlık, su emme ve aşınma değerleri literatürle uyumluluk gösterdiği görülmektedir.

### 2.2.2. Beton karışımın hazırlanması (Preparation of concrete mixture)

Betonların karışım hesabı TS 802 [30] ve TS EN 206-1 [31] standartlarına uygun olarak belirlenmiştir. Karışımların beton sınıfı C25 olup, hazırlanan betonun s/ç 0.50, katkı betonda ise SA % 1 kullanılmıştır. Beton karışımına giren 1 m<sup>3</sup>'lük malzeme miktarları Tablo 4'te verilmiştir.

**Tablo 4.** Beton karışımı malzemeleri ve miktarları (Concrete mixture materials and quantities)

Malzemeler	Hazırlanan Karışım	
Çimento, kg	301,1	
Su, lt	150,0	
SA, kg	30	
S/Ç	0,5	
Agrega, kg	0-4	691,2
	4-16	700,7
	16-32	569,0

### 2.2.3. Taze beton deneyleri (Experiments of fresh concrete)

Taze betonların çökme deneyi TS EN 12350-2 [32], ve-be deneyi TS EN 12350-3 [33], hava miktarı deneyi ise TS EN 12350-7 standartlarına göre gerçekleştirilmiştir [34] ve elde edilen sonuçlar Tablo 5'te verilmiştir. Taze betonun kıvamının kuru-plastik olduğu tespit edilmiştir.

**Tablo 5.** Taze betonun özellikleri (The properties of fresh concrete)

Taze beton deneyleri	RB	Sınır değerler
Çökme, (cm)	10	10<Çökme<21, [32]
Ve-Be, (sn)	18	5<Ve-be<31, [33]
Hava miktarı, (%)	2,2	En yüksek % 6, [34]
Sıkıştırma faktörü	0,92	1,04<Sıkış Fak.<1,46, [35]

Tablo 5'de taze betonun çökme ve ve-be deney sonuçları dikkate alındığında kullanılan betonun kuru-plastik kıvamlı sınıfına girmekte olduğu görülmektedir [36]. Ayrıca taze betonun hava miktarı % 2,2 ve sıkıştırma faktörünün 0,92 olduğu bulunmuştur. Hava miktarı ve sıkıştırma faktörü standartta belirtilen sınırlar içerisinde kalmaktadır.

### 2.2.4. Sertleşmiş beton deneyleri (Experiments of hard concrete)

Beton numunelerinin hazırlanması TS EN 12390-2 standardına uygun olarak yapılmıştır [37]. Beton karışımları 3 dk sabit karışım süresi ile mikserde üretilmiştir. Elde edilen betonlar üzerinde taze beton deneyleri yapıldıktan sonra 1000x1000x100 mm<sup>3</sup> boyutundaki dikdörtgen prizma numuneler hazırlanmıştır. Numuneler 20±2 °C sıcaklık ve % 50-60 bağıl nem oranına sahip laboratuvar ortamında 24 saat bekletildikten sonra kalıptan çıkarılarak 28 gün süreyle kür havuzunda bekletilmiştir. Numuneler deney gününden 1 gün önce havuzdan çıkarılmış ve Ø50 x 100 mm'lik karot numunelerden toplam 120 adet karot alınmıştır.

### 2.2.5. Yüksek sıcaklık uygulaması (High temperature application)

28 günlük karotlar 1800 °C kapasiteli laboratuvar tipi fırında sıcaklık artış hızı dakikada 10 °C olacak şekilde 100, 200, 300, 400, 500, 600, 700, 800 ve 900

°C'lerde 180 dk süresince yüksek sıcaklığa maruz bırakılmıştır. Bütün sıcaklık değerlerinde 6'şar adet karot numuneler kullanılmıştır. Bu numunelerden 3'ü havada soğumaya bırakılmış, diğer 3'üne ise su ile ani soğutma (daldırma) işlemi uygulanmıştır. Havada soğumaya bırakılmış karotlar sıcaklık derecesine bağlı olarak 20-120 dk arasında 20 °C sıcaklığa gelinceye kadar bekletilmiştir.

Yüksek sıcaklık ve söndürme uygulamasının ardından beton örneklerinin ASTM C 597 standardında belirlenen esaslara uygun olarak ultrases geçiş hızı ölçülmüştür [38]. Beton örnekler üzerinde TS EN 12390-3 [39] standardında belirlenen esaslara uygun olarak basınç dayanım testi gerçekleştirilmiştir.

### 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 [40]. Gerçekleştirilen varyans analizi tekniğinde soğuma faktörünün iki seviyesi (havada ve su ile soğuma), sıcaklık faktörünün ise (100, 200, 300, 400, 500, 600, 700, 800 ve 900 °C) dokuz seviyesi bulunmaktadır. Soğutma ve sıcaklık ortalamalar arasındaki farkın belirlenmesinde çoklu karşılaştırma testlerinden Duncan testi kullanılmıştır.

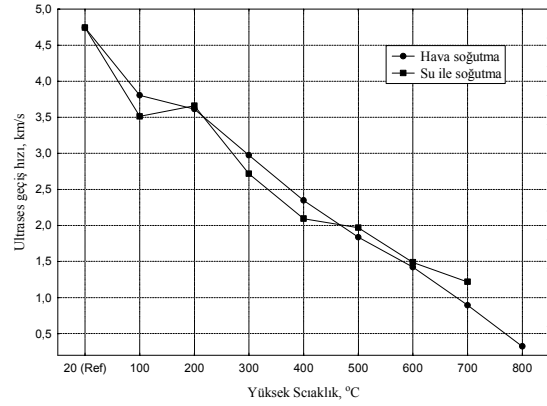
## 3. SONUÇLAR VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSION)

### 3.1. Ultrases geçiş hızı (Ultrasound transmission velocity)

Sıcaklık ve soğutma koşullarına bağlı olarak 100 mm uzunlukta gerçekleştirilen ultrases geçiş hızına ait açıklayıcı istatistiksel bilgiler Tablo 6'de verilmiştir. Ultrases geçiş hızı verilerin dağılımını gösteren çizgi grafik Şekil 2'de görülmektedir.

**Tablo 6.** Ultrases geçiş hızı sonuçları (The results ultrasound transmission velocity)

Koşullar		N	Ultrases geçiş hızı, km/s	En küçük	En büyük	Kayıp mik, %
Soğuma	Sıcaklık					
Hava soğutma	20	3	4,74	4,66	4,80	--
	100	3	3,80	3,74	3,93	-20
	200	3	3,61	3,56	3,69	-24
	300	3	2,97	2,83	3,06	-37
	400	3	2,35	2,26	2,51	-51
	500	3	1,84	1,68	2,00	-61
	600	3	1,42	1,40	1,45	-70
	700	3	0,89	0,87	0,93	-81
	800	3	0,32	0,32	0,33	-93
	900	3	Ölçülemiyor	--	--	--
Su ile soğutma	100	3	3,51	3,45	3,63	-26
	200	3	3,66	3,65	3,67	-23
	300	3	2,72	2,70	2,74	-43
	400	3	2,09	1,78	2,34	-56
	500	3	1,97	1,84	2,08	-59
	600	3	1,49	1,38	1,62	-69
	700	3	1,22	1,18	1,26	-74
	800	3	Ölçülemiyor	--	--	--
	900	3	Ölçülemiyor	--	--	--



**Şekil 2.** Sıcaklık uygulanmış betonların ultrases geçiş hızı değerleri (Ultrasound transmission velocity values of the concrete temperature applied)

Şekil 2'de göre havada soğutulan örneklerin 20 (Ref) sıcaklığa göre 100 °C % 20, 200°C'de % 24, 300 °C'de % 37, 400 °C'de % 51, 500 °C'de % 61, 700 °C'de % 81 ve 800 °C'de % 93 oranında azaldığı; suda soğutulan örneklerin ise, 100 °C'de % 26, 200 °C'de % 23, 300 °C'de % 43, 400 °C'de % 56, 500 °C'de % 59, 600 °C'de % 69 ve 700 °C'de % 74 oranında ultrases geçiş hızı değerleri kaybı uğradığı görülmektedir. 900 °C sıcaklıklarda hem hava hem de suda soğutulmadaki dağılımlar gerçekleştiğinden ultrases geçiş hızı değerleri ölçülemediği görülmektedir.

Yüksek sıcaklık uygulanmamış betonda, hidrate çimento jeldeki hidrat su (HS), adsorbe su (AS) ve serbest su (SS) olmak üç farklı şekilde bulunduğu bilinmektedir. Bu sular sıcaklık yükseldikçe sırasıyla SS>AS>HS şeklinde betondan buharlaşarak ayrılmaktadırlar. 200-300 °C'de hava soğutma ile suda soğutmanın ultrases geçiş hızı değerleri birbirlerine yaklaşmaktadır. Bu durum beton içerisindeki HS'nin Van der Waals bağlarının kopması için gerektirdiği enerjinin kırılması ile açıklanabilir.

Ultrases geçiş hızı verileri arasında  $\alpha < 0.05$  anlamlılık düzeyinde farklılıklar olduğu görülmüştür (Tablo 7). Ortalamalar arasındaki farkın belirlenmesinde kullanılan Duncan testi sonuçları Tablo 8'de verilmiştir.

**Tablo 7.** Ultrases geçiş hızı verilerine ait varyans çözümleme tablosu (Variation analysis table relating to ultrasound transmission velocity values)

	Kareler top.	Sertbestlik derecesi	Orta. karesi	F	Anlamlılık düzeyi
Yüksek Sıcaklık	37,77	6	6,29	434,1	<b>0,000</b>
Soğuma koşulu	0,01	1	0,01	0,8	0,3797
Yüksek Sıcaklık x Soğuma koş.	0,50	6	0,08	5,8	<b>0,001</b>
Hata	0,41	28	0,01		

**Tablo 8.** Ultrases geçiş hızı verilerine ait Duncan testi sonuçları (Duncan test results relating to ultrasound transmission velocity values)

Soğutma koşulu	Yüksek Sıcaklık	Farklı olan gruplar													
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11			
Hava	800	**													
Hava	700	**													
Su	700	**													
Hava	600	**													
Su	600	**													
Hava	500	**													
Su	500	**	**												
Su	400	**	**												
Hava	400	**	**												
Su	300	**	**												
Hava	300	**	**												
Su	100	**	**												
Hava	200	**	**												
Su	200	**	**												
Hava	100	**	**												

\*\* :  $\alpha < 0.05$  göre farklı olan gruplar

Tablo 8 incelendiğinde; 700 °C, 400 °C ve 300 °C'deki hava ve sudaki soğutma koşullarının farklı olduğu, diğer sıcaklık değerlerinin ise soğutma koşulunda farklı olmadığı görülmüştür.

Deney sonuçlarında, havada ve suda soğutma koşullarına bağlı olarak ultrases geçiş hızında farklı sayısal veriler bulunmaktadır. ASTM C 597'ye göre değerlendirildiğinde, ultrases geçiş hızı bilinen örneklerde beton kalitesi hakkında yaklaşık bir tahmin yapılabilmektedir. Elde edilen sayısal değerlere göre sıcaklıklara göre beton kalitesi yaklaşık tahminleri Tablo 9'da görülmektedir.

### 3.2. Basınç dayanımı (Compressive strength)

Yüksek sıcaklığa tabi tutulan örneklerin basınç dayanımlarına ilişkin açıklayıcı istatistiksel bilgiler Tablo 10'da verilmiştir. Basınç dayanımı değerlerini gösteren çizgi grafik Şekil 3'de görülmektedir.

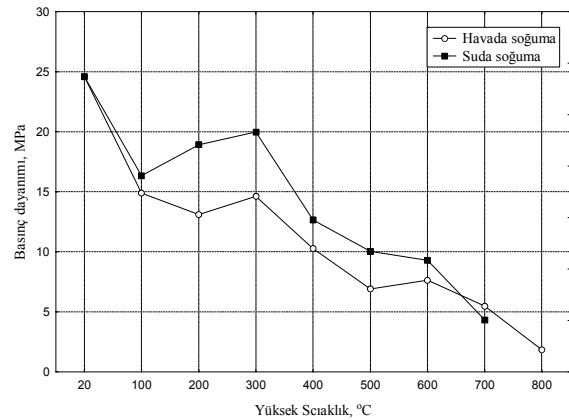
**Tablo 9.** Ultrases geçiş hızı değerlerinin beton kalite değerlendirilmesi (The evaluation of concrete quality of ultrasound pulse velocity of value)

Sıcaklık derecesi, (°C)	Soğutma koşulu	Beton kalitesi
20	-	Mükemmel
100	Hava	İyi
	Su	İyi
200	Hava	İyi
	Su	İyi
300	Hava	Zayıf
	Su	Zayıf
400	Hava	Zayıf
	Su	Zayıf
500	Hava	Çok zayıf
	Su	Çok zayıf
600	Hava	Çok zayıf
	Su	Çok zayıf
700	Hava	Çok zayıf
	Su	Çok zayıf
800	Hava	Çok zayıf
	Su	Numune kaybı

Tablo 9'de görüldüğü gibi, şahit betona (20 °C) göre sıcaklık yükseldikçe beton kalitesinde düşüş gerçekleşmektedir. Havada ve suda soğutma koşullarının beton kalitesine etkisinin aynı olduğu görülmektedir. 100 ve 200 °C'de beton kalitesi "iyi" olarak nitelendirilirken, 300 ve 400 °C'de "zayıf", 500 °C'den 800 °C'ye kadar "çok zayıf" olduğu belirlenmiştir.

**Tablo 10.** Basınç dayanım değerlerine ait açıklayıcı istatistikler (Explanatory statistics relating to compressive strength)

Soğutma koşulu	Koşullar		N	Basınç dayanımı, Mpa	En küçük	En büyük	Kayıp mik, %
	Sıcaklık						
Hava soğutma	20	3	24,6	18,83	33,3	--	
	100	3	14,9	10,85	18,34	-39	
	200	3	13,1	11,01	15,48	-47	
	300	3	14,6	12,12	16,93	-41	
	400	3	10,3	7,54	11,68	-58	
	500	3	6,9	5,1	8,39	-72	
	600	3	7,6	6,09	9,53	-69	
	700	3	5,5	4,47	6,25	-78	
	800	3	1,9	1,62	2,06	-92	
	900	3	Ölçülemiyor	--	--	--	
Su ile soğutma	100	3	16,3	11,42	24,35	-34	
	200	3	18,9	17,66	20,1	-23	
	300	3	20,0	15,84	23,59	-19	
	400	3	12,7	9,88	15,35	-49	
	500	3	10,0	8,62	12,63	-59	
	600	3	9,3	7,47	11,46	-62	
	700	3	4,3	1,62	5,43	-82	
	800	3	Ölçülemiyor	--	--	--	
	900	3	Ölçülemiyor	--	--	--	

**Şekil 3.** Ortalama basınç dayanım sonuçları (The average of compressive strength results)

Şekil 3'e bakıldığında yüksek sıcaklık uygulamasının ardından suda soğutulan örneklerin basınç dayanımlarının 100-700 °C arasında havada soğutulan örneklere göre daha yüksek olduğu görülmektedir. 800 ve 900 °C'de suda soğutmaya bırakılan örnekler parçalandığı için basınç dayanımları belirlenememiştir. Hem havada hem de suda soğutulan örneklerde şahit örneğe (20 °C) göre, 100 ve 200 °C'de ki basınç dayanımlarında azalma görülmektedir. 300 °C yüksek sıcaklık uygulanmış numunelerin basınç dayanımları, 100 ve 200 °C'ye göre bir miktar artış göstermiştir. 400 °C'de suda

soğutulan örneklerin basınç dayanımı, şahit örneğe göre yarıya düşmüştür. Basınç dayanım verileri arasında  $\alpha < 0.05$  anlamlılık düzeyinde farklılıklar olduğu görülmüş ve Tablo 11’de verilmiştir.

**Tablo 11.** Basınç dayanım verilerine ait varyans çözümleme tablosu (Variation analysis table relating to compressive strength)

	Kareler top.	Sertbestlik derecesi	Orta. karesi	F Testi	Anlamlılık düzeyi
Yüksek sıcaklık	1658,9	7	237,0	15,88	<b>0,000</b>
Soğuma koş.	65,1	1	65,1	4,36	<b>0,045</b>
Yüksek Sıcaklık x Soğuma koş.	61,1	7	8,7	0,59	0,763
Hata	477,7	32	14,9		

Ortalamalar arasındaki farkın belirlenmesinde kullanılan Duncan testi sonuçları Tablo 12. verilmiştir.

**Tablo 12.** Basınç dayanım verilerine ait Duncan testi sonuçları (Duncan test results relating to compressive strength)

Soğuma koş.	Yüksek Sıcaklık, °C	Basınç day. MPa	Farklı olan gruplar								
			1	2	3	4	5	6	7	8	9
Hava	800	1,90	**								
Su	700	4,33		**							
Hava	700	5,49	**	**							
Hava	500	6,91	**	**	**						
Hava	600	7,64	**	**	**	**					
Su	600	9,30	**	**	**	**	**				
Su	500	10,04	**	**	**	**	**	**			
Hava	400	10,27	**	**	**	**	**	**			
Su	400	12,66	**	**	**	**	**	**	**		
Hava	200	13,11		**	**	**	**	**	**	**	
Hava	300	14,62			**	**	**	**	**	**	
Hava	100	14,89			**	**	**	**	**	**	
Su	100	16,35			**	**	**	**	**	**	
Su	200	18,91			**	**	**	**	**	**	
Su	300	19,99			**	**	**	**	**	**	
Su	20	24,59									**

\*\* :  $\alpha < 0.05$  göre farklı olan gruplar

Tablo 12’de en düşük basınç dayanımını 800 °C’de hava soğuma durumunda, en düşük basınç dayanımını referans örneklerde gerçekleştirmiştir.

Yüksek sıcaklık değerlerine bağlı olarak ultrases geçiş hızı ve basınç dayanım değerlerini arasında doğrusal regresyon analizi gerçekleştirilmiştir. Regresyon analizi bağımlı değişken ile bir veya daha çok bağımsız değişken arasındaki ilişkiyi incelemek amacıyla kullanılan bir analiz yöntemidir. Gerçekleştirilen regresyon analizi sonucunda yüksek sıcaklık-basınç dayanım değerleri arasındaki ilişki ikinci dereceden  $Y = b_0 + b_1X + b_2X^2$  model denklemi ile açıklanabilmektedir. Sıcaklık değişimine göre

oluşturulan regresyon modeline ilişkin istatistiksel bilgiler Tablo 13’de gösterilmektedir.

**Tablo 13.** Doğrusal regresyon analizi (Linear regression analysis)

Soğuma durumu	Deneyler	Regresyon Katsayısı	Regresyon Denklemi	Anlam. düzeyi
Hava	Ultrases geçiş hızı	0,992	$y = 9E-07x^2 - 0,0061x + 4,6974$	0,05
	Basınç dayanımı	0,888	$y = 2E-05x^2 - 0,0363x + 21,972$	0,05
Su	Ultrases geçiş hızı	0,955	$y = 2E-06x^2 - 0,0059x + 3,8462$	0,05
	Basınç dayanımı	0,874	$y = -4E-05x^2 + 0,002x + 17,981$	0,05

Doğrusal regresyon sonuçlarına göre soğutma durumu ve sıcaklık değerleri bilirse ultrases geçiş hızı ve basınç dayanımlarının küçük bir hata payı ile tahmin etmek mümkün olmaktadır.

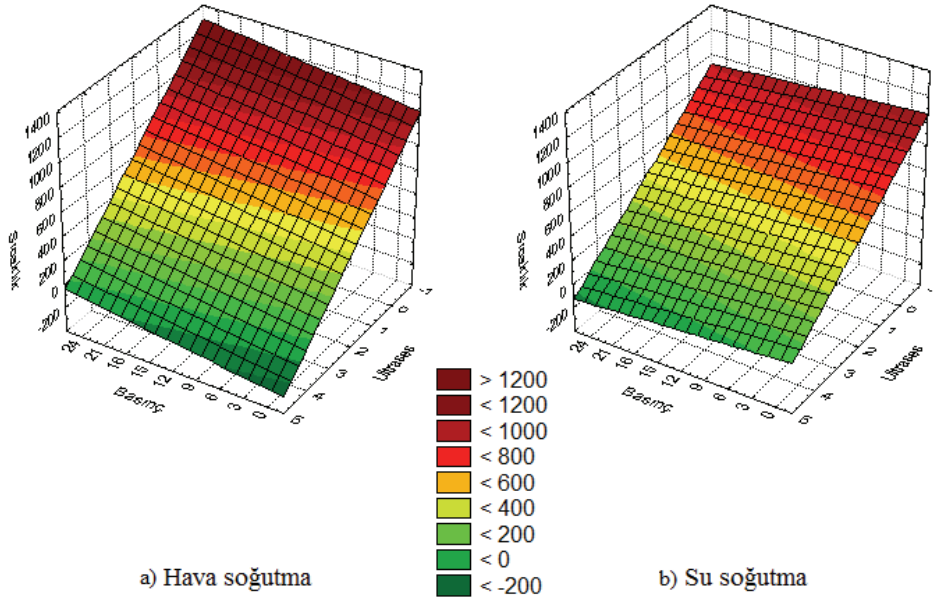
Soğutma koşulu göre incelendiğinde; sıcaklık değerleri, ultrases geçiş hızı ve basınç dayanımına bağlı olarak değişimini gösteren ilişki grafiği Şekil 4’de görülmektedir.

Şekil 4’deki grafik incelendiğinde hava ve su soğutma durumuna göre iki bölüme ayrılmış ve ultrases geçiş hızı ile sıcaklık artışın ters orantılı olarak arttığı görülmüştür. Buna ilaveten ultrases geçiş hızı değerinin basınç dayanımı ile doğru orantılı olarak arttığı görülmektedir.

#### 4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Yüksek sıcaklık uygulamasında havada ve suda olmak üzere iki farklı koşullarda soğutulmuş kalker esaslı beton örnekleri verilerinde gerçekleştirilen basınç dayanımı ve ultrases geçiş hızı testi sonuçlarına göre ;

- Sıcaklık uygulamaların tamamında (100 °C den 900 °C’ye kadar) basınç dayanım değerleri düşmektedir.
- 100 °C’den 600°C’ye kadar suda soğutma uygulanan beton örneklerinin basınç dayanımı, havada soğutulan örneklere göre daha yüksektir.
- 400 °C’de soğutulan örneklerin basınç dayanımı, referans örneğe göre %50 azalmıştır.
- 700 °C yüksek sıcaklığa maruz bırakılan örnekler üzerinde çatlamlar görülmüştür.
- 800 ve 900 °C’de havada soğutmaya bırakılan örnekler soğutma süresi sonunda parçalandığı için basınç dayanımı belirlenememiştir.
- 800 °C yüksek sıcaklık uygulanmış örnekler su ile söndürüldüğünde parçalanmış, 900 °C’de ise suda söndürülen örnekler eriyerek dağılmıştır.



Şekil 4. Soğutma koşulu göre, sıcaklık değerleri, ultrases geçiş hızı ve basınç dayanımı arasındaki ilişki grafiği  
(Correlation graph of concrete the temperature values, ultrasound velocity and compressive strength by cooling condition)

- 700, 800 ve 900 °C yüksek sıcaklık uygulanması sonucu beton içinde yer alan kalker esaslı agreganın  $\text{CaO}_2$ 'e ve su ile söndürme işlemi uygulandığından  $\text{Ca(OH)}_2$ 'e dönüştüğü düşünülmektedir. 700 °C'de suda soğutulan örneklerin referansa göre basınç dayanımında % 82 azalma tespit edilmiştir.

#### KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Durmuş, G., ve Subaşı S., "Betonarme kalıp maliyetinin bilgisayar ortamında tasarımı", **UMES'07 - Ulusal Teknik Eğitim, Mühendislik ve Eğitim Bilimleri Genç Araştırmacılar Sempozyumu**, 619-624, Kocaeli, 2007
2. TS EN 13501-3, "Yapı mamulleri ve yapı elemanları – Yangın sınıflandırması – Bölüm 3: Bina hizmet tesisatlarında kullanılan mamuller ve elemanlar üzerinde yapılan yangına dayanıklılık deneylerinden elde edilen veriler kullanılarak sınıflandırma: Yangına dayanıklı hava kanalları ve yangın damperleri", **Türk Standartları Enstitüsü**, Ankara, 2009.
3. Hossain, K.M.A., "Macro and Microstructural Investigations on Strength And Durability of Purmice Concrete at High Temperature", **Journal of Materials in civil Engineering ASCE**, 18(4) 527-536, 2006
4. Topçu, İ.B., Demir A., Yüksek Sıcaklık Uygulama Süresinin Harç Özelliklerine Etkisi, **7. Ulusal Beton Kongresi**, s. 455-463, İstanbul, 2007.
5. Guise S.E., Short N.R. ve Purkiss J.A., 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, 1996.
6. Burnaz, O., Durmuş, A., Betonarme Yapı Elemanlarının Yangın Başarımları, **Türkiye İnşaat Mühendisliği XVII. Teknik Kongresi, Bildiriler Kitabı ve CD'si**, Sayfa:100-102, Nisan, 2004.
7. Kızılkant, A.B ve Yüzer, N., Yüksek Sıcaklık Etkisindeki Harcın Basınç Dayanımı-Renk Değişimi İlişkisi, **İMO Teknik Dergi**, 4381-4392, 2008.
8. Topçu, İ.B. ve A.Demir, Kiremit kırıklı betonlarda yüksek sıcaklık etkisi. ACE 2006, **7th International Congress in Civil Engineering**, Yıldız Technical University, İstanbul, Turkey, Book of Abstracts, p. 456., 2006.
9. Cilason, N., Beton, **STFA yayınları**, Yayın no:21, İstanbul, 1992.
10. Şimşek, O., Yapı Malzemeleri II. Cilt, **Beta Yayınları**, Ankara, 2007.
11. Erdoğan, T.Y., Beton, **ODTÜ Geliştirme Vakfı Yayını**, 741, 2007.
12. Chan, Y.N., Lou, X., Sun W., The Compressive Strength and Pore Structure of High Performance Concrete After High Temperature up to 800 °C", **Cem. Conc. Res.**, 30 247-251, 2000
13. Piasta, J., "Heat Deformation of Cement Paste Phases and Micro structure of cement paste", **Mater. Struc.**, 17(102) 415-420, 1984
14. Aydın, S., Yazıcı H., Baradan B., "High Temperature Resistance of Normal Strength and Autoclaved High Strength Mortar Incorporated Polypropylene and Steel Fibers", **Cons. and Build Mater**, 22(4) 504-512, 2008
15. Xiao, j., Falkner, H., "On Residual Strength of High-Performance Concrete With and Without Polypropylene Fibres at Elevated Temperatures", **Fire Safty J.**, 41 115-121, 2006
16. Sancak E., Sarı Y.D., Şimşek O. "Effects Of Elevated Temperature On Compressive Strength and Weight Loss of The Lightweight Concrete



- With Silica Fume and Superplasticizer" **Cement and Concrete Composites**, 30: 715-721 2008.
17. Bingöl AF., Gül. R., "Compressive Strength of Lightweight Aggregate Concrete Exposed ot High Temperature", **Indian J.Eng. and Mater. Sci**, 11 68-72, 2004
  18. TS 781 ISO 758, "Sanayide Kullanılan Sıvı Kimyasal Ürünler -20°C'da Yoğunluk Tayini", **Türk Standartları Enstitüsü**, Ankara, 1998.
  19. TS 6365 EN 1262, "Yüzey aktif maddeler-Çözeltilerin veya dispersiyonların pH değerlerinin tayini", **Türk Standartları Enstitüsü**, Ankara, 2005.
  20. TS EN 480-8, "Kimyasal katkıları - beton, harç ve şerbet için- deney metotları- Bölüm 8: Katı madde muhtevası tayini", **Türk Standartları Enstitüsü**, Ankara, 2001.
  21. TS EN 480-10, "Kimyasal katkıları - beton, harç ve şerbet için- Deney metotları- Bölüm 10: Suda çözünebilir klorür muhtevası tayini", **Türk Standartları Enstitüsü**, 2001.
  22. TS EN 480-12, "Kimyasal katkıları - beton, harç ve şerbet için - Deney metotları - Bölüm 12: Alkali muhtevasının tayini", **Türk Standartları Enstitüsü**, 2008.
  23. TS 3530 EN 933-1, "Agregaların geometrik özellikleri için deneyler Bölüm 1: Tane büyüklüğü dağılımı tayini", **Türk Standartları Enstitüsü**, 1999.
  24. TS 130, "Agrega karışımlarının elek analizi deneyi için metot", **Türk Standartları Enstitüsü**, 1978.
  25. TS 3529, "Beton agregalarının birim ağırlıklarının tayini", **Türk Standartları Enstitüsü**, 1980.
  26. TS EN 1097-6, "Agregaların Mekanik ve Fiziksel Özellikleri İçin Deneyler Bölüm 6: Tane Yoğunluğu ve Su Emme Oranının Tayini", **Türk Standartları Enstitüsü**, Ankara, 2002.
  27. TS EN 1097-3, "Agregaların Fiziksel ve Mekanik Özellikleri İçin Deneyler Bölüm 3: Gevşek Yığın Yoğunluğunun ve Boşluk Hacminin Tayini", **Türk Standartları Enstitüsü**, Ankara, 1999.
  28. Erdoğan, Y. T., "Betonu Oluşturan Malzemeler, Agregalar", **THBB**, Ankara, 88-90, 1995.
  29. Şimşek, O., "Beton ve Beton Teknolojisi", **Seçkin yayıncılık**, Ankara, 2007.
  30. TS 802, "Beton Karışım Hesap Esasları", **Türk Standartları Enstitüsü**, Ankara, 2009.
  31. TS EN 206-1, "Beton-Bölüm 1: Özellik, performans, imalat ve uygunluk", **Türk Standartları Enstitüsü**, 2002.
  32. TS EN 12350-2, "Beton-Taze beton deneyleri-Bölüm 2: Çökme (slamp)", **Türk Standartları Enstitüsü**, 2002.
  33. TS EN 12350-3, "Beton- taze beton deneyleri-Bölüm 3: Vebe deneyi", **Türk Standartları Enstitüsü**, 2002.
  34. TS EN 12350-7, "Beton- taze beton deneyleri-Bölüm 7: Hava içeriğinin tayini- basınç metotları", **Türk Standartları Enstitüsü**, 2002.
  35. TS EN 12350-4, "Beton- Taze Beton Deneyleri-Bölüm 4: Sıkıştırılabilme Derecesi", **Türk Standartları Enstitüsü**, 2002.
  36. Topçu. B.İ., "Yapı Malzemeleri ve Beton", Eskişehir 2006
  37. TS EN 12390-2, "Beton - Sertleşmiş beton deneyleri - Bölüm 2: dayanım deneylerinde kullanılacak deney numunelerinin hazırlanması ve kürlenmesi", **Türk Standartları Enstitüsü**, 2002.
  38. ASTM C 597, "Standard test method for pulse velocity through concrete", **ASTM International**, 2002
  39. TS EN 12390-3, "Beton-Sertleşmiş beton deneyleri-Bölüm 3: Deney numunelerinde basınç", **Türk Standartları Enstitüsü**, 2003.
  40. Durmuş G., Şimşek O., Dayı M., "Geri Dönüşümlü İri Agregaların Beton Özelliklerine Etkisi", **Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Der.** Cilt 24, No 1, 183-189, 2009