



**Makale  
(Article)**

## **Yüksek Sıcaklığa Maruz Pomza Ve Silis Dumanı Katkılı Betonların Mekanik ve Fiziksel Özelliklerine Kür Yaşının Etkisi**

**Bahar DEMİREL, Oğuzhan KELEŞTEMUR**

Fırat Üniversitesi, Teknik Eğitim Fakültesi, Yapı Eğitimi Bölümü, 23119, Elazığ/TÜRKİYE  
[bdemirel@firat.edu.tr](mailto:bdemirel@firat.edu.tr), [okelestemur@firat.edu.tr](mailto:okelestemur@firat.edu.tr)

### **Özet**

Bu çalışmada, ince öğütülmüş pomza (İÖP) ile çimentonun ağırlıkça %5, %10, %15 ve %20 oranlarında yer değiştirilmesiyle elde edilen betonların yüksek sıcaklık sonrası mekanik ve fiziksel dayanımları üzerine kür yaşının etkisi incelendi. Ayrıca, elde edilen pomzalı betonların mekanik ve fiziksel özellikleri üzerine silis dumanı (SD) ilavesinin etkisini belirleyebilmek amacıyla, kontrol numunesi dışındaki tüm serilere çimento ile ağırlıkça %10 oranında yer değiştirecek şekilde SD ilave edildi. 28 ve 365 günlük kür sürelerini tamamlayan numuneler laboratuvar tipi fırında 400, 600 ve 800 °C sıcaklıklara kadar ısıtıldı ve bu sıcaklıklarda 1 saat bekletildi. Numuneler sıcaklığa maruz kalmadan önce birim ağırlık, porozite, kılcal su emme ve basınç dayanımı deneylerine tabi tutuldu. Elde edilen bu deney verileri sıcaklık sonrası veriler ile kıyaslanarak kür süresinin numunelerin dayanımı üzerindeki etkisi belirlendi. Sonuçlar, taramalı elektron mikroskobunda (SEM) yapılan incelemeler ile desteklendi. Yapılan çalışma neticesinde, pomza katkısının erken kür yaşlarında betonun dayanımını düşürdüğü ancak ilerleyen kür yaşlarında dayanım artışına neden olduğu belirlendi. Ayrıca, ilerleyen kür yaşlarında silis dumanı katkı numunelerin 400 °C'nin üzerindeki yüksek sıcaklıklarda 28 günlük numunelere göre daha fazla dayanım kaybı gösterdikleri tespit edildi.

**Anahtar Kelimeler:** Beton, Yüksek sıcaklık, Kür yaşı, Pomza, Silis dumanı.

## **Effect of the Curing Age on the Mechanical and Physical Properties of Subjected to Elevated Temperature Concretes Added Pumice and Silica Fume**

### **Abstract**

In this study, the effect of the curing age on the mechanical and physical properties (after high temperature) of concrete specimens obtained by replacing cement with finely ground pumice (FGP) at proportions of 5%, 10%, 15% and 20% by weight was investigated. Besides, with the purpose of determining the effect of silica fume additive on the mechanical and physical properties of the concrete with FGP, silica fume has been added to all series with the exception of the control specimen, such that it would be replaced with cement 10% by weight. The specimens that completed 28 and 365 days curing periods were heated in an electric furnace up to 400, 600 and 800 °C and kept at these temperatures for one hour. The tests unit weight, porosity, sorptivity and compressive strength were performed on the specimens' temperature before. These data were compared with data obtained temperature after and the effect of the curing period on the strength of the specimens was determined. These results were also supported with studies performed on scanning electron microscope. As a result of this study, it was determined that adding the FGP into concrete decreased strength of the concrete in the early curing ages but it increased strength of the concrete in the advanced curing ages. Additionally, it was determined that strength of the specimens with silica fume in the advanced curing ages more reduced than the specimens with cured 28 days especially above 400 °C.

**Keywords:** Concrete, Elevated temperatures, Curing age, Pumice, Silica fume.

*Bu makaleye atf yapmak için*

*Demirel,B., Keleştemur,O., "Yüksek Sıcaklığa Maruz Pomza Ve Silis Dumanı Katkılı Betonların Mekanik Ve Fiziksel Özelliklerine Kür Yaşının Etkisi" Yapı Teknolojileri Elektronik Dergisi 2011,7(1)1-13*

*How to cite this article*

*Demirel,B., Keleştemur,O., "Effect of the Curing Age on the Mechanical and Physical Properties of Subjected to Elevated Temperature Concretes Added Pumice and Silica Fume, Electronic Journal of Construction Technologies, 2011,7(1)1-13*

## 1. GİRİŞ

Beton sertleşmiş çimento hamuru ve agregalardan meydana gelen heterojen yapıdaki bir malzemedir [1]. Betonun yangına karşı dayanıklı bir malzeme olduğuna inanılmasına rağmen, yapılan çalışmalar betonun yüksek sıcaklıkta önemli hasarlara uğradığını göstermiştir [2]. Beton bir bütün olarak düşünüldüğünde, genellikle içindeki sertleşmiş çimento hamuru ve agrega gibi bileşenlerin termal genleşmelerinin birbirinden farklı olduğu bilinir. Bu nedenle, betondaki sıcaklık değişimleri, içerisindeki bileşenlerde birbirinden farklı hacim değişmelerine, çatlak oluşumuna ve betonun dayanımının azalmasına neden olur. Bu olay “betondaki bileşenlerin termal uyumsuzluğu” olarak bilinmektedir [3]. Sertleşmiş çimento hamuru oda sıcaklığından yaklaşık 150 °C ye ısıtıldığında maksimum % 0.2 oranında genişir [4]. Sıcaklık 150 °C den 300 °C ye arttırıldığında zaman sertleşmiş çimento hamuru büzölmeye başlar. Sıcaklık 800 °C ye arttırıldığında ise çimento hamurundaki büzölme % 2.2 ye kadar çıkabilir. Genellikle, 150 °C nin üzerindeki yüksek sıcaklıklarda agregalar genişip dağılmaya başlarken, hidratasyon ürünlerinin dehidratasyonu sonucu çimento pastası büzölür. Bu nedenle, yüksek sıcaklık şartları altında termal genleşmeler ve çatlamlar gelişir [1].

Betonun termal iletkenliği düşük olduğu için, hızlı ısıtıldığı zaman betonun dışı ile iç kısmı arasında termal farklılıklar meydana gelerek betonun çatlamasına da yol açabilir [1]. Termal farklılık, betonun özgül ısı ve termal iletkenliği gibi termal özellikleri ile ısıtma özelliklerine bağlıdır [5]. Ancak, termal etkiler numunenin hacmi ve şekli, uygulanan ısıtma yöntemi ve hızı ile ilgili olduğundan ısıtma hızının etkisi tek başına değerlendirilemez [1].

Çimento hamuru, ısınma esnasında önemli fiziksel ve kimyasal değişimlere uğradığından en kararsız beton bileşenidir. Çimento hamurunun, 100-200°C civarındaki düşük sıcaklıklardaki davranışında buharlaşabilen su etkin rol oynamaktadır. Kimyasal ayrışma ve suyunun kaybı 100°C'nin üzerindeki sıcaklıklarda, termal etkiler ise 600°C'nin üzerindeki sıcaklıklarda daha önemli olmaktadır. Kimyasal ayrışma ve bağ suyunun kaybı çimento hamurunun mikroyapısında değişikliklere neden olur. Çimento hamurundaki kimyasal bağlar, kohezif kuvvetler (Van der Waals), porozite ve gözenek boyut dağılımı değişikliğe uğrar [6].

Isıtılmış betonun çatlakları soğuma süresince büyür. Bu durum, önemli hacim artışı ile sonuçlanan Ca(OH)<sub>2</sub>' nin ayrışmasının bir sonucudur. Bu yüzden silis dumanı, uçucu kül, pomza v.b. çimento katkı maddelerini içeren çimento hamurlarında puzolanik reaksiyondan dolayı Ca(OH)<sub>2</sub>' nin azalması, soğumadan dolayı oluşacak olan çatlakların azalmasına yardımcı olabilir. Ancak, Ca(OH)<sub>2</sub> in ayrışma sıcaklığı olan 500 °C nin üzerinde çoğu beton yapısal özelliklerini kaybeder [1].

Farklı beton numuneler üzerine yüksek sıcaklığın etkisini belirleyebilmek amacıyla; yüksek dayanımlı betonların yüksek sıcaklıktaki davranışları [7-11], çelik ve karbon fiber takviyeli betonlar üzerine yüksek sıcaklığın etkisi [12, 13], yüksek sıcaklığa maruz bırakılmış hafif ve normal agrega ile üretilen betonların mukayese edilmesi [14, 15], erken yaşlarda normal betonun mekanik dayanımı üzerine yüksek sıcaklığın etkisinin belirlenmesi [16] gibi pek çok çalışma yapılmıştır.

Literatürde silis dumanı, uçucu kül, yüksek fırın cürufu, metakaolin ve pomza gibi mineral katkı maddeleri içeren betonların yüksek sıcaklık sonrası performanslarını inceleyen çalışmalar da mevcuttur [17-23]. Ancak, literatürde silis dumanı ve öğütölmüş pomzayı birlikte içeren betonların korozyon davranışlarını inceleyen bir çalışma mevcut olmakla birlikte [24], bu betonların yüksek sıcaklık sonrası dayanımları üzerine kür yaşının etkisini inceleyen bir çalışmaya rastlanmamıştır. Yapılan bu çalışmanın amacı, pomza ve silis dumanı katkılı betonların yüksek sıcaklık sonrası mekanik ve fiziksel dayanımları üzerine kür yaşının etkisini belirleyerek literatüre bu doğrultuda bir katkı sağlamaktır.

## 2. MATERYAL VE METOT

### 2.1. Malzemeler

Çalışmada kullanılan pomza; Elazığ yöresi Meryem dağından temin edilmiştir. Doğal pomza, puzolanik reaksiyona girebilmesi için çok ince öğütüldükten sonra 0.075 mm'lik eleklerden elenerek beton karışımlarında kullanılmıştır. İnce öğütülmüş pomza (İÖP) ile üretilen betonların yüksek sıcaklık sonrası dayanımları üzerine silis dumanının (SD) etkisini belirleyebilmek amacıyla, çimento ile ağırlıkça %10 oranında yer değiştirerek kullanılan silis dumanı Antalya Eti Elektro Metalürji A.Ş. den temin edildi.

Beton karışımlarında çimento olarak ÇİMENTAŞ Elazığ çimento fabrikasından temin edilen TS EN 197-1 standardına [25] uygun CEM I 42,5 N tipi Portland çimento kullanıldı. Çalışmada kullanılan SD, İÖP ve çimentonun fiziksel ve kimyasal analiz değerleri karşılaştırmalı olarak Tablo 1'de verilmiştir.

**Tablo 1.** Çimento ve mineral katkıların fiziksel ve kimyasal özellikleri

Oksit Bileşenleri ( %)	CEM I 42,5 N	SD	İÖP
Silisyum Dioksit (SiO <sub>2</sub> )	21.12	93.0–95.0	49.52
Alüminyum Oksit (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	5.62	0.4–1.4	16.72
Demir Oksit (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	3.24	0.4–1.0	11.26
Kalsiyum Oksit (CaO)	62.94	0.6–1.0	8.26
Magnezyum Oksit (MgO)	2.73	1.0–1.5	4.54
Kükürt Trioksit (SO <sub>3</sub> )	2.30	-	-
Sodyum Oksit (Na <sub>2</sub> O)	-	0.1–0.4	-
Potasyum Oksit (K <sub>2</sub> O)	-	0.5–1.0	-
Karbon (C)	-	0.8–1.0	-
Kükürt (S)	-	0.1–0.3	-
Kızdırma Kaybı	1.78	0.5–1.0	1.68
Yoğunluk, (g/cm <sup>3</sup> )	3.10	2.20	2.8

Çalışmada, Elazığ ili Palu yöresinden temin edilen, ince (0–4 mm) kum ve iri (4–8 mm) agregalar kullanılmıştır. Beton karışımları %65 ince, %35 iri agregalar olacak şekilde hazırlanmıştır. Agregaların birim ağırlığı 2,5 (g/cm<sup>3</sup>) ve su emme miktarları ise % 3,1dir. Çalışmada kullanılan agregaya ait granülometri dağılımı Tablo 2'de verilmiştir. Beton karışım suyu olarak şebeke suyu kullanılmıştır.

**Tablo 2.** Çalışmada kullanılan agregalar granülometrisi

Elek boyutu / mm	8	4	2	1	0.50	0.25
Geçen / %	100	65	48	33	19	7

### 2.2. Karışım Oranları ve Detayları

Yapılan bu çalışmada kontrol serisi, pomzalı seriler ve pomza ile silis dumanını birlikte içeren silisli seriler olmak üzere üç ana beton serisi hazırlandı. Bu 3 ana seri sırasıyla K, P ve PS şeklinde kodlandı. K serisi betonlar; kontrol grubu olup herhangi bir mineral katkı içermemektedir. P kodlu seriler (P5, P10, P15 ve P20); çimento ile İÖP'nin ağırlıkça %5, %10, %15 ve %20 oranında yer değiştirilmesi ile elde edilen serilerdir. PS kodlu seriler ise (PS5, PS10, PS15 ve PS20); İÖP içeren beton serilerine çimento ile ağırlıkça %10 oranında yer değiştirecek şekilde SD ilave edilmesiyle elde edilen serilerdir. Tüm beton serilerinin Tablo 3'de verilen karışım oranları TS 802 standardına göre hesaplandı [26]. Karışımların hazırlanması esnasında herhangi bir kimyasal katkı maddesi kullanılmadı.

Hazırlanan beton numunelerinin basınç dayanımı, porozite, kılcal su emme ve yüksek sıcaklık dayanımı gibi mekanik ve fiziksel özellikleri üzerine kür süresinin etkisini belirleyebilmek amacıyla 100 mm lik küp numunelerden 360 adet hazırlandı. Kalıba yerleştirildikten 24 saat sonra kalıptan çıkarılan numuneler 23±2 °C de kirece doymuş suda 28 ve 365 gün süreyle kür edildi.

**Tablo 3.** Beton karışım miktarları, kg/m<sup>3</sup>

Numune	Su	İnce Agrega (0-4 mm)	İri Agrega (4-8 mm)	Çimento	İÖP	SD
K	200	1043	560	400	-	-
P5	200	1043	560	380	20	-
P10	200	1043	560	360	40	-
P15	200	1043	560	340	60	-
P20	200	1043	560	320	80	-
PS5	200	1043	560	340	20	40
PS10	200	1043	560	320	40	40
PS15	200	1043	560	300	60	40
PS20	200	1043	560	280	80	40

### 2.3. Uygulanan Isıtma ve Soğutma Periyotları

Isıtma ve soğutma süreci, numunelerin yüksüz olarak istenilen sıcaklık derecesine kadar ısıtılması ve fırın içerisinde oda sıcaklığına kadar soğutulduktan sonra deneylerin yapılması prensibine göre planlanmıştır.

Kür süresini tamamlayan numuneler 50 °C lik etüvde değişmez ağırlığa gelinceye kadar bekletildi. Daha sonra numuneler 400, 600 ve 800 °C olmak üzere üç farklı yüksek sıcaklığa maruz bırakıldı. Numuneler maksimum ısıtma kapasitesi 1200 °C ve ısıtma hızı 2.5 °C/dak olan Protherm HLF 150 markalı laboratuvar tipi fırında belirtilen sıcaklıklara ulaşana kadar ısıtıldı ve bu sıcaklıklarda 1 saat bekletildi. Daha sonra, numunelerin fırın içerisinde yaklaşık 2 °C/dak soğuma hızı ile oda sıcaklığına kadar soğutuldu.

### 2.4. Sertleşmiş Beton Deneyleri

Kür sürelerini tamamlayan numunelerin her bir serisinden 5'er adet alınarak, porozite ve kılcal su emme deneylerine tabi tutuldu. Numunelerin porozitelerini belirleyebilmek amacıyla (1) no'lu bağıntı kullanıldı.

$$P = \frac{(W_{dyk} - W_{kuru})}{(W_{dyk} - W_{su})} 100 \quad (1)$$

(1) no'lu denklemde yer alan P = Porozite, (%);  $W_{dyk}$  = Numunenin doğun yüzey kuru ağırlığı, (kg);  $W_{kuru}$  = Numunenin etüvde kurutulduktan sonraki ağırlığı, (kg);  $W_{su}$  = Numunenin su altındaki ağırlığını (kg) ifade etmektedir.

Kılcal su emme deneyi için etüv kurusu numunelerin yan yüzeyleri tamamen parafin ile kaplanarak sadece alt yüzeyinden su emmesi sağlandı. Deney süresince beton numunenin tabanından itibaren 5 mm su içerisinde kalması sağlandı. Numuneler belirli zamanlarda (0, 5, 10, 20, 30, 60, 180, 360, 1440 dak.) tartılarak kapiler su emme katsayıları (2) no'lu denklem kullanılarak hesaplandı [27, 28].

$$\frac{Q}{A} = k\sqrt{t} \quad (2)$$

(2) no'lu denklemde yer alan Q = Numunenin absorbe ettiği su miktarı, (cm<sup>3</sup>); A = Suyu temas eden yüzeyin alanı, (cm<sup>2</sup>); k = Kapiler su emme katsayısı (cm.s<sup>-1/2</sup>) ve t = Zaman, (s) parametrelerini ifade etmektedir.

Kür sürelerini tamamlayan numunelerin tahribatsız deney işlemleri bittikten sonra her seriden 5'er numune alınarak basınç dayanımları belirlendi. Bu basınç dayanımı değerleri, yüksek sıcaklık sonrası değişimleri inceleyebilmek amacıyla, kontrol sıcaklığı (20 °C) değerleri olarak kaydedildi. Basınç deneyi, yükleme kapasitesi 3000 kN olan Autotest Beton Dayanım Presinde, TS EN 12390-3 standardına göre [29], 3 kN/sn yükleme hızı uygulanarak gerçekleştirildi. Elde edilen verilerin ortalamaları hesaplandı.

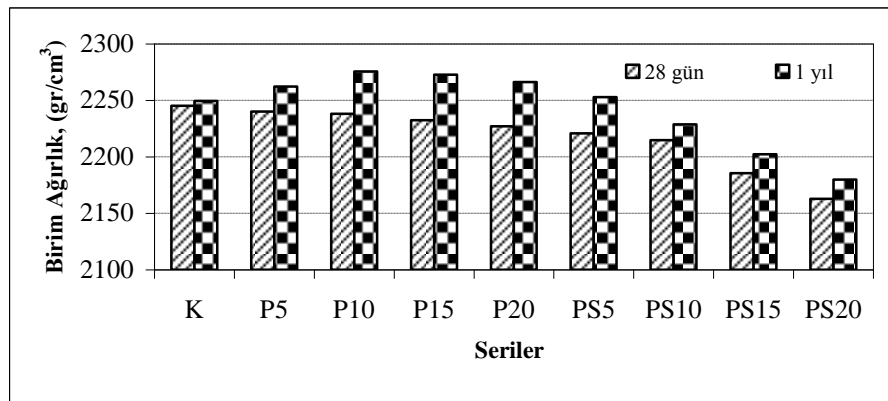
Numuneler 400, 600 ve 800 °C sıcaklıklara maruz bırakıldıktan sonra yüzeylerinde belirgin şekilde çatlaklar meydana geldiği için porozite ve kılcal su emme değerleri sağlıklı olarak belirlenemedi. Bu nedenle, yüksek sıcaklık sonrası sadece birim ağırlık ve basınç dayanımı verileri kaydedildi. Numunelerin yüzeyinde meydana gelen bu çatlaklar Şekil 1'de görülmektedir.



Şekil 1. Yüksek sıcaklık sonrası numune görüntüleri

### 3. BULGULAR VE TARTIŞMA

Sıcaklığa maruz bırakılmadan önceki serilerin birim ağırlık değişimleri üzerine kür yaşının etkisi Şekil 2'de gösterilmiştir. Şekil 2 incelendiğinde, beton içerisindeki öğütülmüş pomza miktarı arttıkça, birim ağırlıkta düşüş meydana geldiği görülmektedir. Bu durum, pomzanın birim ağırlığının çimentonun birim ağırlığından daha düşük olmasından kaynaklanmıştır.



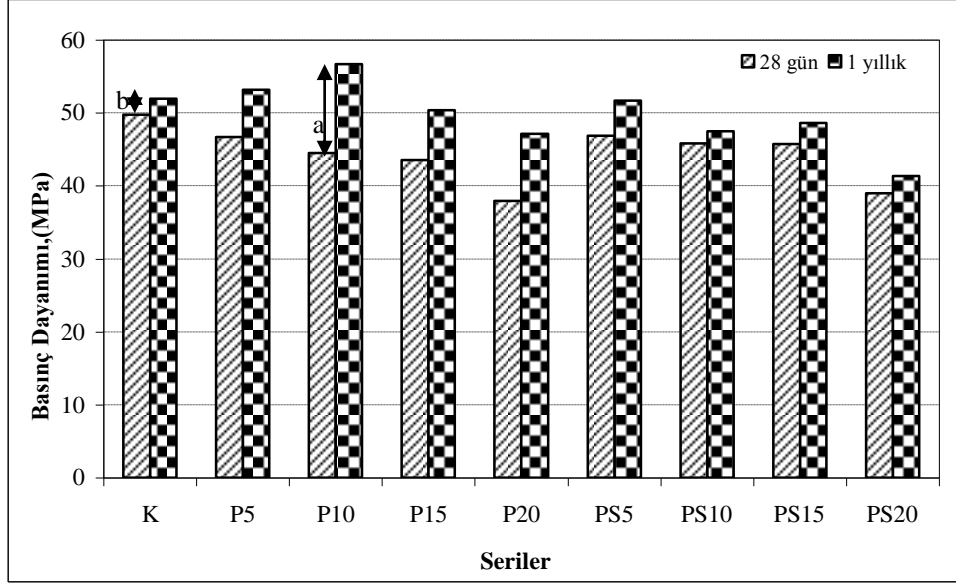
Şekil 2. Kür yaşına bağlı birim ağırlık değişimi

Ayrıca, Şekil 2'den görüldüğü gibi kür süresindeki artışa bağlı olarak tüm serilerin birim ağırlıklarında artış meydana gelmiştir. Çünkü kür yaşı ilerledikçe devam eden hidrasyon süreci içerisinde yeni oluşan C-S-H (Kalsiyum-Silikat-Hidrat) jelleri ve CH ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) gibi hidrasyon ürünleri beton birim ağırlığını arttırmıştır.

Şekil 2'deki 1 yıllık kür süresini tamamlamış seriler incelendiğinde, % 10 öğütülmüş pomza ihtiva eden P10 kodlu seriye kadar birim ağırlıklarda bir artış gözlenirken bu seviyeden sonra birim ağırlıkta bir

düşüş meydana geldiği dikkati çekmektedir. İlk aşamada görülen bu artışın nedeni, pomzanın ileri kür yaşlarında daha fazla puzolanik aktivite gösterip çimentonun hidratasyonu sonucu oluşan CH ile tepkimeye girerek yeni C-S-H jellerini oluşturması şeklinde açıklanabilir. Fakat P10'dan itibaren çimento miktarında meydana gelen %15 ve üzerindeki azalmanın birim ağırlık düşüşüne neden olduğu düşünülmektedir. Çünkü çimento miktarındaki azalmaya bağlı olarak beton içerisinde CH oluşumu azalmış ve böylece puzolanik özelliğe sahip olmasına rağmen pomza daha az C-S-H jeli üretmiştir.

Sıcaklığa maruz bırakılmadan önce kür süresine bağlı olarak serilerin basınç dayanımlarında meydana gelen değişimler Şekil 3'te gösterilmiştir.

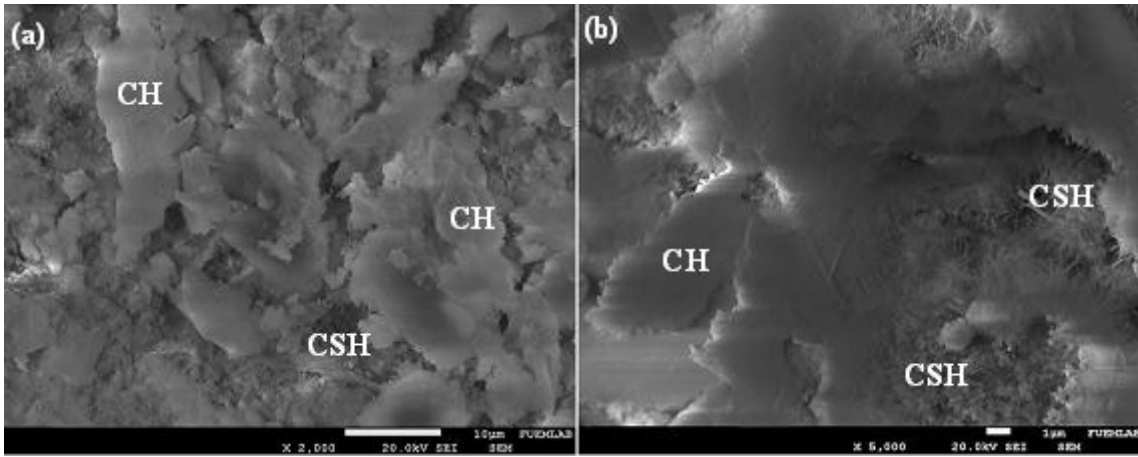


Şekil 3. Basınç dayanımı kür yaşı ilişkisi

Şekil 3'te, tüm serilerin 1 yılın sonundaki basınç dayanımı değerlerinin, 28 günlük basınç dayanımı değerlerinden daha yüksek çıktığı görülmektedir. C-S-H jellerinin üretimi hidratasyon olayı ile birlikte devam ettiği için oluşan C-S-H jelleri neticesinde tüm serilerin basınç dayanımları artmıştır.

Şekil 3'te 28 günlük ve 1 yıllık seriler arasındaki dayanım farkı incelendiğinde, P kodlu serilerde kür yaşına bağlı dayanım artış oranının (a), K kodlu seride meydana gelen artış oranından (b) daha fazla olduğu görülmektedir. Bu durum çalışmamızda puzolan olarak kullanılan pomzanın, 1 yıllık kür süresi sonunda daha fazla puzolanik aktivite gösterip yeni hidratasyon ürünleri oluşturarak basınç dayanımına ilave bir katkı sağlamasından kaynaklanmıştır. Çünkü puzolanlar, betonda çimentonun hidratasyonundan oluşan CH ile tepkimeye girerek yeni CSH jelleri oluştururlar.

Puzolanların tepkime verebilmesi için gerekli kireç, karışımın suyla karıştırıldığı ilk anda ortamda yoktur. Zamanla portland çimentosundaki  $C_3S$  ve  $C_2S$  minerallerinin hidratasyonu ile ortamda CH birikir ve puzolan, puzolanik tepkimelerin sonucunda CSH jelleri vermeye başlar. Dolayısıyla, Portland çimentosu-puzolan karışımı içeren betonlar aynı incelikteki sadece Portland çimentosu içeren betonlara göre daha uzun süreli küre ihtiyaç duyarlar [30]. 1 yılın sonunda, pomza ilavesi ile hidratasyon ürünlerinde meydana gelen bu artış Şekil 4'de yer alan SEM resimlerinden görülmektedir.



Şekil 4. Numunelerin SEM görüntüleri (a) K serisi, (b) P serisi

Yüksek sıcaklığa maruz bırakılmadan önce kür yaşına bağlı olarak değişen porozite, kılcal su emme ve basınç dayanımı verileri Tablo 4’de bir arada verilmiştir.

**Tablo 4.** Serilerin porozite, kılcal su emme ve basınç dayanımı değerleri

Seriler	Porozite, (%)		Kılcal su emme $\times 10^{-3}$ , (cm/s <sup>1/2</sup> )		Basınç Dayanımı, (MPa)	
	28 gün	1 yıl	28 gün	1 yıl	28 gün	1 yıl
<b>K</b>	8.442	5.295	1.142	0.771	49.705	51.93
<b>P5</b>	8.835	5.300	1.184	0.777	46.720	53.14
<b>P10</b>	9.362	5.775	1.195	0.824	44.500	56.69
<b>P15</b>	9.720	5.953	1.339	0.883	43.505	50.36
<b>P20</b>	9.848	5.947	1.356	0.920	37.920	47.14
<b>PS5</b>	5.385	3.772	0.618	0.566	46.870	51.70
<b>PS10</b>	6.038	4.408	0.627	0.591	45.840	47.49
<b>PS15</b>	6.067	4.191	0.695	0.624	45.750	48.60
<b>PS20</b>	6.649	4.477	0.761	0.631	38.935	41.36

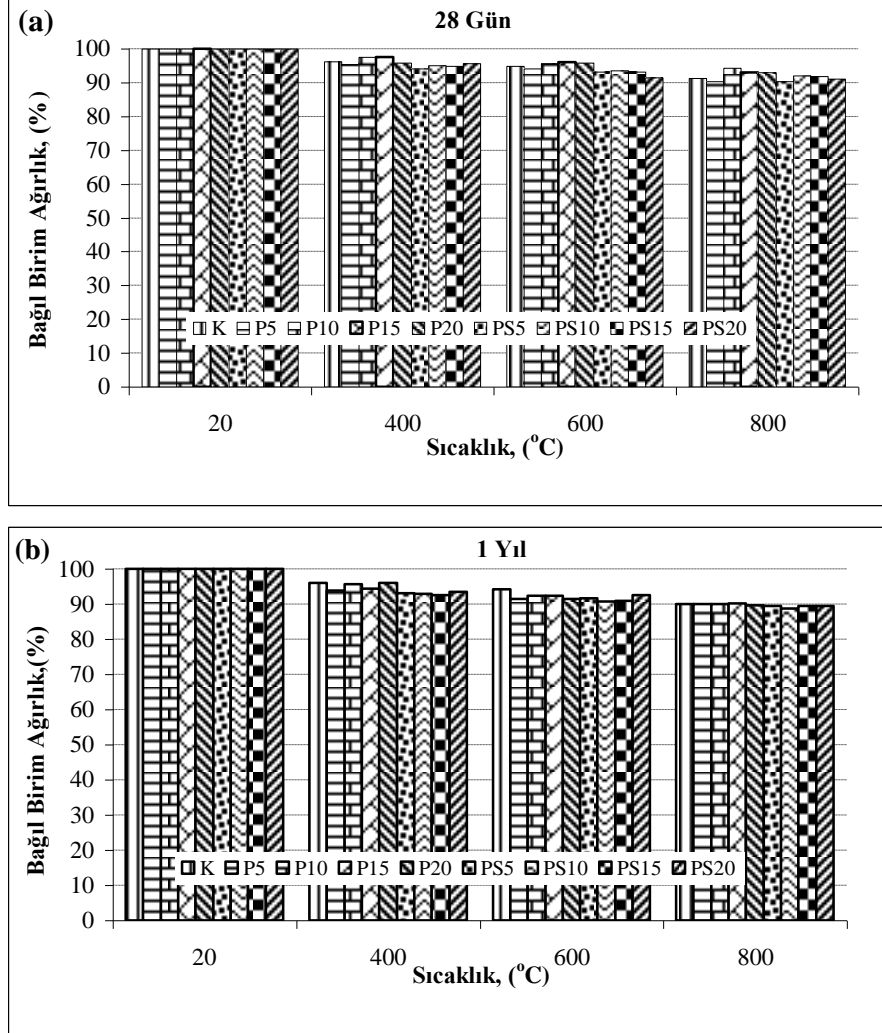
Tablo 4 incelendiğinde, her iki kür süresinde de serilerdeki öğütülmüş pomza yüzdesindeki artışa bağlı olarak porozite ve kılcal su emme değerlerinin arttığı gözlenmiştir. Bu durum, pomzanın tane boyutunun çimentoya göre daha büyük olması nedeniyle beton içerisindeki boşluk miktarını arttırmasından kaynaklanmıştır.

Ancak yine her iki kür süresinde P kodlu serilere silis dumanı ilavesiyle elde edilen PS kodlu serilerin porozite ve kılcal su emme değerlerinin P kodlu serilerden daha düşük çıktığı Tablo 4’den görülmektedir.

Mineral katkıların, betonun dayanıklılığını arttıran fonksiyonlarının en önemlisi beton boşluk yapısını iyileştirmesi ve dolayısı ile geçirimsizliği azaltmasıdır [31, 32]. Silis dumanının çimento ve pomzaya göre çok ince taneli olması nedeni ile çalışmada kullanılan silis dumanı çimento hamuru-agrega ara yüzeyi ve çimento hamuru içindeki boşlukları doldurarak kılcal boşlukların azalmasını sağlamış, bu da porozite ve kılcal su emme değerlerinin düşmesine dolayısıyla basınç dayanımı değerlerinin artmasına neden olmuştur. Çalışma neticesinde elde edilen bu sonuçları destekleyen çalışmalar literatürde mevcuttur [24, 27, 28].

Yüksek sıcaklık sonrası, numunelerin birim ağırlıklarında meydana gelen değişimler 28 günlük ve 1 yıllık kür süreleri için Şekil 5'te gösterilmiştir.

Şekil 5'te sıcaklık artışı ile ağırlık kaybının arttığı net bir şekilde görülmektedir. Bu durum beton bünyesindeki bağlı suyun buharlaşmasının bir sonucudur.



Şekil 5. Sıcaklığa bağlı birim ağırlık değişimi, (a) 28 gün, (b) 1 yıl

Alarcon-Ruiz vd., yaptıkları bir çalışmada betonda ilk ağırlık kaybının C-S-H, karboalüminatlar ve etrenjit gibi birçok hidratin 100-200 °C arasında dehidrasyonu ile oluştuğunu belirtmişlerdir. İkinci ağırlık kaybının 450-550 °C arasında portlanditin(CH) dehidroksilasyonu, üçüncü ağırlık kaybının ise 750-850 °C arasında klinker ve filler malzemeden gelen kalsiyum karbonatın dekarbonasyonu ile oluştuğunu ifade etmişlerdir [33]. Schrefler de [34],  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 'in  $\text{CaO}$  ve  $\text{H}_2\text{O}$ 'ya dönüşümünün 500 °C civarında, C-S-H'in dehidratasyonunun ise 110°C'den itibaren başladığını ve her iki olayın da çimento pastasındaki katı madde miktarını azalttığını belirtmiştir.

Tüm sıcaklık derecelerinde 1 yıllık ağırlık kayıplarının 28 günlük ağırlık kayıplarından daha fazla olduğu Şekil 5 (a) ve (b) karşılaştırıldığında görülmektedir. Kür yaşı ilerledikçe devam eden hidrasyon süreci, yeni oluşan C-S-H jelleri ve CH miktarını arttırmıştır. Doğal olarak artan sıcaklık ile bozulan hidrasyon ürünü miktarı da artmış, bu da artan ağırlık kaybı ile kendini göstermiştir.



Ayrıca Şekil 5 incelendiğinde silis dumanı katkılı serilerdeki ağırlık kayıplarının daha fazla olduğu dikkati çekmektedir. Bu durum silis dumanlı serilerin daha fazla miktarda C-S-H içermesinden kaynaklanmıştır. Çünkü böylelikle artan sıcaklık ile daha fazla C-S-H dehidrate olmuştur. Bu konuyla ilgili yapılan bir araştırmada Saad vd. [35], yaptıkları çalışma ile farklı oranlarda SD ihtiva eden betonların sıcaklık artışına bağlı olarak ağırlık kayıplarının arttığını göstererek, bu durumu oluşturan çimento hidratlarının dekompozisyonuna bağlamışlardır. Betonun yüksek sıcaklığa olan direncini belirleyebilmek için yapılan araştırmalar, her ne kadar betonun yük durumuna, nem içeriğine vs. bağlı olarak farklı sonuçlar verse de genel olarak elde edilen bulgular, betonun yüksek sıcaklıkla birlikte basınç dayanımında önemli düşüşler olduğu şeklindedir.

Farklı sıcaklıklara maruz bırakılan numunelerin basınç dayanımları üzerine kür süresinin etkisi Tablo 5'te verilmiştir. Tablo 5 incelendiğinde, hem 1 yıl hem de 28 gün kür edilmiş serilerde 400 °C'de tüm pomza katkılı serilerin basınç dayanımlarının, 20 °C'ye göre bir miktar arttığı görülmektedir. Hertz [36] tarafından gerçekleştirilmiş bir çalışmada, mineral katkılı serilerin dayanımlarında 350 °C sıcaklığa kadar bir dayanım artışı gözlenmiştir. Yine Aydın ve Baradan pomza agregalı ve uçucu kül katkılı betonların 600°C'ye kadar bir dayanım kaybı sergilemediklerini vurgulamışlardır [18]. Bu durum kısmen artan sıcaklıkla birlikte serbest suyun buharlaşması sonucu birbirine daha yakın hareket eden çimento jel tabakaları arasındaki Van der Waal's kuvvetlerinin artması ile çimento pastasının dayanım kazanmasından kaynaklanmıştır [1].

**Tablo 5.** Kür süresine ve değişen sıcaklığa bağlı olarak serilerin basınç dayanımları, (MPa)

Seriler	20 °C		400 °C		600 °C		800 °C	
	28 gün	1 yıl	28 gün	1 yıl	28 gün	1 yıl	28 gün	1 yıl
<b>K</b>	49.70	51.93	48.83	53.58	37.82	35.63	14.90	15.84
<b>P5</b>	46.72	53.14	48.04	59.33	41.25	31	15.79	13.32
<b>P10</b>	44.5	56.69	52.12	57.04	42.14	35.1	18.79	14.33
<b>P15</b>	43.50	50.36	46.91	51.54	41.44	30.35	19.25	11.29
<b>P20</b>	37.92	47.13	42.75	49.08	35.73	30.84	13.93	12.94
<b>PS5</b>	46.72	51.7	56.42	51.76	34.49	27.55	10.79	9.69
<b>PS10</b>	45.83	47.49	47.95	51.73	36.91	30.25	11.27	10.34
<b>PS15</b>	45.75	48.6	47.05	49.36	36.68	23.82	10.15	8.96
<b>PS20</b>	38.93	41.35	40.22	42.63	29.02	25.33	8.94	8.62

600 °C sıcaklıkta özellikle 28 günlük küre tabii tutulan pomza katkılı seriler kontrol serisine kıyasla sıcaklıktan daha az etkilenmişlerdir.  $\text{Ca(OH)}_2$ 'nin bozunması genellikle 350 °C' nin altında oluşmaz. Beton bu sıcaklık derecesinden daha yüksek sıcaklıklara maruz kaldığı zaman, kalsiyum hidroksitin kireç ve su buharına dönüşmesi, dayanım kaybı açısından kritik bir durum değildir. Ancak bu durum, bağlı suyun buhar olarak iç gerilmeler oluşturması ve soğutulma sırasında kirecin genleşme yapması ile zararlı bir hal almaktadır. Kalsiyum hidroksitin bu zararlı etkisi bazı mineral katkıları kullanılarak bertaraf edilebilir.

Şöyle ki; mineral katkılarda bulunan reaktif silis ( $\text{SiO}_2$ ) ile çimentodaki  $\text{Ca(OH)}_2$  arasında meydana gelen puzolanik reaksiyondan dolayı sistemde  $\text{Ca(OH)}_2$  miktarı azalır [18]. Dolayısıyla, çalışmamızda pomza içeren serilerde yüksek sıcaklıklarda daha az  $\text{Ca(OH)}_2$  dehidrate olduğundan bu seriler kontrol serisine göre artan sıcaklıktan daha az etkilenmişlerdir.

Tablo 5'te, 800 °C sıcaklığa maruz kalan serilerde diğer sıcaklıklara oranla basınç dayanımlarında büyük bir düşüş görülmektedir. Bu sıcaklık derecesinden sonra kristal suyu kaybının yol açtığı  $\text{Ca(OH)}_2$

miktarının azalması, betonun morfolojisinin değişimi ve mikro çatlak oluşumu her iki kür süresinde de basınç dayanımların aşırı şekilde düşmesine neden olmuştur. Bu durum, sıcaklık artışı ile birlikte kür yaşının basınç dayanımı üzerine etkisinin azaldığını açıkça göstermektedir.

#### 4. SONUÇLAR

Pomza ve silis dumanı katkılı betonların yüksek sıcaklık sonrası mekanik ve fiziksel dayanımları üzerine kür yaşının etkisini belirleyebilmek amacıyla tertiplenen bu çalışma sonucunda aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır.

- Pomzanın birim ağırlığının çimentodan daha düşük olması nedeniyle beton numunelerin pomza yüzdeleri arttıkça, birim ağırlıklarında düşme meydana gelmiştir.
- Serilerin birim ağırlık artışları, kür süresinin artışıyla doğru orantılı bir seyir izlemiştir. Çünkü ilerleyen kür süresi ile birlikte devam eden hidrasyon süreci içerisinde yeni oluşan hidrasyon ürünleri betonun birim ağırlığını arttırmıştır.
- İlerleyen kür süresi ile birlikte puzolanik reaksiyon sonucu oluşan ilave C-S-H jelleri %5 ve %10 pomza katkılı serilerin birim ağırlığını arttırmıştır. Ancak, daha fazla pomza ihtiva eden serilerde ise karışımlardaki çimento miktarının azalmasından dolayı birim ağırlıklarda düşüş gözlenmiştir. Aynı şekilde iki mineral katkının bir arada kullanımı da çimento miktarının daha fazla azalmasına neden olduğundan silis katkılı serilerin birim ağırlıkları daha fazla düşmüştür.
- Kür süresi ilerledikçe devam eden hidrasyon sürecinde oluşan C-S-H jellerinin bir sonucu olarak, tüm serilerin basınç dayanımı artmıştır. Portland çimentosu-puzolan karışımı içeren betonlar aynı incelikteki sadece Portland çimentosu içeren betonlara göre daha uzun süreli küre ihtiyaç duydukları için, pomza katkılı serilerde kür yaşına bağlı basınç dayanımı artış oranı, kontrol serilerin basınç dayanımı artış oranından daha fazladır.
- Yüksek sıcaklık öncesi gerçekleştirilen porozite ve kılcal su emme deneyleri sonucunda, kür yaşından bağımsız olarak, öğütölmüş pomza yüzdesi arttıkça, porozite ve kılcal su emme değerlerinin arttığı belirlenmiştir. Fakat silis dumanı ilavesi, porozite ve kılcal su emme değerlerinin düşmesini sağlamıştır. Bunun nedeni, çimento ve pomzaya göre çok daha ince taneli olan silis dumanının, çimento hamuru-agrega arayüzü ve çimento hamuru içindeki boşlukları doldurarak kılcal boşlukların azalmasını sağlamış olmasıdır.
- Yüksek sıcaklık sonrası, beton bünyesindeki suyun buharlaşması ve bünyenin deforme olması sonucunda birim ağırlıklarda azalma meydana gelmiştir. Tüm sıcaklık derecelerinde 1 yıllık ağırlık kayıplarının 28 günlük ağırlık kayıplarından daha fazla olduğu, ayrıca silis dumanı katkılı serilerde yüksek sıcaklık sonrası ağırlık kayıplarının daha fazla olduğu belirlenmiştir. Bu durum silis dumanlı serilerin dehidrate olacak ve birim ağırlığı azaltacak daha fazla miktarda C-S-H içermesinden kaynaklanmıştır.
- 400 °C'ye maruz kalmış pomza katkılı serilerin basınç dayanımları artmıştır. Ancak, bu sıcaklıktan sonra tüm serilerin basınç dayanımlarında beton morfolojisinin bozulmasından dolayı önemli miktarda düşüşler meydana gelmiştir.
- Yapılan çalışma neticesinde pomza ve silis dumanını bir arada ihtiva eden beton numunelerin ilerleyen kür yaşlarında daha fazla C-S-H jeli içermeleri nedeniyle yüksek sıcaklıktan daha fazla etkilendikleri belirlenmiştir.

## TEŞEKKÜR

Bu çalışmaya 1586 nolu münferit proje kapsamında maddi destek sağlayan FÜBAP (Fırat Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri) birimine teşekkür ederiz.

## 5. KAYNAKLAR

1. Hossain, K.M.A., “Macro- and Microstructural Investigations on Strength and Durability of Pumice Concrete at High Temperature” *Journal of Materials in Civil Engineering ASCE*, 18 (4), 527-536, 2006.
2. Phan, L.T., “Fire Performance of High Strength Concrete: A report of the State-of-the-Art”, Building and Fire Research Laboratory, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, Md.,1996.
3. Sancak, E., Şimşek, O., “Yüksek Sıcaklığın Silis Dumanı ve Süperakışkanlaştırıcı Katkılı Hafif Betona Etkileri”, *Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Dergisi*, Cilt 21, No 3, 443-450, 2006.
4. Cruz, C.R., Gilen, M., “Thermal Expansion of Portland Cement Paste, Mortar and Concrete at High Temperatures”, *Fire and Materials*, 4 (2), 66-70, 1980.
5. Bazant, Z.P., Kaplan, M.F., “Concrete at High Temperatures: Material Properties and Mathematical Models”, Longman, London, 1996.
6. Khoury, G.A., “Compressive Strength of Concrete at High Temperatures: A Reassessment”, *Magazine of Concrete Research*, 44 (161), 291-309, 1992.
7. Chan, S.Y.N., Luo, X., Sun, W., “Effect of High Temperature and Cooling Regimes on the Compressive Strength and Pore Properties of High Performance Concrete”, *Construction and Building Materials*, 14, 261–266, 2000.
8. Xiao, J., Falkner, H., “On Residual Strength of High-Performance Concrete With and Without Polypropylene Fibres at Elevated Temperatures”, *Fire Safety Journal*, 41, 115–121, 2006.
9. Aydın, S., Yazıcı, H., Baradan, B., “High Temperature Resistance of Normal Strength and Autoclaved High Strength Mortars Incorporated Polypropylene and Steel Fibers”, *Construction and Building Materials*, 22 (4), 504–512, 2008.
10. Zoldners, N.G., Wilson, H.S., “Effect of Sustained and Cyclic Temperature Exposures on Lightweight Concrete”, *ACI Pub.*, Cilt 39 (9), 149–178, 1973.
11. Chan, Y.N., Luo, X., Sun, W., “The Compressive Strength and Pore Structure of High-Performance Concrete After Exposure to High Temperature up to 800 °C”, *Cement and Concrete Research*, 30, 247–251, 2000.
12. Lau, A., Anson, M., “Effect of High Temperatures on High Performance Steel Fibre Reinforced Concrete”, *Cement and Concrete Research*, 36, 1698–1707, 2006.
13. Demirel, B., Gönen, T., “Yüksek Sıcaklığın Karbon Lif Takviyeli Hafif Betonda Basınç Dayanımı ve Poroziteye Etkisi”, *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 14 (2), 223–228, 2008.

14. Sancak, E., Sari, Y.D., Simsek, O., “Effects of Elevated Temperature on Compressive Strength and Weight Loss of the Light-Weight Concrete With Silica Fume and Superplasticizer”, *Cement and Concrete Composites*, 30, 715-721, 2008.
15. Bingöl, A. F., Gül, R., “Compressive Strength of Lightweight Aggregate Concrete Exposed to High Temperatures”, *Indian J. Eng. and Mater. Sci.*, 11, 68–72, 2004.
16. Chen, B., Li, C., Chen, L., “Experimental Study of Mechanical Properties of Normal-Strength Concrete Exposed to High Temperatures at an Early Age”, *Fire Safety Journal*, Cilt 44, 997-1002, 2009.
17. Poon, C., Azhal, S., Anson, M., Wong, Y., “Comparison of the Strength and Durability Performance of Normal-and High-Strength Pozzolanic Concretes at Elevated Temperatures”, *Cement and Concrete Research*, 31, 1291-1300, 2001.
18. Aydın, S., Baradan, B., “Effect of Pumice and Fly Ash Incorporation on High Temperature Resistance of Cement Based Mortars”, *Cement and Concrete Research*, 37(6), 988–995, 2007.
19. Poon, C., Azhal, S., Anson, M., Wong, Y., “Performance of Metakaolin Concrete at Elevated Temperatures”, *Cement and Concrete Composites*, 25, 83-89, 2003.
20. Gutierrez, R.M., Diaz, I.N., Delvasto, S., “Effect of Pozzolans on the Performance of Fiber-Reinforced Mortars”, *Cement and Concrete Composites*, 27, 593-598, 2005.
21. Piasta, J., “Heat Deformations of Cement Pastes Phases and the Microstructures of Cement Paste”, *Materials Structures*, 17 (102), 415–420, 1984.
22. Demirel, B., Yazıcıoğlu, S., “Thermoelectric Behavior of Carbon Fiber Reinforced Lightweight Concrete With Mineral Admixtures”, *New Carbon Materials*, 23 (1), 21-24, 2008.
23. Keleştemur, O., Yıldız, S., “Normal ve Silis Dumanı Katılarak Üretilen Betonlarda Donatı Korozyonuna Sodyum Klorür Etkisi ”, *Fırat Üniversitesi Fen ve Mühendislik bilimleri Dergisi*, 17(2), 277-286, 2005.
24. Keleştemur, O., Demirel, B., “Corrosion Behavior of Reinforcing Steel Embedded in Concrete Produced with Finely Ground Pumice and Silica Fume”, *Construction and Building Materials*, 24, 1898-1905, 2010.
25. TS EN 197-1, “Çimento- Bölüm 1: Genel Çimentolar- Bileşim, Özellikler ve Uygunluk Kriterleri”, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara, 25s, 2002.
26. TS 802, “Beton Karışım Hesap Esasları”, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara, 1985.
27. Gonen, T., Yazıcıoğlu, S., “The Influence of Compaction Pores on Sorptivity And Carbonation of Concrete”, *Construction and Building Materials*, 21, 1040-1045, 2007.
28. Tasdemir, C., “Combined Effects of Mineral Admixtures and Curing Condition on the Sorptivity Coefficient of Concrete”, *Cement and Concrete Research*, 33, 1637-1642, 2003.

29. TS EN 12390-3, Beton-Sertleşmiş Beton Deneşleri-Bölüm 3: Deney Numunelerinde Basınç Dayanımının Tayini, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 12s., 2003.
30. Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği Traslara ve Traslı Çimentolar (Araştırmaların Gözden Geçirilmesi ve Durum Değerlendirmesi Raporu), TÇMB/AR-GE/ Y99-2, Ankara, Nisan 2007.
31. Uyan M., Özcan M. ve Yıldırım H., “Tunçbilek ve Seyitömer Uçucu Küllerinin Betonun Kılcallık ve Su Emme Özelliklerine Etkisi”, D.S.İ. Beton-Çimento ve Boya Semineri, Ankara, 1998.
32. Mahsanlar, N., Yüksek Sıcaklık Etkisinde Beton Davranışı, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü , 2008.
33. Alarcon-Ruiz L., Platret G., Massieu E. ve Ehrbacher A., “The Use of Thermal Analysis in Assessing The Effect of Temperature on a Cement Paste”, Cement and Concrete Research, 35, 609-613, 2005.
34. Schrefler B.A., Gawin D., Khoury G.A. ve Majorana C.E., “Physical, Mathematical & Numerical Modelling”, International Centre for Mechanical Sciences, Course on Effect of Heat on Concrete, Udine/Italy, 2003.
35. Saad M., Abo-El-Enein S. A., Hanna G. B., Kotkata M. F., “Effect of Temperature on Physical and Mechanical Properties of Concrete Containing Silica Fume ”, Cement and Concrete Research, 26 (5), 669-675, 1996.
36. Hertz, K.D., “Danish investigations on silica fume concretes at elevated temperatures”, ACI Mater. Journals, 89 (4), 345– 347, 1992.