



DOĞAL POMZA KULLANILARAK ÜRETİLEN BETONUN YÜKSEK SICAKLIK ALTINDAKİ DAVRANIŞI BEHAVIOR OF THE CONCRETE PRODUCED BY USING NATURAL PUMICE AT THE ELEVATED TEMPERATURES

Bahar DEMİREL^a, Oğuzhan KELEŞTEMUR^b

^a Fırat Üniversitesi, Teknik Eğitim Fakültesi, Yapı Eğitimi Bölümü, Elazığ, Türkiye, bdemirel@firat.edu.tr

^b Fırat Üniversitesi, Teknik Eğitim Fakültesi, Yapı Eğitimi Bölümü, Elazığ, Türkiye, okelestemur@firat.edu.tr

Özet

Bu çalışmada, çimento ile ağırlıkça %5, %10, %15 ve %20 oranlarında yer değiştirecek şekilde öğütülmüş doğal pomza ile üretilen sürdürülebilir betonların mekanik özellikleri üzerine yüksek sıcaklığın etkisi incelenmiştir. 28 günlük kürünü tamamlayan numuneler laboratuvar tipi fırında, 1 saat süre ile 400, 600 ve 800 °C sıcaklığa maruz bırakılmıştır. Daha sonra numuneler fırın içerisinde soğutulmuştur. Soğuyan numunelerin ağırlık kayıpları, ultrases geçiş hızları ve basınç dayanımı kayıpları tespit edilerek, 20±2 °C laboratuvar ortamında bekleyen kontrol numunelerinin sonuçları ile kıyaslanmıştır. Yapılan çalışma sonucunda, sıcaklığa maruz kalmayan numunelerde pomza katkısının çimento miktarındaki azalmadan dolayı basınç dayanımını azaltıcı etki yaptığı tespit edilmiştir. Aynı zamanda pomza ilavesi, betonların birim ağırlıklarını da düşürmüştür. Tatbik edilen sıcaklık arttıkça, özellikle 400 °C'den sonra, öğütülmüş pomza katkılı betonların basınç dayanımlarının, kontrol betonundan daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Betonda çimento ile yer değiştirecek şekilde doğal pomza kullanımı hem ekonomiklik hem de yüksek sıcaklığa dayanım bakımından olumlu kazanımlar sağlamıştır.

Anahtar kelimeler: Sürdürülebilir beton, Öğütülmüş pomza, Yüksek sıcaklık, Hidratasyon ürünleri, Mekanik özellikler.

Abstract

In this study, the effect of the elevated temperature on the mechanical properties of sustainable concretes obtained by substituting cement with ground natural pumice at proportions of 5%, 10%, 15% and 20% by weight has been investigated. The specimens completed the 28 days curing period were exposed to 400, 600 and 800 °C for 1 hour. After the specimens were cooled in the furnace, ultrasonic pulse velocity (UPV), compressive strength and the weight loss values were determined. These data were compared with the results of the control specimens which were stored at 20 ±2 °C in the laboratory. At the end of this study, it was observed that adding the mineral admixtures to unheated concrete specimens, both unit weight and compressive strength decreased. The compressive strength of the concrete with pumice is higher than the without pumice (control specimens) especially above 400 °C. The use of natural pumice in concrete by replacing with cement provides positive gains in terms of both economical and strength to the elevated temperature.

Keywords: Sustainable concrete, Ground pumice, Elevated temperature, Hydration products, Mechanical properties.

1. Giriş

Beton, yangın sırasında veya fırın ve reaktör gibi yapılarda kullanıldığında yüksek sıcaklığa maruz kalmaktadır. Bu da betonun dayanım, elastisite modülü ve deformasyon gibi mekanik özelliklerinin olumsuz yönde etkilenmesine ve sonuç olarak yapısal bozulmasına neden olur. Yine sıcaklık artışı, beton yapının durabilitesini etkileyen en önemli fiziksel bozunma sürecidir [1]. Bunlar betonarme bir yapıda istenmeyen unsurlardır. Fakat yüksek sıcaklığın bu zararlı etkilerini azaltmak, doğru malzeme seçimi ile mümkün olmaktadır. Beton sıcaklığa maruz kaldığında, kimyasal içeriği ve fiziksel yapısında bazı değişiklikler olur. Sıcaklığın yaklaşık 100 °C'yi aştığı durumlarda betonda, Kalsiyum silika hidratlardan bağ suyunun ayrılması olarak ifade edilen dehidratasyon olayı başlar. Ayrıca agreganın termal genişlemesi ve Kalsiyum silika hidratların dehidratasyonu beton içerisinde içsel gerilmeleri artırır ve 300 °C den sonra beton içerisinde çatlaklar oluşmaya başlar. 530 °C den sonra ise betondaki aşırı kurumanın bir sonucu olarak çimento hamurundaki ana bileşen olan Ca(OH)₂ bozunmaya başlar. [2, 4]. Literatürde, farklı beton türleri üzerine yüksek sıcaklığın etkilerini inceleyen birçok çalışma mevcuttur. Örneğin çelik ve karbon fiber takviyeli betonlarda yüksek sıcaklığın etkileri [5,6], yüksek dayanımlı betonların yüksek sıcaklığa tepkisi [7,8], normal ve hafif agrega ile üretilmiş betonların yüksek sıcaklık sonrası davranışlarının kıyaslanması [9,10] gibi çalışmalar yapılmıştır. Ayrıca, yüksek sıcaklığa maruz kalmış harçlarda basınç dayanımı-renk değişimi ilişkisi [11] bu konuda yapılmış başka bir çalışmadır.

Genelde konu ile ilgili olarak literatürde bulunan çalışmalarda çimento ikamesi olarak silis dumanı, uçucu kül, metakaolin ve yüksek fırın cürufu gibi mineral katkıları kullanılmıştır [12-14].

Yapmış olduğumuz bu çalışmanın amacı, çimento katkısı olarak Elazığ yöresinden temin edilen doğal pomzayı öğütüp beton üretiminde kullanarak, bölgemizde bol miktarda rezervi bulunan bu hammaddenin değerlendirilmesini sağlamaktır. Bu sayede üretimi için hiçbir enerji tüketimi gerektirmeyen pomzanın ekolojik dengeye zarar vermeden betonda kullanımı ile ekonomiklik ve sürdürülebilirlik anlamında kazanımların da elde edilmesi hedeflenmiştir. Bu amaçla, agregası olarak elde edilen pomza, çimento inceliğinde öğütülerek belli oranlarda çimento ile yer değiştirilmiştir. Elde edilen betonların yüksek sıcaklık sonrası iç yapılarında ve mekanik dayanımlarında meydana gelen değişimler incelenmiştir.

2. Malzeme ve Metot

2.1. Malzeme

Yapılan deneysel çalışmada, ÇİMENTAŞ Elazığ çimento fabrikasından temin edilen CEM I 42.5 portland çimentosu kullanıldı. Elazığ Meryem dağı eteklerinden elde edilen pomza, çok ince bir şekilde öğütüldükten sonra 0.075 mm elekten elenerek ağırlıkça %5, %10, %15 ve %20 oranlarında çimento ile yer değiştirilerek betonda kullanıldı. Portland çimentosu ve öğütülmüş pomzanın kimyasal ve fiziksel özellikleri Çizelge 1'de verilmiştir.

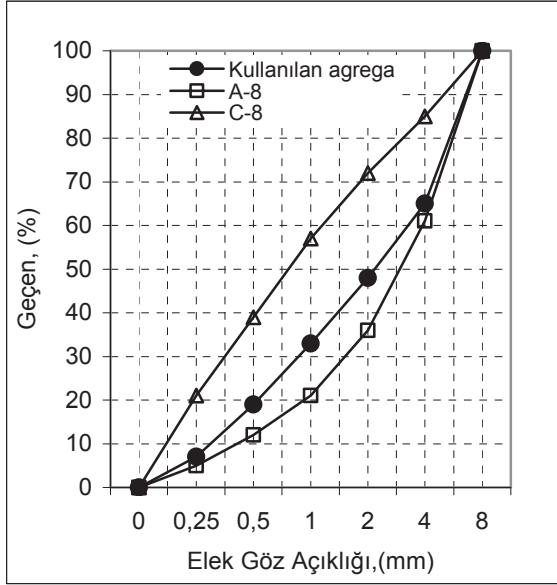
Çizelge 1. Çimento ve pomzanın kimyasal ve fiziksel özellikleri.

(Kütlece%)	CEM I 42.5	Pomza
SiO ₂	21.12	49.52
Al ₂ O ₃	5.62	16.72
Fe ₂ O ₃	3.24	11.26
CaO	62.94	8.26
MgO	2.73	4.54
SO ₃	2.30	-
Na ₂ O	-	-
K ₂ O	-	-
C	-	-
S	-	-
Kızdırma Kaybı	1.78	1.68
Öz.Ağ.(gr/cm ³)	3.10	2.8

Agregaların granülometrisi TS 802'de en büyük tane çapı 8 mm için belirtilen A-8 ve C-8 standart eğrileri arasında kalacak şekilde düzenlenmiş ve toplam agregası hacminin % 65'i kum (0-4mm), % 35'i ise çakıl (4-8mm) olarak kullanılmıştır. Kullanılan iri ve ince agregaların yoğunluğu 2.5 gr/cm³ tür. Agregaya ait granülometri eğrisi Şekil 1'de gösterilmiştir. Karışımlar hazırlanırken şehir şebeke suyu kullanılmıştır.

2.2. Metot

Bu çalışma için biri kontrol (K) olmak üzere, çimento yerine ağırlıkça % 5, %10, %15 ve %20 pomza içeren toplam 5 beton serisi hazırlandı. Bu numuneleri 400, 600 ve 800 °C yüksek sıcaklıklara maruz bırakabilmek amacıyla, her seriden 5 adet numune olmak üzere toplam 100 adet beton numunesi hazırlandı. Çizelge 2'ye göre hazırlanan karışımlar, 100x100x100 mm lik küp kalıplara döküldü. 24 saat sonra kalıptan çıkarılan numuneler 28 günlük kür yaşlarını tamamlamaları için kirece doymun su ile dolu kür tankına yerleştirildi. Serilerin dozajı 400 kg/m³ olarak alındı.



Şekil 1. Kullanılan Agreganın Granülometri Eğrisi

Çizelge 2. 1m³ beton için yaklaşık karışım miktarları, (kg)

	K	P5	P10	P15	P20
Su	200	200	200	200	200
Çimento	400	380	360	340	320
Pomza	-	20	40	60	80
Kum (0-4 mm)	1043	1043	1043	1043	1043
Çakıl(4-8 mm)	560	560	560	560	560

2.3. Sertleşmiş Beton Deneyleri

28 günlük kürünü tamamlayan her bir seriden 5 adet numune alınarak sırasıyla porozite, ultrases geçiş hızı ve sorptivite deneylerine tabi tutuldu. Porozitenin tespiti için (1) numaralı denklem kullanıldı.

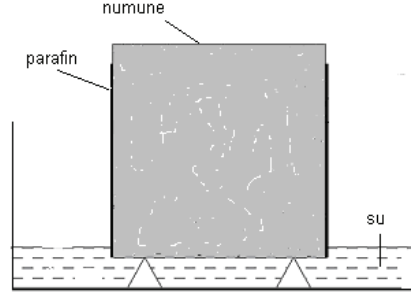
$$P = \frac{(W_{dyk} - W_{kuru})}{(W_{dyk} - W_{su})} \cdot 100 \quad (1)$$

(1) numaralı denklemdeki: P= Porozite (%), W_{dyk} = Numunenin doymuş yüzey kuru ağırlığı, (kg), W_{kuru} = Numunenin etüvde kurutulduktan sonraki ağırlığı, (kg)/ W_{su} = Numunenin su altındaki ağırlığı, (kg) ifade etmektedir. Etüvde kurutulan numunelerin ultrases geçiş hızlarının tespiti için, sesüstü dalgaların betonun içerisinden geçme süresini ölçmek üzere tertiplenen pundit cihazı kullanıldı.

Bu cihaz ile dalga gönderici ve alıcı başlıklar arasında kalan, yüzeyleri temiz numunelerden sesüstü dalgaların ne kadar zamanda geçtiği otomatik olarak belirlendi ve (2) numaralı formül ile dalga hızı hesaplandı.

$$V = (S / t) \cdot 10^6 \quad (2)$$

(2) numaralı formülde yer alan: V = Sesüstü dalga hızı, (metre/saniye), S = Beton bloğun sesüstü dalga gönderilen yüzeyi ile dalğanın alındığı yüzeyi arasındaki mesafe, (metre), t = Sesüstü dalğanın gönderilmiş olduğu beton yüzeyinden alındığı yüzeye kadar geçen zaman, (mikrosaniye) dir. Sorptivite deneyi için kuru numunelerin yan yüzeyleri parafin ile kaplanarak sadece alt yüzeyinden su emmesi sağlandı. Numunelerin suya yerleştirilme şekilleri Şekil 2'de gösterilmiştir.



Şekil 2. Kapiler su emme deney düzeneği

Beton numunenin tabanından itibaren suyun yüksekliği deney süresince 5 mm olarak sabit tutulmuştur. Numuneler belirli zamanlarda (0, 5, 10, 20, 30, 60, 180, 360, 1440 dk.) tartılarak kapiler su emme katsayıları (3) numaralı denklem kullanılarak hesaplanmıştır [15,16].

$$\frac{Q}{A} = k \sqrt{t} \quad (3)$$

(3) numaralı denklemde, Q= numunenin absorbe ettiği su miktarı (cm³), A= suya temas eden yüzeyin alanı (cm²), k= kapiler su emme katsayısı (cm/s^{1/2}) ve t= zaman (s) parametrelerini belirtmektedir.

Tahribatsız deney işlemleri bittikten sonra her seriden 5 numune alınarak serilerin 28 günlük basınç dayanımları tespit edildi. Kaydedilen bu basınç dayanımı değerleri, yüksek sıcaklık etkisi incelemeleri için (20 °C) kontrol sıcaklığı değerleri olarak alındı.

Daha sonra her seriden her sıcaklık değeri için 5'er numune alınarak 50 °C lik etüvde sabit ağırlığa gelinceye kadar bekletildikten sonra, sırasıyla 400, 600 ve 800 °C sıcaklıklara 1 saat süre ile maruz bırakıldı. Yüksek sıcaklık deneyi için Fırat Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Yapı laboratuvarında bulunan ısınma hızı 6°C/dk olan 1200 °C kapasiteli Protherm HLF 150 laboratuvar tipi fırın kullanılmıştır. Fırın içerisinde yaklaşık 2 °C/dk ılık soğuma hızı ile oda sıcaklığına kadar soğutulan numunelerin basınç dayanımları tespit edilerek 20 °C sıcaklıkta elde edilen değerlerle kıyaslandı.

3. Bulgular ve Tartışma

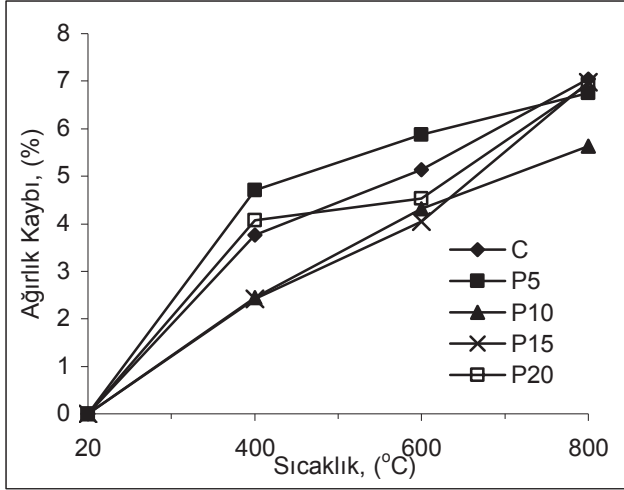
28 günlük kür süresini tamamlayan numuneler üzerinde yapılan deneylerin sonuçları toplu olarak Çizelge 3'de verilmiştir.

Çizelge 3'ten görüldüğü gibi, beton içerisinde öğütülmüş pomza miktarı arttıkça, birim ağırlıkta düşüş meydana gelmiştir. Pomzanın birim ağırlığı çimentonun birim ağırlığından daha düşük olduğu için bu sonuç beklenen bir sonuçtur. Numunelerin basınç dayanımı değişimleri incelendiğinde, öğütülmüş pomza miktarı arttıkça basınç dayanımında azalma meydana geldiği görülmektedir. Bu durum, çimento miktarındaki azalmadan kaynaklanmıştır. Çünkü yaklaşık %50 silis içermesine rağmen pomza 28 günlük kür süresi sonunda çimento kadar hidratasyona giremediği için dayanım artışına yeterince katkı sağlayamamıştır. Porozite, sorptivite ve sesüstü dalga geçiş hızı değerleri de basınç dayanımındaki değişim ile uyum içerisindeydi.

Çizelge 3. Deney sonuçları

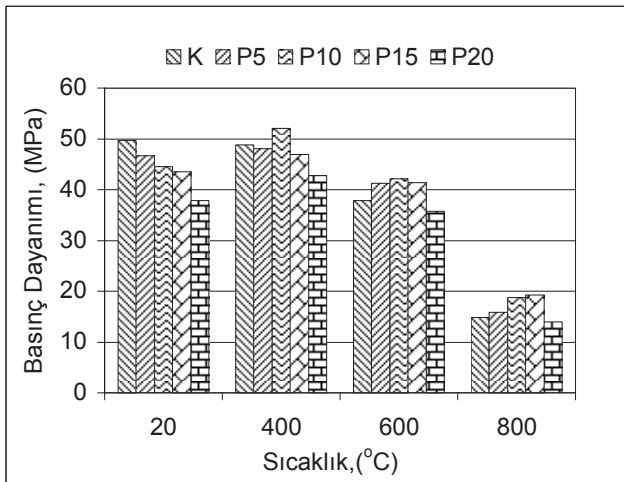
	K	P5	P10	P15	P20
Birim Ağırlık, (kg/m ³)	2245	2240	2238	2233	2227
Basınç Dayanımı, (MPa)	49.71	46.72	44.50	43.51	37.92
Sorptivite Katsayısıx10 ⁻³ (cm/s ^{1/2})	1.142	1.184	1.195	1.339	1.356
Porozite, (%)	8.442	8.835	9.362	9.720	9.848
Sesüstü dalga hızı, (Km/s)	4.552	4.396	4.355	4.266	4.139

Değişik yüksek sıcaklıklara maruz bırakılan numunelerin ağırlıklarındaki % kayıplar Şekil 3'te gösterilmiştir. Şekil 3 incelendiğinde, artan sıcaklık ile her seri için ağırlık kaybının arttığı görülmektedir.



Şekil 3. Serilerin sıcaklık artışına bağlı ağırlık kayıpları

Toplam 5 serinin ortalama ağırlık kayıpları 400 °C için %3.48, 600 °C için %4.78 ve 800 °C için ise %6.67 olarak bulunmuştur. Görüldüğü gibi en yüksek ağırlık kaybı 800 °C'de meydana gelmiştir. Bingöl ve Gül [3] ile Sancak ve Şimşek [17] yüksek sıcaklıklara maruz bırakılmış farklı beton numuneleri üzerinde yapmış oldukları çalışmalarda da benzer sonuçlar elde etmişlerdir. Yüzer ve arkadaşları [18] sıcaklık artışına bağlı olarak meydana gelen ağırlık kaybını şu şekilde açıklamışlardır. Çimento hamurundaki jel yapıyı oluşturan C-S-H'nin katı ögeleri adsorbsiyon suyu yardımıyla birbirine bağlanır ve 110 °C'den itibaren dehidrate olur. Kılcal boşluklardaki serbest su 100 °C civarında, dehidratasyon ile serbest kalan kimyasal bağ suyu ve adsorbsiyon suyu ise 300 °C'den itibaren buharlaşabilir. Buharlaşan su, rötreye neden olur. Bu da betonarme yapıda beton örtünün çatlamasına ve parça atmasına neden olur. Yine 500 °C civarında $Ca(OH)_2$ 'nin CaO ve H_2O 'ya dönüşümü, 800 °C sıcaklıkta çimento fazındaki seramik reaksiyonlar çimento pastasındaki katı madde miktarının azalmasına neden olur. Bu da doğal olarak ağırlık kaybı ile sonuçlanır. Tüm serilerin 20, 400, 600 ve 800 °C sıcaklıkları için basınç dayanımlarının değişimi Şekil 4'te gösterilmiştir. Şekil 4 incelendiğinde, 400 °C'de kontrol serisi hariç tüm pomza katkılı serilerin basınç dayanımlarının, 20 °C'ye göre bir miktar arttığı görülmektedir. Hertz [19] tarafından gerçekleştirilmiş bir çalışmada, mineral katkılı serilerin dayanımlarında 350 °C sıcaklığa kadar bir dayanım artışı gözlemlenmiştir. Yine Aydın ve Baradan pomza agregalı ve uçucu kül katkılı betonların 600°C'ye kadar bir dayanım kaybı sergilemediklerini vurgulamışlardır [13]. 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 [20].

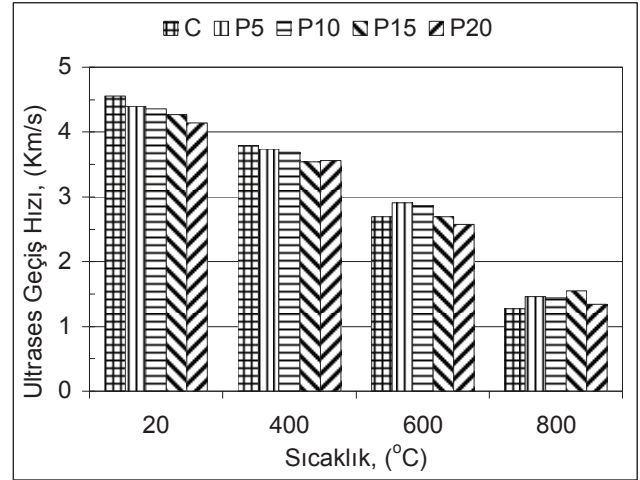


Şekil 4. Sıcaklık sonrası kalan dayanımlar

Şekil 4'ten görüldüğü üzere, 20 °C sıcaklıkta pomza katkılı serilerin basınç dayanımları, çimento miktarındaki azalmanın ve pomzanın yeterli puzolanik reaksiyona girmemesinin bir sonucu olarak kontrol serisinden düşüktür. Diğer sıcaklık derecelerinde ise pomza katkılı numunelerin (%20 katkılılar hariç) dayanımlarında kontrol serisine kıyasla bir artış gözlemlenmiştir. $Ca(OH)_2$ 'nin bozunması genellikle 350 °C'nin altında oluşmaz. Beton bu sıcaklık derecesinden daha yüksek sıcaklıklara maruz kaldığı zaman, kalsiyum hidroksit kireç ve su buharına dönüşmesi, dayanım kaybı açısından kritik bir durum değildir. Ancak bu durum, soğutulma sırasında kirecin genleşme yapması ile zararlı bir hal almaktadır. Kalsiyum hidroksit bu zararlı etkisi bazı mineral katkıları kullanılarak bertaraf edilebilir. Şöyleki; mineral katkılarda bulunan reaktif silis (SiO_2) ile çimentodaki $Ca(OH)_2$ arasında meydana gelen puzolanik reaksiyondan dolayı sistemde $Ca(OH)_2$ miktarı azalır [13]. Dolayısıyla, pomza içeren serilerde yüksek sıcaklıklarda daha az $Ca(OH)_2$ dehidrate olmuş ve bu numuneler kontrol serisine göre artan sıcaklıktan daha az etkilenmişlerdir.

Şekil 4'te, 800 °C sıcaklığa maruz kalan serilerde diğer sıcaklıklara oranla basınç dayanımlarında büyük bir düşüş görülmektedir. Bunun nedeni, bu sıcaklık derecesinden sonra, kristal suyu kaybının yol açtığı $Ca(OH)_2$ miktarının azalması, betonun morfolojisinin değişimi ve mikroçatlak oluşumudur. Arıöz [2] tarafından yapılan bir çalışmada, beton serilerin kalan dayanımlarındaki düşüş 400 °C ile 800 °C arasında meydana gelmiştir. Yapılan bir başka çalışmada ise Lin et al[21], 800 °C'de C-S-H jellerinin bozunmasından dolayı, tüm beton serilerinde ciddi bir tahribat gözlemlenmiştir.

Şekil 5'te ultrases geçiş hızı değerlerinin sıcaklık ile değişimi görülmektedir. Sıcaklığa maruz kalan tüm numunelerin ultrases geçiş hızı değerleri basınç dayanımlarını belirlemek için kırılmadan önce kaydedildi. Bu değerler 20°C'deki numunelerden elde edilen değerlerle karşılaştırıldı. Sıcaklık artışı ile numunelerin mikro yapıları bozulmuş ve bunun bir sonucu olarak da ses dalgası geçiş hızı değerleri düşmüştür. Özellikle 800°C'de bu düşüş çok belirgindir. Topçu ve Demir [22] yapmış oldukları çalışmada, 600°C'yi aşan sıcaklıklarda C-S-H jellerinin bozulmasının bir sonucu olarak beton numuneler içerisindeki hava boşluğu miktarının arttığını ve sesüstü dalgaların iletim hızının düştüğünü belirtmişlerdir.



Şekil 5. Sıcaklıkla Ultrases Geçiş Hızı Değişimi

4. Sonuçlar

Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda aşağıdaki neticeler elde edilmiştir.

1. Betona mineral katkı maddesi olarak çimento ile yer değiştirecek şekilde belirli oranlarda doğal puzolan özelliğine sahip öğütülmüş pomza ilavesinin, dayanımı düşürdüğü görülmüştür. Bu düşüşe rağmen, P20 serisinin 20°C'deki basınç dayanımı 35 MPa değerinin üzerindedir.
2. Sıcaklık artışıyla birlikte beton numunelerdeki boşluk suyu kaybı, kristal suyu kaybı ve CSH jellerinin bozunmasının bir neticesi olarak tüm serilerde ağırlık kaybı meydana gelmiştir.
3. 400 °C sıcaklıkta pomza katkılı serilerin basınç dayanımları 20 °C ki serilere göre yüksek çıkmıştır.
4. Artan sıcaklığa bağlı olarak tüm serilerde dayanım kaybı gözlemlenmiştir. Ancak, tüm yüksek sıcaklık değerlerinde pomza katkılı serilerin basınç dayanımları kontrol numunelerinden yüksek çıkmıştır.

Bu sonuçlar, çimento inceliğinde öğütülmüş doğal pomzanın betonda çimento katkısı olarak kullanımının yüksek sıcaklığa karşı dayanımı arttırdığını göstermektedir. Doğal çevre kaynaklarını enerji harcamadan betonda kullanmak suretiyle çimento miktarını azaltmak, hem çimento üretim prosesindeki enerji tüketimini ve karbon salınımını aza indirecek hem de ekonomiye olumlu katkı sağlayacaktır.

Teşekkür

FÜBAP (Fırat Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri) birimine, 1586 nolu münferit proje kapsamında bu çalışmaya maddi destek sağladıkları için teşekkür ederiz.

Kaynaklar

- [1]. Aydın, S., "Development of a high temperature-resistant mortar by using slag and pumice", *Fire Safety J.* 43: 610-617 (2008)
- [2]. Arıöz, Ö., "Effects of elevated temperatures on properties of concrete", *Fire Safety J.* 42: 516-522 (2007).
- [3]. Bingöl, A. F., Gül, R., "Effects of elevated temperatures and cooling regimes on normal strength concrete", *Fire and Mater.* 33: 79-88 (2009).
- [4]. Zega, C. J., Di Maio, A. A., "Recycled concrete exposed to high temperatures", *Magazine of Concr. Res.* 58 (10): 675-682 (2006).
- [5]. Lau, A., Anson, M., "Effect of high temperatures on high performance steel fibre reinforced concrete", *Cem. Concr. Res.* 36: 1698-1707 (2006).
- [6]. Demirel, B., Gönen, T., "Yüksek Sıcaklığın Karbon Lif Takviyeli Hafif Betonda Basınç Dayanımı ve Poroziteye Etkisi", *Pamukkale Üniversitesi Müh. Bilimleri Dergisi*, 14 (2) 223-228 (2008).
- [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", *Const. and Build. Mater.* 14: 261-266 (2000).
- [8]. Chan, S.Y.N., Luo, X., Sun, W., "Compressive strength and pore structure of high-performance concrete after exposure to high temperature up to 800 °C", *Cem. Concr. Res.* 30: 247-251 (2000).
- [9]. Sancak, E., Sarı, Y.D., Şimsek, O., "Effects of elevated temperature on compressive strength and weight loss of the light-weight concrete with silica fume and superplasticizer", *Cem. Concr. Comp.* 30: 715-721 (2008).
- [10]. 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).
- [11]. Yüzer, N., Aköz, F., Öztürk Dokuzer, L., "Compressive strength-color change relation in mortars at high temperature", *Cem. Concr. Res.* 34: 1803-1807 (2004).
- [12]. 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", *Cem. Concr. Res.* 31: 1291-1300 (2001).
- [13]. Aydın, S., Baradan, B., "Effect of pumice and fly ash incorporation on high temperature resistance of cement based mortars", *Cem. Concr. Res.* 37 (6): 988-995 (2007).
- [14]. Poon, C., Azhal, S., Anson, M., Wong, Y., "Performance of metakaolin concrete at elevated temperatures", *Cem. Concr. Comp.* 25: 83-89 (2003).
- [15]. Taşdemir, C., "Combined effects of mineral admixtures and curing conditions on the sorptivity coefficient of concrete", *Cem. Concr. Res.* 33: 1637-1642 (2003).
- [16]. Gönen, T., Yazıcıoğlu, S., "The influence of compaction pores on sorptivity and carbonation of concrete", *Const. and Build. Mater.* 21: 1040-1045 (2007).
- [17]. Sancak, E., Şimsek, O., Yüksek Sıcaklığın Silis Dumanı ve Süperakışkanlaştırıcı Katkılı Hafif Betona Etkileri, *Gazi Üniversitesi Müh.ve Mim.Fakültesi Dergisi*, 21 (3): 443-450 (2006).
- [18]. Yüzer, N., Aköz, F., Öztürk Dokuzer, L., Kızılkant, A. B., "Yüksek Sıcaklık Etkisinde Kalan Betonda Hasar Oranının Renk Ölçümü İle

Araştırılması", 5. Ulusal Beton Kongresi, 461-470, İstanbul, 1-3 Ekim 2003.

- [19]. Hertz, K.D., "Danish investigations on silica fume concretes at elevated temperatures", *ACI Mater. J.* 89 (4): 345- 347 (1992).
- [20]. Khandakar, M.A.H., "Macro-and Microstructural Investigations on strength and durability of pumice concrete at high temperature", *Journal of Materials in Civil Engineering*, 18 (4): 527-536 (2006).
- [21]. Lin, W.M., Lin, T.D., Powers-Couche, L.J., "Microstructures of fire-damaged concrete", *ACI Mater. J.* 93 (3): 199-205 (1996).
- [22]. Topçu, İ.B., Demir, A., "Uçucu Kül katkılı Harçlarda Yüksek Sıcaklık Etkisi", 6. Ulusal Beton Kongresi,Yüksek Dayanımlı Betonlar, 101-110 16-18 Kasım 2005.