

## Yüksek sıcaklığa maruz atık çelik lif takviyeli alkali ile aktive edilmiş yüksek fırın cürüflü harçların davranışı

### Behaviour of the waste steel fibre reinforced alkali-activated slag mortars exposed to high temperatures

Serhat ÇELİKTEN<sup>1\*</sup>, Mehmet CANBAZ<sup>2</sup>

<sup>1</sup>İnşaat Mühendisliği Bölümü, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi, Nevşehir, Türkiye.  
scelikten@nevsehir.edu.tr

<sup>2</sup>İnşaat Mühendisliği Bölümü, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Eskişehir, Türkiye.  
mcanbaz@ogu.edu.tr

Geliş Tarihi/Received: 15.07.2019  
Kabul Tarihi/Accepted: 24.10.2019

Düzeltilme Tarihi/Revision: 22.10.2019

doi: 10.5505/pajes.2019.66199  
Araştırma Makalesi/Research Article

#### Öz

Bu çalışmada, yüksek sıcaklığa maruz atık çelik lif takviyeli alkali ile aktive edilmiş yüksek fırın cürüflü harçların davranışı araştırılmıştır. Bu amaçla, yüksek fırın cürufu sodyum silikat ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) ve sodyum hidroksit ( $\text{NaOH}$ ) ile aktive edilerek harç karışımları oluşturulmuştur. Atık lif içermeyen karışımlar ile birlikte hacimce %1 ve %2 atık lif içeren karışımlar üretilmiş ve atık lif içeriğinin alkali ile aktive edilmiş harçların mekanik özelliklerine etkileri araştırılmıştır. Harç karışımlarından alınan  $4 \times 4 \times 16$  cm boyutlarındaki prizma harç numuneleri  $200^\circ\text{C}$ ,  $400^\circ\text{C}$  ve  $600^\circ\text{C}$  olmak üzere üç farklı derecede yüksek sıcaklık etkisine maruz bırakılmış ve harçların birim hacim ağırlıklarında, ultrases geçiş hızlarında, eğilme ve basınç dayanımlarında meydana gelen değişimler deneysel olarak belirlenmiştir. Dene sonuçları, atık çelik liflerin alkali ile aktive edilmiş yüksek fırın cürüflü harçların mekanik özelliklerini geliştirdiğini göstermiştir. Ayrıca,  $200^\circ\text{C}$  ve  $400^\circ\text{C}$  sıcaklıklara maruz bırakılan alkali ile aktive edilmiş harçların eğilme ve basınç dayanımları değişen oranlarda artmıştır.

**Anahtar kelimeler:** Alkali ile aktive edilmiş harç, Atık çelik lif, Yüksek sıcaklık, Yüksek fırın cürufu.

#### Abstract

In this study, behaviour of the waste steel fibre reinforced alkali-activated slag mortars exposed to high temperatures is investigated. For this purpose, mortar mixtures are produced by activating blast furnace slag with sodium silicate ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) and sodium hydroxide ( $\text{NaOH}$ ). In addition to the mixtures produced without waste fibre, the mortar mixtures including 1% and 2% waste fibre by volume are manufactured and the influence of waste steel fibre content on the mechanical properties of the alkali activated mortars is investigated. The specimens with the dimensions of  $4 \times 4 \times 16$  cm taken from the mortar mixtures are exposed to  $200^\circ\text{C}$ ,  $400^\circ\text{C}$  and  $600^\circ\text{C}$  temperatures and the changes due to the elevated temperature effect on the unit weights, ultrasound pulse velocities, flexural and compressive strengths of the mortars are determined experimentally. Results show that the waste steel fibres improve the mechanical properties of the alkali-activated mortars. Besides, the flexural and compressive strengths of the alkali activated mortars are increased in different proportions after exposure to  $200^\circ\text{C}$  and  $400^\circ\text{C}$  temperatures.

**Keywords:** Alkali-activated mortar, Waste steel fibre, Elevated temperature, Blast furnace slag.

## 1 Giriş

Geleneksel Portland çimentosu inşaat sektöründe en çok kullanılan bağlayıcı malzemedir. Ancak, Portland çimentosu üretiminin küresel enerji tüketiminin %36'sından sorumlu olması ve yılda 1.5 milyar ton gibi çok yüksek miktarda  $\text{CO}_2$  salınımına yol açması bu malzemenin tüketimini tartışılır hale getirmiştir [1],[2]. Geleneksel Portland çimentosu ile ilgili çevresel kaygılar araştırmacıları çimentoya alternatif, yenilikçi, çevre dostu ve sürdürülebilir alternatif bağlayıcılar araştırmaya itmiştir. Alkali ile aktive edilmiş bağlayıcılar bu alternatif bağlayıcılardandır. Alkali ile aktive edilmiş bağlayıcı üretimi ile Portland çimentosu üretimine göre hem daha düşük  $\text{CO}_2$  salınımına neden olunmakta hem de yüksek fırın cürufu ve uçucu kül gibi endüstriyel atıkların bu bağlayıcıların üretiminde kullanılmasıyla ekolojik ve ekonomik fayda elde edilebilmektedir [3],[4]. Alkali ile aktive edilmiş malzeme, katı silikat tozu ile katı veya çözülmüş halde bulunan alkali metal kaynağının reaksiyonu sonucunda ortaya çıkan bağlayıcı sistemi ifade eden en geniş sınıflandırmanın adıdır [5],[6]. Bu katı silikat tozu geleneksel klinkerlere benzer olabileceği gibi

alümina-silikat bakımından daha zengin olan yüksek fırın cürufu, doğal puzolan, uçucu kül veya taban külü gibi de olabilir. Alkali metal kaynağı ise alkali hidroksitler, silikatlar, karbonatlar, alüminatlar veya oksitler gibi alkali metal kanyonları muhteva eden, reaksiyon karışımının pH oranını yükselten ve katı tozun çözülmesini hızlandıran herhangi bir çözücü maddedir [7].

Yüksek fırın cürufu, demir-çelik endüstrisi atığı alümina silikat içerikli bir malzemedir. Yüksek fırın cürufu, demir cevheri, kok kömürü ve kireçtaşının yaklaşık  $1500^\circ\text{C}$ 'de yüksek fırın adı verilen fırınlarda ısıtılmasıyla elde edilen malzemenin demir hariç kısmı olan cüruf adı verilen kısmının ani şekilde soğutulmasıyla elde edilmektedir. Yüksek fırın cürufu çimento endüstrisi tarafından kullanılıyor olsa da bu kullanım yüksek fırın cürufunun depolama problemlerine tam anlamıyla çözüm olabilmiş değildir. Alkali ile aktive edilmiş bağlayıcı üretimi yüksek fırın cürufu gibi atık malzemelerin neden olduğu depolama problemleri için de sürdürülebilir bir çözüm potansiyeli taşımaktadır [8]-[11]. Son yıllarda, alkali ile aktive edilmiş yüksek fırın cürufunun taze ve serleşmiş özelliklerine kullanılan aktivatör türü ve içeriğinin [12],[13], bu

\*Yazışılan yazar/Corresponding author

bağlayıcıların üretimi sırasında uygulanan kür sıcaklığının [14],[15] ve Moleküler silikat (Ms modülü, aktivatörlerin  $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$  oranı) modülü [16] gibi çeşitli faktörlerin etkileri araştırılmıştır. Yapılan bir çalışmada [12], yüksek fırın cürufu sodyum silikat, sodyum hidroksit ve sodyum karbonat ayrı ayrı kullanılarak aktive edilerek harç karışımları oluşturulmuştur. Üretilen harçların kuruma rötreleri birbirleriyle ve geleneksel Portland çimentosu ile üretilen kontrol harçlarıyla kıyaslanmıştır. Sodyum hidroksit ve sodyum silikat ile üretilen harçların kuruma rötrelerinin kontrol harçlarına göre daha fazla olduğu görülmüştür. Bununla birlikte, sodyum karbonatla üretilen alkali ile aktive edilmiş harçların kuruma rötrelerinin kontrol harçlarıyla benzer olduğu rapor edilmiştir. Diğer bir çalışmada ise alkali ile aktive edilmiş yüksek fırın cürufu harçların, uçucu kül ile üretilen harçlara göre daha düşük Ms modülü ile aktive oldukları rapor edilmiştir [16].

Yapılar kullanım ömrü boyunca yangın gibi nedenlerle yüksek sıcaklık etkisine maruz kalabilmektedir. Yüksek sıcaklık etkisi, yapı elemanlarının üretiminde kullanılan malzemeler üzerinde çeşitli fiziksel ve kimyasal bozulmalar meydana getirebilmektedir. Bu bozulmalar sebebiyle de yapı elemanlarında taşıma gücü kaybı meydana gelebilmektedir. Bu nedenle, yapı elemanı üretiminde kullanılacak harç veya betonun yüksek sıcaklık etkisi altında performanslarını etkileyen karışım tasarımı ve kullanılacak agrega türü gibi faktörler de mutlaka göz önünde bulundurulmalıdır [17],[18]. İşte bu amaçla geleneksel Portland çimentosu ile üretilen harç veya betonların yüksek sıcaklık etkisi altındaki performansları birçok araştırmacı tarafından irdelenmiştir [19]-[21]. Buna rağmen, geleneksel Portland çimentosuna göre daha yenilikçi bir malzeme olan alkali ile aktive edilmiş bağlayıcıların yüksek sıcaklık performansları ile ilgili yapılan çalışmalar halen yeterli düzeyde değildir.

Dünya'da her yıl yaklaşık 1.5 milyar yeni lastik üretilmektedir [22]. Kullanım ömrü sona eren lastiklerin yaklaşık yarısı ise herhangi bir geri dönüşüm işlemine tabi tutulmadan doğaya atılmaktadır [23]. Atık lastikler doğada çözünemeyen atıklar olduklarından dolayı bu atıkların doğaya bilinçsizce atılması çevre ve sağlık problemlerine yol açmaktadır [24]. Atıkların oldukça büyük miktarda olması ve her geçen gün bu atıkların neden oldukları ekolojik ve ekonomik sorunların artması ile bu atıklar küresel bir sorun haline gelmiştir [25]. Günümüzde değerlendirilen atık lastiklerin önemli bir kısmı yakıt olarak, kauçuk kaplama yapımında veya bitümlü karışımlarda kullanılmaktadır [26]-[28]. Atık lastiklerin inşaat sektöründe değerlendirilmesi, küresel bir sorun haline alan bu atıkların ekonomiye geri kazandırılması açısından önemli bir alternatif olabilecektir. Atık lastiklerden geri dönüşümü sağlanan kauçuk ve çelik liflerin inşaat sektöründe özellikle beton üretiminde değerlendirilmesi ile iki açıdan fayda sağlanabilecektir. Bunlardan ilki ciddi çevre problemlerine neden olan bu atıkların betonda kullanımı ile atık yönetimi için bir alternatif olmasıdır. İkinci fayda ise beton üretimi için gerekli hammadde tüketiminin azalmasıdır [29]. Kırılmış atık taşı lastiklerinin betonda farklı amaçlarla kullanılması ile ilgili çalışmalar yapılmıştır [30]-[32]. Bu çalışmalarda kırılmış atık taşı lastikleri geleneksel betonda lif [30] olarak, agrega yerine ikame olarak [31] ve kendiliğinden yerleşen betonda kum yerine ikame olarak [32] kullanılmıştır. Diğer taraftan, çelik lifler betonun mekanik özelliklerini geliştirmek amacıyla kullanılabilir. Hurda lastiklerden elde edilen geri dönüştürülmüş çelik liflerin betonda kullanılması da ekonomik ve ekolojik açıdan önemlidir. Ancak, bu liflerin geleneksel

betonda ve alkali ile aktive edilmiş bağlayıcılarda değerlendirilmesi üzerine yapılmış çalışma halen oldukça azdır. Yapılan bir çalışmada [33], Portland çimentosuyla geleneksel harçlar ve F sınıfı uçucu kül veya metakaolin ile de alkali ile aktive edilmiş harçlar üretilmiştir. Atık lifler harç karışımlarında ağırlıkça %1 ve %2 oranlarında kullanılmıştır. Üretilen harçların dayanım, porozite ve hızlandırılmış korozyon özellikleri araştırılmıştır. Deney sonuçları, atık çelik liflerin hızlandırılmış korozyona maruz kalan harçların tokluğunu genellikle artırdığını göstermiştir. Bununla birlikte, alkali ile aktive edilmiş harçların geleneksel harçlara göre daha yüksek poroziteye sahip oldukları vurgulanmıştır. Yakın zamanda yapılan diğer bir çalışmada ise [34], endüstriyel olarak üretilen çelik lifler ile atık lastiklerden elde edilen çelik lifler hacimce %0.5 ve %1 oranlarında ayrı ayrı kullanılarak beton numuneler üretilmiştir. Ayrıca, lif içermeyen kontrol numuneleri de üretilmiştir. Üretilen kirşilerin mekanik özelliklerine kullanılan çelik lifin türünün etkileri araştırılmıştır. Araştırmacılar, atık çelik lif içeriğinin betonların basınç dayanımlarını kontrol betonlarına göre %5 ile %12 arasında ve endüstriyel liflerin ise %17 ile %20 arasında artırdığını bildirmişlerdir. Ayrıca, lif içeriğinin betonların yarmada çekme dayanımlarını da artırdığı ancak lif dozajının önemli bir etkisinin olmadığı rapor edilmiştir. Bu çalışmada da atık çelik liflerin alkali ile aktive edilmiş bağlayıcıların mekanik özelliklerine etkileri araştırılmıştır. Ayrıca, yüksek sıcaklığın atık çelik lif takviyeli alkali ile aktive edilmiş harçların özelliklerine etkileri irdelenmiştir.

## 2 Malzeme özellikleri

### 2.1 Yüksek fırın cürufu

Deneyel çalışmada alkali ile aktive etmek amacıyla bağlayıcı malzeme olarak kullanılan yüksek fırın cürufu, Karçimsa Çimento Sanayi ve Ticaret AŞ'den temin edilmiştir. Yüksek fırın cürufunun kimyasal özellikleri Tablo 1'de verilmiştir. Yüksek fırın cürufu, Karabük Demir Çelik Fabrikası atığıdır. Yüksek fırın cürufu malzemesinin TS EN 15167-1'e [35] göre 28 günlük aktivite indeksi % 72, özgül ağırlığı  $2.83 \text{ gr/cm}^3$  ve özgül yüzey alanı (Blaine inceliği)  $4125 \text{ cm}^2/\text{gr}$ 'dir.

Tablo 1. Yüksek fırın cürufunun kimyasal kompozisyonu.

Table 1. Chemical composition of blast furnace slag.

CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	MgO
34.3	32.55	10.21	1.07	0.91	0.78	0.26	8.67

### 2.2 Alkali aktivatörler

Yüksek fırın cürufunu aktive etmek amacıyla kullanılan sodyum silikat ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) Detsan Kimya Sanayi ve Ticaret Ltd. Şti.'nden temin edilmiştir. Suda çözünebilir bir malzeme olan sodyum silikat, cam suyu veya su camı olarak da bilinir. Seramik başta olmak üzere birçok alanda kullanılan sodyum silikat yüksek erime noktasına sahip bir bileşiktir. Temini kolay ve ucuzdur. Bu deneysel çalışmada sulu çözelti halinde temin edilen sodyum silikatın özellikleri Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2. Sodyum silikatın özellikleri.

Table 2. Properties of the sodium silicate solution.

Kimyasal Formül	$\text{Na}_2\text{SiO}_3$
Molekül Ağırlığı	63.94 g/mol
Yoğunluk	$1.39 \text{ g/cm}^3$
Na <sub>2</sub> O	% 8.9
SiO <sub>2</sub>	% 28.7
pH	11.31

Sodyum hidroksit (NaOH), çeşitli endüstri dallarında yaygın olarak kullanılan bir bileşiktir. Kostik adıyla da anılan NaOH, beyaz renkli, suda kolayca çözünebilen, nem absorbe etme kapasitesine sahip, kokusuz bir maddedir. Çözelti halinde iken sabuna benzer kayganlık hissi veren NaOH, insan cildinde kaşıntı meydana getirebilmektedir. Bu çalışmada yüksek fırın cürufunu aktive etmede kullanılan iki bileşikten biri olan NaOH, katı olarak Detsan Kimya Sanayi ve Ticaret Ltd. Şti.'nden temin edilmiş ve karışım suyunda çözdürülerek kullanılmıştır. Kimyasal özellikleri Tablo 3'te verilen NaOH, beyaz renkli ve pul şeklindedir.

Tablo 3. Sodyum hidroksitin özellikleri.

Table 3. Properties of the sodium hydroxide.

Kimyasal Formül	NaOH
Molekül Ağırlığı	40.0 g/mol
Asidimetrik	% 98.51
Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	% 0.32
NaCl	% 0.019
Fe	6 ppm

### 2.3 Standart kum

Alkali ile aktive edilmiş harç karışımlarında kullanılan CEN standart kumu Limak Trakya Çimento'dan temin edilmiştir. CEN standart kumunun elek analizi ve TS EN 196-1 [36] standardına göre sınır değerleri Tablo 4'te verilmiştir. Deneysel çalışmalarda kullanılan CEN standart kumu TS EN 196-1 [36] standardına uygun tane boyutu dağılımına sahiptir.

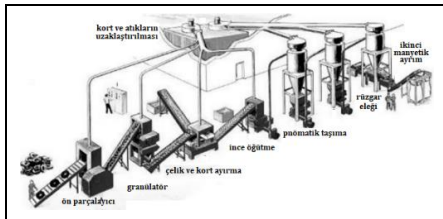
Tablo 4. CEN standart kumunun elek analizi.

Table 4. Sieve analysis of the CEN standard sand.

Kare göz açıklığı (mm)	Kümülatif elekten kalan (%)	TS EN 196-1 sınır değerleri (%)
2.00	0	0
1.60	10	7 ± 5
1.00	34	33 ± 5
0.50	65	67 ± 5
0.16	86	87 ± 5
0.08	99	99 ± 1

### 2.4 Atık çelik lif

Çalışmada kullanılan atık çelik lifler Nar Kauçuk Şirketi'nden temin edilmiştir. Atık çelik lifler atık lastiklerden elde edilmiştir. Atık lastiklerin oda sıcaklığında parçalanarak boyutlandırılması mekanik olarak yapılmaktadır. Öncelikle atık lastik içindeki teller ayrıştırılmakta, daha sonra ön parçalayıcı atık lastik boyutu küçültülmekte ve öğütülmektedir. Manyetik sistem kullanılarak kalan çelik teller ayrılmakta, rüzgâr elekleri yardımı ile de elyaflar ayıklanmaktadır. Oda sıcaklığında yapılan bu işlemlerin şeması Şekil 1'de verilmiştir [37]. Çalışmada kullanılan atık çelik liflerin görünimleri Şekil 2'de, özellikleri ise Tablo 5'te sunulmuştur.



Şekil 1. Oda sıcaklığında parçalama ve manyetik toplama [37].

Figure 1. Fragmentation and magnetic collection at room temperature.



Şekil 2. Atık çelik lifler.

Figure 2. Waste steel fibres.

Tablo 5. Atık çelik liflerin özellikleri.

Table 5. Properties of the waste steel fibres.

Çap (d), mm	0.2- 0.3
Uzunluk (l), mm	5-50
Narinlik (l/d)	5-227
Özgül Ağırlık, gr/cm <sup>3</sup>	7.09
Çekme Dayanımı, MPa	1130-1280
Elde edilme yöntemi	Oda sıcaklığında mekanik parçalama-manyetik toplama
Ağırlıkça uzunluk dağılımı, %	5-10 mm 10-40 mm 40-50 mm
	5 94 1

### 3 Metot

Deneysel çalışmada alkali ile aktive edilmiş harç karışımları kullanılan aktivatörlerdeki toplam Na içeriği %3 ve %6; aktivatörlerdeki toplam SiO<sub>2</sub> içeriğinin Na<sub>2</sub>O içeriğine oranı (Ms modülü) da 1 olacak şekilde oluşturulmuştur. Karışımlarda atık lif içermeyen kontrol karışımları ile hacimce %1 ve %2 olmak üzere 2 farklı atık çelik lif içeriği kullanılmıştır. Katı olarak temin edilen sodyum hidroksit (NaOH), karışım suyunda çözdürülerek kullanılmıştır. Sıvı halde temin edilen sodyum silikatın (Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>) yapısındaki su ise karışım suyuna dahil edilmiştir. Üçlü 4x4x16 cm prizma harç kalıpları için toplam yüksek fırın cürufu içeriği 450 gr ve su içeriği de 225 gr olarak belirlenmiştir. Üçlü 4x4x16 cm prizma kalıbı için belirlenen harç karışım oranları Tablo 6'da sunulmuştur.

Tablo 6. Harç karışım oranları.

Table 6. Mix proportions of the mortars.

Yüksek Fırın Cürufu, (gr)	NaOH (gr)	Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> (gr)	Kum (gr)	Su (gr)	Atık Lif (%)	Na (%)
450	17	64	1350	185	%0	3
450	17	64	1350	185	%1	3
450	17	64	1350	185	%2	3
450	33	127	1350	145	%0	6
450	33	127	1350	145	%1	6
450	33	127	1350	145	%2	6

Karışım TS EN 196-1 [36] standardına göre otomatik Hobart mikseri ile karıştırılmıştır. Karışıma malzeme ekleme sırası ve karıştırma hızı da aynı standart dikkate alınarak belirlenmiştir. Verilen karışım oranlarına göre üretilen harç karışımlarının TS EN 1015-3'e [38] uygun olarak yapılan yayılma tablası deneylerine göre yayılma değerleri 18± 1 cm arasında değiştiği için su düzeltilmesine veya katkı ilavesine ihtiyaç duyulmamıştır.

Ayrıca, ilave edilen lifler yayılma değerlerini dikkate değer bir ölçüde değiştirmedikleri görülmüştür.

Üretimden bir gün sonra kalıplarından çıkarılan 4x4x16 cm boyutlarındaki prizma numunelere 24 sa. boyunca 100 °C'de etüvde sıcak kür uygulaması gerçekleştirilmiştir. Daha sonra numuneler deney gününe kadar laboratuvar koşullarında 25 ±2 °C de bekletilmiştir. Üretimden 28 gün sonra yüksek sıcaklık etkisine maruz bırakılmayan kontrol numuneleri üzerinde TS EN 196-1 [36] standardına göre eğilme ve basınç dayanımı, ASTM C 597-09 [39] standardına uygun olarak ultrases geçiş süresi ve birim hacim ağırlık deneyleri yapılmıştır. Her bir karışımdan 3 numune 200 °C, 3 numune 400 °C ve 3 numune de 600 °C sıcaklıkta 6 °C/dk. ısınma hızına sahip yüksek sıcaklık fırınında 2 saat boyunca bekletilmiştir. 2 sa. boyunca yüksek sıcaklığa maruz kalmış olan harç numuneleri termal şok etkisine maruz bırakılmadan fırının havalandırma kapağı açılarak fırın içerisinde yavaşça soğumaya bırakılmıştır. Daha sonra, yüksek sıcaklığa maruz bırakılan numunelerin birim hacim ağırlık, ultrases geçiş süresi, eğilme ve basınç dayanımı değerleri deneysel olarak belirlenmiş ve kontrol numuneleriyle kıyaslanmıştır. Şekil 3'te %3 Na ve %1 atık çelik lif ile üretilen numune üzerinde yapılan eğilme ve basınç deneyleri gösterilmiştir.



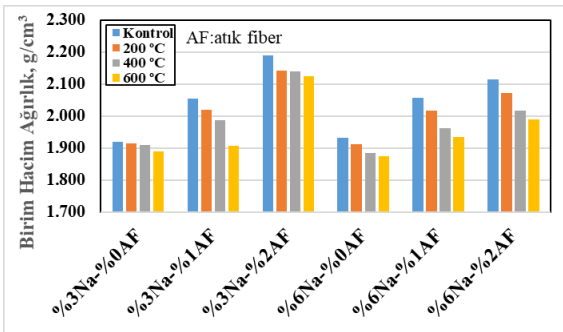
Şekil 3. Harçlar üzerinde yapılan eğilme ve basınç deneyleri.

Figure 3. The flexural and compressive strength tests on the mortars.

## 4 Bulgular ve tartışma

### 4.1 Fiziksel özellikler

Alkali ile aktive edilmiş yüksek fırın cürufu harçların birim hacim ağırlıklarında Na konsantrasyonunun, atık lif içeriğinin ve yüksek sıcaklık etkisinin meydana getirdiği değişimler Şekil 4'te verilmiştir.



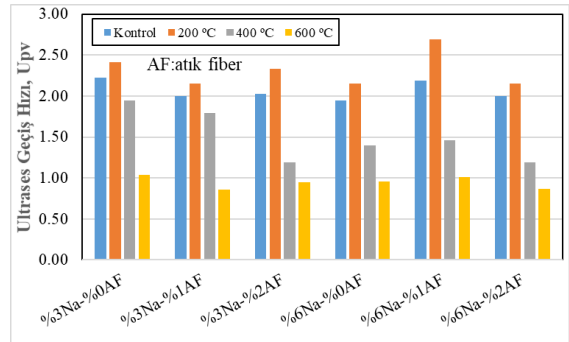
Şekil 4. Harçların birim hacim ağırlıkları.

Figure 4. The unit weights of the mortars.

Harçların birim hacim ağırlıkları Na içeriği ile birlikte %4'e varan oranlarda artmıştır. Bunun nedeni olarak harçlarda aktivatör oranı artırıldığında yerine başkaca bir malzemenin çıkarılmaması olarak gösterilebilir. Alkali ile aktive edilmiş

harçlara %1 oranında atık lif ilavesi harçların birim hacim ağırlıklarını yaklaşık olarak %6 oranında artırmıştır. Ayrıca, %2 atık lif ilavesi ise harçların birim hacim ağırlıklarını %9 ile %14 arasında artırmıştır. Alkali ile aktive edilmiş harçlarda atık çelik lif içeriği ile birlikte harçların birim hacim ağırlıklarında görülen artışların nedeni olarak atık liflerin özgül ağırlıklarının diğer malzemelere göre daha yüksek olması gösterilebilir. Yüksek sıcaklık etkisinde harçların birim hacim ağırlıkları 200 °C de %2'ye 400 °C de %4'e ve 600 °C de ise %7 ye varan oranlarda azalmıştır.

Alkali ile aktive edilen yüksek fırın cürufu harçların 28 günlük ultrases geçiş hızı değerleri ile yüksek sıcaklık etkisi sonrasındaki değerleri Şekil 5'te verilmiştir. Yüksek sıcaklık etkisine maruz bırakılmayan kontrol numunelerinin ultrases geçiş hızları 1.94 km/s ile 2.22 km/s arasında değişmiştir. Bu değerlerin bu çalışmada üretilen harçlar ile benzer basınç dayanımına sahip geleneksel betonların ultrases geçiş hızları değerlerine [40],[41] göre daha düşük olduğu görülmüştür. Benzer şekilde daha önce yapılan bir çalışmada, Portland çimentolu harçlara göre daha yüksek basınç dayanımına sahip metakaolin esaslı alkali ile aktive edilmiş harçların daha yüksek poroziteye sahip oldukları belirtilmiştir [33]. Alkali ile aktive edilmiş bağlayıcılarda yeterli su içeriği, uygun işlenebilirliğin elde edilebilmesi ve aktive edilecek malzemedeki iyonların çözünmesi için gereklidir [42],[43]. Bununla birlikte, bu bağlayıcılarda, aktive edilecek malzeme (bu çalışmada yüksek fırın cürufu) ağırlığının yaklaşık %10'u gibi oldukça düşük miktardaki su içeriği bağlayıcı jel oluşumuna katılmaktadır [44],[45]. Bir miktar su da oluşan bağlayıcı jelin tabakaları arasında yerleşebilmektedir [46]. Geriye kalan ve karışım suyunun büyük çoğunluğunu oluşturan su ise bağlayıcının sertleşmesi sırasında veya uygulanan sıcak kür nedeniyle buharlaşmaktadır. Fazla suyun buharlaşması ile de boşluklu bir matris elde edilmektedir [43],[45].



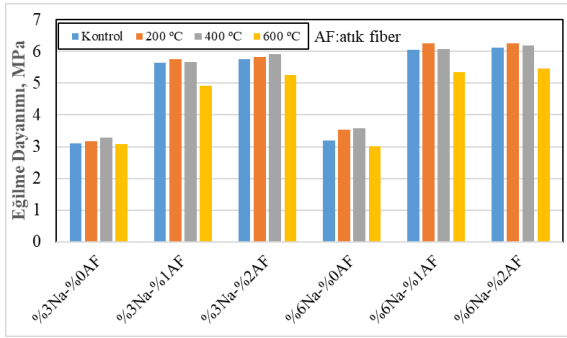
Şekil 5. Harçların ultrases geçiş hızları.

Figure 5. The ultrasonic pulse velocities of the mortars.

Atık lif ilavesinin ve Na konsantrasyonunun harçların ultrases geçiş hızlarında belirgin bir etkisinin olmadığı gözlenmiştir. Bununla birlikte, bu çalışmada üretilen harçların ultrases geçiş hızı değerleri 200 °C'ye maruz bırakıldıktan sonra %8 ile %23 arasında değişen oranlarda artmıştır. Bunun nedeni olarak alkali ile aktive edilmiş harçlarda bağlayıcı jel oluşumunun yüksek sıcaklık etkisi nedeniyle devam etmesi gösterilebilir. Harçlar 200 °C'den daha yüksek sıcaklıklara maruz bırakıldığında ise ultrases geçiş hızları kontrol harçlarına göre 400 °C'de %10 ile %41 arasında, 600 °C'de ise %20 ile %53 arasında değişen oranlarda azalmıştır.

## 4.2 Mekanik özellikler

Bu çalışmada üretilen kontrol harçlarının (yüksek sıcaklık etkisine maruz bırakılmayan) 28 günlük eğilme dayanımları ile yüksek sıcaklık etkisine maruz bırakılan harçların eğilme dayanımı değerleri Şekil 6'da verilmiştir. Na konsantrasyonunun %3'ten %6'ya çıkmasıyla alkali ile aktive edilmiş yüksek fırın cürufu harçların eğilme dayanımları %3 ile %7 arasında artmıştır. Na içeriğinin artması, aktive edilecek malzemede Al ve Si elementlerinin bu malzemelerden çözülüp bağlayıcı jel oluşumuna katılımını artırmaktadır. Bu nedenle de Na içeriğinin optimum bir değere kadar artmasıyla alkali ile aktive edilmiş bağlayıcıların dayanım gelişimi de devam edebilmektedir. Ancak, optimum aktivatör içeriğinden daha fazla aktivatör kullanılması özellikle NaOH'dan gelen OH<sup>-</sup> iyonları alümina silika jellerinin çökmesine neden olmakta ve sonuç olarak da oluşan bağlayıcı dayanımının olumsuz etkilenmesine neden olmaktadır [47]. Çalışmada üretilen harçların eğilme dayanımlarının da birbirine oldukça yakın olması kullanılan aktivatör içeriğinin optimum değerinin %3 civarında olduğunu göstermektedir.



Şekil 6. Harçların eğilme dayanımları.

Figure 6. The flexural strengths of the mortars.

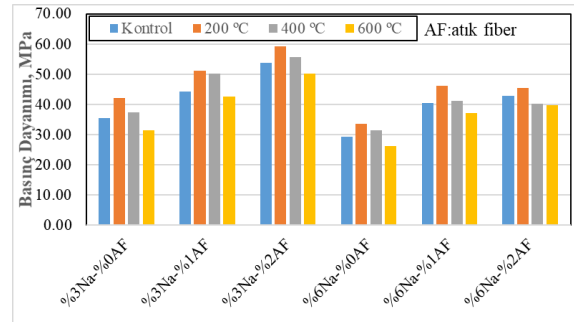
Atık çelik lif içeriği alkali ile aktive edilmiş harçların eğilme dayanımları üzerinde oldukça etkili olmuştur. Öyle ki, %3 Na içeriği ile üretilen harçların 28 günlük eğilme dayanımları %1 atık lif içeriği ile %81, %2 atık lif içeriğiyle de ortalama olarak %86 oranında artmıştır. Benzer değişimler %6 Na ile üretilen harçlarda da görülmüş ve bu harçların 28 günlük eğilme dayanımları da %1 atık lif içeriği ile %89, %2 atık lif içeriğiyle de ortalama olarak %91 oranında artmıştır. Burada, %1 den daha fazla lif içeriğinin bu çalışmada üretilen alkali ile aktive edilmiş harçların eğilme dayanımları üzerinde önemli bir etkisinin olmadığı görülmüştür. Benzer şekilde, Portland çimentolu betonların mekanik özellikleri üzerine atık lif içeriğinin etkisinin araştırıldığı daha önce yapılmış bir çalışmada da, hacimce %0.5 ve %1 atık lif kullanılarak betonlar üretilmiştir. Üretilen betonların eğilme dayanımlarının atık lif içeriği ile birlikte arttığı rapor edilmiştir [48] Bununla birlikte, 200 °C sıcaklıkta harçların eğilme dayanımlarında %10'a varan oranlarda artışlar gözlenmiştir. Sıcaklık 400 °C'ye çıktığında da harçların eğilme dayanımlarında deney öncesine göre 200 °C sıcaklıkta olduğu gibi kontrol harçlarına göre azalma görülmemiştir. 400 °C sıcaklığa maruz bırakılan harçların eğilme dayanımlarının kontrol harçlarına göre %11'e ulaşan oranlarda daha yüksek olduğu görülmüştür. Sıcaklık 600 °C'ye çıktığında ise harçların eğilme dayanımları yüksek sıcaklık etkisine maruz bırakılmadan önceki dayanımlarına göre %1 ile %13 arasında değişen oranlarda azalmıştır.

Harçların basınç dayanımlarında Na konsantrasyonu, atık çelik lif içeriği ve yüksek sıcaklık etkisiyle meydana gelen değişimler

Şekil 7'de sunulmuştur. Harçların basınç dayanımları Na içeriğindeki artış ile %17'ye varan oranlarda azalmıştır. Bu durum %3 Na içeriğinin bu çalışmada kullanılan yüksek fırın cürufunu aktive etmede yeterli olduğunu göstermektedir.

Deney sonuçları, %1 atık lif içeriğinin harçların basınç dayanımlarını %24 ile %38 arasında; %2 atık lif içeriğinin ise %45 ile %51 arasında artırdığını göstermiştir. Harçların basınç dayanımları 200 °C'de %3 ile %24 arasında artmıştır. Alkali ile aktive edilmiş harçların eğilme ve basınç dayanımlarında 200 °C görülen artışın nedeni olarak bu sıcaklıkta harçlarda sıcak kür etkisinin meydana gelmesi ve sıcak kür ile birlikte dayanım gelişimlerinin devam etmesi gösterilebilir. 400 °C'de harçların basınç dayanımları 200°C deki değerlerine göre düşüş eğilimi gösterse de %6 Na ve %2 atık lif ile üretilen harçlar hariç tüm harçların basınç dayanımlarının kontrol harçlarına göre daha yüksek olduğu görülmüştür. Benzer sonuçlar daha önceki çalışmalarda da gözlenmiştir. Yapılan bir çalışmada [49], yüksek fırın cürufu Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> ile aktive edilmiş ve elde edilen bağlayıcılar 200 °C ile 800 °C arasında değişen sıcaklıklara maruz bırakılmıştır. Bağlayıcıların basınç dayanımlarında 600 °C'ye kadar kademeli olarak artışlar gözlenmiştir [49].

Sıcaklık 600 °C'ye ulaştığında ise harçların basınç dayanımları kontrol harçlarına göre %3 ile %11 oranları arasında değişen oranlarda azalmıştır. Atık çelik lif içeriği harçların basınç dayanımlarında yüksek sıcaklık etkisiyle meydana gelen kayıpları az da olsa azaltmıştır. Atık çelik lifler ile üretilen harçların basınç dayanımlarında 600 °C'de meydana gelen kayıpların kontrol harçlarına göre %2 ile %7 arasında değişen oranlarda daha az olduğu görülmüştür.



Şekil 7. Harçların basınç dayanımları.

Figure 7. The compressive strengths of the mortars.

## 5 Sonuçlar

Yüksek sıcaklığın atık taşıt lastiğinden elde edilen çelik lifler ile üretilen alkali ile aktive edilmiş yüksek fırın cürufu harçların özelliklerine etkisinin incelendiği bu çalışmada yapılan deneyler sonucunda aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır:

- Alkali ile aktive edilmiş harçların birim hacim ağırlıkları atık lif içeriği ile belirgin bir şekilde artmıştır.
- Yüksek sıcaklık etkisiyle harçların birim hacim ağırlıkları kademeli olarak azalmıştır.
- Atık çelik lif ilavesi harçların ultrases geçiş hızlarında belirgin bir etki oluşturmamıştır.
- Harçların ultrases geçiş hızlarında 200 °C de %23'e varan oranlarda artış görülmüştür.

- Alkali ile aktive edilmiş harçların eğilme dayanımları %1 atık lif içeriği ile %89'a; %2 atık lif içeriği ile birlikte %91'e varan oranlarda artmıştır.
- Harçların eğilme dayanımlarında 200 °C sıcaklıkta %10'a ulaşan artışlar görülürken, 400 °C de de harçlar eğilme dayanımlarını korumuştur.
- Harçların basınç dayanımları 200 °C'de %24'e ulaşan oranlarda artarken, 400 °C'de genellikle basınç dayanımları kontrol numunelerinden daha yüksek olmuştur. 600 °C'de ise harçların basınç dayanımları %11'e varan oranlarda azalmıştır.
- Atık çelik lif içeriğinin harçların basınç dayanımlarında yüksek sıcaklık etkisiyle meydana gelen kayıpları azaltmada etkili olduğu görülmüştür.

Bu deneysel çalışma sonucunda atık çelik liflerin alkali ile aktive edilmiş bağlayıcılarda değerlendirilebileceği görülmüştür. Atık taşıt lastik ürünlerinin geri kullanımı ve yüksek fırın cürufu ile çimentosuz bağlayıcı elde edilmesi ile çevreci ve atık maliyetinin azaltılması adına ekonomiye katkı sağlayan bir çalışma yapılmıştır. Çalışma neticesinde, alkali ile aktive edilmiş yüksek fırın cürufu harçlarda %1 atık çelik lif içeriği önerilir.

## 6 Conclusions

In this study, the influence of high temperature on the alkali-activated blast furnace slag mortars produced with recycled steel fibres from waste tires was investigated. The following conclusions can be drawn based on the test results:

- The unit weights of alkali-activated mortars increased as increasing waste steel fibre content, significantly,
- The unit weights of mortars decreased gradually under the effect of high temperature,
- Addition of waste steel fibre had not any significant influence on the ultrasonic pulse velocities of the mortars,
- The ultrasonic pulse velocities of the mortars increased up to 23% at 200 °C,
- The flexural strengths of the alkali-activated mortars increased with 1% and 2% waste steel fibre content up to 89% and 91%, respectively,
- The flexural strengths of the mortars increased up to 10% at 200 °C. The mortars had almost their initial flexural strength at 400 °C,
- The compressive strengths of the mortars increased up to 24% at 200 °C. Also, the compressive strengths of the mortars were higher than their initial strengths at 400 °C. As for 600 °C exposure, the strengths of the mortars decreased up to 11%,
- Waste steel fibres were effective on the decrease the compressive strength losses in the mortars under the influence of high temperatures,

Finally, it was concluded that waste steel fibres can be utilized in the alkali-activated binders. In this work, eco-friendly approach was adopted and contributed to economy by reuse of by the recovery of waste steel fibres and production of cementless binders with blast furnace slag. As a result of the work, 1% recycled steel fibre content

can be proposed for alkali-activated blast furnace slag mortars.

## 7 Kaynaklar

- [1] Andrew RM, "Global CO<sub>2</sub> emissions from cement production". *Earth System Science Data*, 10(1), 195, 2018.
- [2] Kermeli K, Edelenbosch OY, Crijns-Graus W, van Ruijven BJ, Mima S, van Vuuren DP, Worrell E. "The scope for better industry representation in long-term energy models: Modeling the cement industry". *Applied Energy*, 240, 964-985, 2019.
- [3] Duxson P, Provis JL, Lukey GC, Van Deventer JS. "The role of inorganic polymer technology in the development of 'green concrete'". *Cement and Concrete Research*, 37(12), 1590-1597, 2007.
- [4] Hossain MM, Karim MR, Hossain MK, Islam MN, Zain MFM. "Durability of mortar and concrete containing alkali-activated binder with pozzolans: a review". *Construction and Building Materials*, 93, 95-109, 2015.
- [5] Buchwald A, Kaps C, Hohmann M. "Alkali-activated binders and pozzolan cement binders-complete binder reaction or two sides of the same story". *ICCC 2003 11<sup>th</sup> International Congress on the Chemistry of Cement*, Durban, South Africa, 11-16 May, 2003.
- [6] Shi C, Roy D, Krivenko P. *Alkali-activated cements and concretes*. London, United Kingdom, CRC Press, 2003.
- [7] Wagh AS. "Chemically bonded phosphate ceramics-a novel class of geopolymers". *106<sup>th</sup> Annual Meeting of the American Ceramic Society*, Indianapolis, Indiana, USA, 18-21 April, 2004.
- [8] Swamy RN. *Concrete Technology and Design*. Surrey, United Kingdom, Surrey University Press, 1986.
- [9] British Standards Institution. "Cement-Part 1: Composition, Specifications and Conformity Criteria for Common Cements". United Kingdom, 2000.
- [10] Roy DM. "Alkali-activated cements opportunities and challenges". *Cement and Concrete Research*, 29(2), 249-254, 1999.
- [11] Rashad, AM. "A comprehensive overview about the influence of different additives on the properties of alkali-activated slag-a guide for Civil Engineer". *Construction and Building Materials*, 47, 29-55, 2013.
- [12] Atiş CD, Bilim C, Çelik Ö, Karahan O. "Influence of activator on the strength and drying shrinkage of alkali-activated slag mortar". *Construction and Building Materials*, 23(1), 548-555, 2009.
- [13] Aydın S, Baradan B. "Effect of activator type and content on properties of alkali-activated slag mortars". *Composites Part B: Engineering*, 57, 166-172, 2014.
- [14] Bilim C, Karahan O, Atiş CD, İlkentapar S. "Effects of chemical admixtures and curing conditions on some properties of alkali-activated cementless slag mixtures". *KSCE Journal of Civil Engineering*, 19(3), 733-741, 2015.
- [15] Nedeljković M, Ghiassi B, van der Laan S, Li Z, Ye G. "Effect of curing conditions on the pore solution and carbonation resistance of alkali-activated fly ash and slag pastes". *Cement and Concrete Research*, 116, 146-158, 2019.
- [16] Çelikten S, Sarıdemir M, Deneme İÖ. "Mechanical and microstructural properties of alkali-activated slag and slag+ fly ash mortars exposed to high temperature". *Construction and Building Materials*, 217, 50-61, 2019.

- [17] Behfarnia K, Shahbaz M. "The effect of elevated temperature on the residual tensile strength and physical properties of the alkali-activated slag concrete". *Journal of Building Engineering*, 20, 442-454, 2018.
- [18] Khaliq W, Anis Khan H. "High temperature material properties of calcium aluminate cement concrete", *Construction and Building Materials*, 94, 475-487, 2015.
- [19] Rao VV, Parameshwaran R, Ram VV. "PCM-mortar based construction materials for energy efficient buildings: A review on research trends". *Energy and Buildings*, 158, 95-122, 2018.
- [20] Cree D, Green M, Noumowé A. "Residual strength of concrete containing recycled materials after exposure to fire: a review". *Construction and Building Materials*, 45, 208-223, 2013.
- [21] Ma Q, Guo R, Zhao Z, Lin Z, He K. "Mechanical properties of concrete at high temperature-A review". *Construction and Building Materials*, 93, 371-383, 2015.
- [22] Loloie Z, Mozaffarian M, Soleimani M, Asassian N. "Carbonization and CO<sub>2</sub> activation of scrap tires: Optimization of specific surface area by the Taguchi method". *Korean Journal of Chemical Engineering*, 34(2), 366-375, 2017.
- [23] Thomas BS, Gupta RC. "A comprehensive review on the applications of waste tire rubber in cement concrete". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 54, 1323-1333, 2016.
- [24] Dehghani M, Keshtgar L, Javaheri MR, Derakhshan Z, Oliveri Conti G, Zuccarello P, Ferrante M. "The effects of air pollutants on the mortality rate of lung cancer and leukemia". *Molecular Medicine Reports*, 15(5), 3390-3397, 2017.
- [25] Wang C, Tian X, Zhao B, Zhu L, Li S. "Experimental study on spent FCC catalysts for the catalytic cracking process of waste tires". *Processes*, 7(6), 335, 2019.
- [26] Pipilikaki P, Katsioti M, Papageorgiou D, Fragoulis D, Chaniotakis E. "Use of tire derived fuel in clinker burning". *Cement and Concrete Composites*, 27(7-8), 843-847, 2005.
- [27] Gonen T. "Freezing-thawing and impact resistance of concretes containing waste crumb rubbers". *Construction and Building Materials*, 177, 436-442, 2018.
- [28] Farina A, Zanetti MC, Santagata E, Blengini GA. "Life cycle assessment applied to bituminous mixtures containing waste materials: Crumb rubber and reclaimed asphalt pavement". *Resources, Conservation and Recycling*, 117, 204-212, 2017.
- [29] Mendis AS, Al-Deen S, Ashraf M. "Effect of rubber particles on the flexural behaviour of reinforced crumbed rubber concrete beams". *Construction and Building Materials*, 154, 644-657, 2017.
- [30] Olivares FH, Barluenga G, Bollati M, Witoszek B. "Static and dynamic behaviour of waste tyre rubber-filled concrete". *Cement and Concrete Research*, 32(10), 1587-1596, 2002.
- [31] Huang B, Li G, Pang SS, Eggers J. "Investigation into waste tire rubber-filled concrete". *Journal of Materials in Civil Engineering*, 16(3), 187-194, 2004.
- [32] Hesami S, Hikouei IS, Emadi SAA. "Mechanical behavior of self-compacting concrete pavements incorporating waste tire rubber crumb and reinforced with polypropylene fiber". *Journal of cleaner production*, 133, 228-234, 2016.
- [33] Onuaguluchi O, Borges PH, Bhutta A, Banthia N. "Performance of scrap tire steel fibers in OPC and alkali-activated mortars". *Materials and Structures*, 2017. <https://doi.org/10.1617/s11527-017-1026-6>.
- [34] Samarakoon SSM, Ruben P, Pedersen JW, Evangelista L. "Mechanical performance of concrete made of steel fibers from tire waste". *Case Studies in Construction Materials*, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2019>.
- [35] Türk Standartları Enstitüsü. "Öğütülmüş Yüksek Fırın Curufu-Beton, Harç ve Şerbette Kullanım için-Bölüm 1: Tarifler, Özellikler ve Uygunluk Kriterleri". Ankara, Türkiye, 2016.
- [36] Türk Standartları Enstitüsü. "Çimento deney metotları-Bölüm 1: Dayanım tayini". Ankara, Türkiye, 2016.
- [37] Karabörk F, Akdemir A. "Atık taşıt lastiklerinin parçalanması ve lastik tozunun karakterizasyonu". *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fen Bilimleri Dergisi*, 29(1), 29-40, 2013.
- [38] Türk Standartları Enstitüsü. "Kagir Harci-Deney Metotları- Bölüm 3: Taze Harç Kıvamının Tayini (yayımla tablası ile)". Ankara, Türkiye, 2016.
- [39] ASTM International. "Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete". West Conshohocken, USA, 2009.
- [40] Demirboğa R, Türkmen İ, Karakoc MB. "Relationship between ultrasonic velocity and compressive strength for high-volume mineral-admixed concrete". *Cement and Concrete Research*, 34(12), 2329-2336, 2004.
- [41] Turgut P. "Research into the correlation between concrete strength and UPV values". *NDT. net*, 12(12), 1-9, 2004
- [42] Motorwala A, Shah V, Kammula R, Nannapaneni P, Rajiwala DB. "ALKALI activated FLY-ASH based geopolymer concrete". *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, 3(1), 159-166, 2013.
- [43] Duxson P, Lukey GC, van Deventer JS. "Physical evolution of Na-geopolymer derived from metakaolin up to 1000 C". *Journal of Materials Science*, 42(9), 3044-3054, 2007.
- [44] Huajun Z, Xiao Y. "Effect of retarder on reaction process of metakaolin-slag-based geopolymer". *Journal of Theoretical and Applied Information Technology*, 48(3), 1384-1390, 2013.
- [45] Mobili A, Belli A, Giosuè C, Bellezze T, Tittarelli F. "Metakaolin and fly ash alkali-activated mortars compared with cementitious mortars at the same strength class". *Cement and Concrete Research*, 88, 198-210, 2016.
- [46] Wang SD, Scrivener KL, Pratt PL. "Factors affecting the strength of alkali-activated slag". *Cement and concrete research*, 24(6), 1033-1043, 1994.
- [47] Posi P, Teerachanwit C, Tanutong, C, Limkamoltip S, Lertnimoolchai S, Sata, V, Chindaprasirt P. "Lightweight geopolymer concrete containing aggregate from recycle lightweight block". *Materials and Design*, 1980-2015(52), 580-586, 2013.
- [48] Ahmadi M, Farzin S, Hassani A, Motamedi M. "Mechanical properties of the concrete containing waste fibers and aggregates". *Construction and Building Materials*, 144, 392-398, 2017.
- [49] Rashad AM, Bai Y, Basheer PAM, Collier NC, Milestone NB. "Chemical and mechanical stability of sodium sulfate activated slag after exposure to elevated temperature". *Cement and Concrete Research*, 42(2), 333-343, 2012.