

## Oda Sıcaklığında Kür Edilen Granüle Yüksek FırınCüruflluGeopolimer Harçların Fiziksel ve Mekanik Özelliklerinin Araştırılması

Gökhan Kürklü<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Afyon Kocatepe Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Afyonkarahisar.  
e-posta:kurklu@aku.edu.tr

Geliş Tarihi: 11.04.2016; Kabul Tarihi: 31.08.2016

### Özet

Bu çalışmada granüle yüksek fırın cürufunun (GYFC) geopolimer harç üretiminde bağlayıcı ve agrega olarak kullanılabilirliği araştırılmıştır. Harç üretimi sırasında en az enerji tüketimi hedeflenmiş ve etüv kürü yerine oda sıcaklığında kür gerçekleştirilmiştir. Likit/Bağlayıcı (l/b) olarak 1 ve 0.7 olmak üzere iki farklı oran belirlenmiştir. Alkali aktivatör olarak NaOH ve SS (2:1, 1:2, 3:0, 0:3) dört farklı oranda kullanılmıştır. Harç üzerinde deneyler 28. günden sonra gerçekleştirilmiştir. Numuneler üzerinde basınç dayanımı, eğilme dayanımı, su emme, görünür porozite, birim hacim ağırlık, XRD, XRF, SEM ve EDX analiz ve deneyleri gerçekleştirilmiştir. Sonuç olarak GYFC agrega ve öğütülmüş GYFC bağlayıcı ile oda sıcaklığında kür edilmiş geopolimer harç üretiminin mümkün olduğu ortaya konmuştur. Deney sonuçlarına göre en yüksek eğilme dayanım değeri (5.1MPa)2:1 oranında NaOH ve SS içerikli ve l/b oranının 0.7 olduğu harçlarda elde edilmiştir. En yüksek basınç dayanımı değeri (29.1MPa)3:0 oranında NaOH içerikli ve l/b oranının 0.7 olduğu harçlarda elde edilmiştir.

### Anahtar kelimeler

Geopolimer harç;  
Granüle yüksek fırın cürufu; Oda sıcaklığı kürü.

## The Investigation of Physical and Mechanical Properties of Geopolymer Mortars with Granulated Blast Furnace Slag Cured at Room Temperature

### Abstract

In this study, the usage of granulated blast furnace slag (GBFS) as binder and aggregate in the manufacture of geopolymer mortar was investigated. For reduced energy consumption in production and the curing was applied at room temperature instead of oven curing. Liquid/Binder (l/b) ratios were determined in two different ratio as 1 and 0.7. Alkaline activators such as NaOH and SS (2:1, 1:2, 3:0, 0:3) were used in four different rates. Experiments were performed on mortar after 28-days. Compressive strength, flexural strength, water absorption, apparent porosity, bulk density, XRD, XRF, SEM and EDX analysis and tests were performed on the samples. As a result, it was concluded that it is possible to manufacture geopolymer mortar with GBFS aggregate and grounded GBFS binder with curing at room temperature. According to the finding, the highest flexural strength value (5.1 MPa) was obtained from the mortar samples with 2:1 NaOH and SS content and l/b ratio for 0.7. The highest compressive strength values (29.1 MPa) were obtained from the mortar samples with a 3:0 NaOH content and l/b for 0.7.

### Keywords

Geopolymer mortar;  
Granulated blast furnace slag; Room temperature curing.

© Afyon Kocatepe Üniversitesi

### 1. Giriş

Türk demir çelik sektörü, son 15 yıllık süreçte kapasite ve üretim artış hızı açısından önde gelen ülkelerden birisi olmuş, 2000 yılında 20 milyon ton civarında olan ham çelik üretme kapasitesini 2013 sonunda 50 milyon ton seviyesine çıkarmış ve

dünya ham çelik üretiminde 8. sıraya yükselmiştir (Şahin, 2015). Türk demir çelik sektörü, aynı zamanda, üretim faaliyetlerine bağlı olarak yüksek miktarlarda cüruf oluşması nedeniyle ülkemizdeki en büyük atık üreticisi sektörler arasında yer almıştır. Her yıl 400 milyon tondan fazla çelik cürufu üretilmektedir (Öcal, 2014).

Yüksek fırın cürufu, yüksek fırında pik demirinin üretiminde elde edilen ve kireç taşının, demir cevherinin ve kokun kombinasyonu sonucu meydana gelen bir yan üründür. Erimiş cüruf hızlı bir şekilde su havuzlarında veya su jetleri ile soğutulur ve granüle olarak bilinen, tamamen kristalize olmamakla birlikte kısmen camsı bir yapıya sahip bir puzolandır(Pal *et al.* 2003).

Bir yapı malzemesi olarak betona talep günden güne artmakta; ancak bir diğer çevre sorunu olarak betonun hammadde olan çimentonun üretiminde çevre kirliliği artmakta ve hammadde olan kalker azalmaktadır. Normal Portland çimento için her bir ton üretiminde yaklaşık bir ton CO<sub>2</sub> ortaya çıkmaktadır (Davidovits, 1994)

Bu noktada hem yüksek fırın cürufunu değerlendirmek hem de çimentoya alternatif olarak tercih edilebilecek bir ürün olarak, çevresel açıdan sürdürülebilir inşaat ve yapı ürünleri sektöründe önemli bir unsur olma potansiyeline sahip yeni bir mühendislik malzemesi olarakgeopolimer malzemeler önerilebilir (ProvisandDeventer 2009) (Lloyd andRangan 2010) (Nget *al.* 2012). Bunun yanında çimentolu kompozitlerbirçok dış etkiye karşı yeterli dayanıklılık gösteremeyebilmektedir(Tanget *al.* 2015). Buna karşın geopolimerler, yüksek basınç dayanımının yanında(Chindapasirtet *al.* 2010) (Atişet *al.* 2015) sodyum sülfat ve magnezyum sülfat çözeltilerine karşı iyi performans (Bakharev, 2005); asit ataklarına (Bakharev, 2005b), yüksek sıcaklığa (Wang *et. al.* 2015) ve korozyona (Badaret *al.* 2014) karşı yüksek direnç göstermektedir.

İnorganik polimer(Bobiricäet *al.* 2015) veya zeolitprekürsörü (Pacheco-Torgalet *al.* 2014) olarak da adlandırılan geopolimerizasyon, katı alüminasilikatların ve alkali metal silikat çözeltilerin yüksek alkali ortamda ve düşük sıcaklıkta (<100 °C) yarı kristalize polimerik yapıda amorf, Si-O-Al ve Si-

O-Si bağlarından oluşur (Dimaset *al.* 2009). Geopolimerlerin reaksiyon mekanizması tam olarak anlaşılmış değildir. En çok önerilmiş mekanizmalar bir çözünme, taşıma veya yönelmenin yanı sıra tekrar tortulaştırma adımlarını içermektedir (SwanepoelandStrydom 2002).

Geopolimerizasyon sürecinde kullanılan en yaygın üç hammadde sınıfı; kalsine killer, cürufklar ve kömür uçucu külleridir (DuxsonandProvis 2008). Diğer bir deyişle birincil olarak jeolojik kökeni kaya formunda olan kaolin kili ve volkanik küller, ikincil olarak endüstriyel atık veya alt ürünlerden uçucu kül ve yüksek fırın cürufu geopolimer hammadde kaynağını oluşturmaktadır (HwangandHuynh 2015). Ağırıklık olarak metakaolin olmak üzere kalsine killer, nispeten geopolimer sentezinde yoğunlukla kullanılmalarına rağmen plakaya benzer parçacık şekillerinden dolayı beton üretiminde yüksek su talebi ve yüksek poroziteye sebebiyet verdiklerinden çok elverişli değildir. Hammaddenin diğer türleri (cüruf ve uçucu kül) iki parçalı geopolimer sentezi için daha kullanışlıdır (DuxsonandProvis 2008).

Uçucu külün geopolimerizasyon sürecinde ortaya çıkan dezavantajlarını bertaraf etmek amacıyla yüksek fırın cürufu ilave edilmektedir (Shi, 2004). Uçucu kül esaslı geopolimerler zengin kalsiyum içerikli yüksek fırın cürufu ile beraber üretildiklerinde geopolimerlerin basınç dayanımı ve priz süresi geliştirilebilir(Xuet *al.* 2014). Uçucu kül ve cüruf karışımlarında N-A-S-H ve C-A-S-H olmak üzere iki farklı jel oluşur(Bernalet *al.* 2013).

Literatürde yapılan çalışmalara bakıldığında Marjanović ve ark. (2015) uçucu kül ve yüksek fırın cürufunun farklı oranlarda binder olarak kullandıkları çalışmada alkali aktivasyonu sodyum silikat çözeltisi ile yapılmıştır. 95 °C ve 24 saat süre ile kür edilen numunelerde, çözelti farklı modül ve konsantrasyonlarda kullanılmıştır. Priz süresi, kuruma küçülmesi, mekanik ve fiziksel özellikler

dikkate alındığında en optimum karışım %25 uçucu kül -%75 yüksek fırın cürufu, aktivatör modülü 1.0 ve aktivatör konsantrasyonu %10 Na<sub>2</sub>O olarak belirlenmiştir. En yüksek basınç dayanımı ise %100 yüksek fırın cürufu içeren serilerde elde edilmiştir. Xu ve ark. (2014) uçucu kül esaslı geopolimer içerisinde granüle yüksek fırın cürufukullandıkları çalışmada hidrasyon ısısının yükseldiğini ancak basınç dayanımına ve priz süresine olumlu katkı yaptığını bulmuşlardır. Park ve Kim (2014) uçucu kül ve yüksek fırın cürufunun farklı oranlarda karıştırılarak hazırlanan geopolimer harçlarda yüksek pH'lı serilerde basınç dayanımının arttığını, karbonatlaşma derinliği arttıkça basınç dayanımının azaldığını göstermiştir. Çift binderli bir diğer çalışmada ise Rao ve Rao (2015) farklı molaritede alkali aktivatör kullanılarak ürettikleri pastalarda nihai priz süresinin azalmasıyla, basınç dayanımının arttığını, sodyum hidroksit molaritesinin sonuçları etkilemediğini belirlemiştir. Uçucu kül miktarı arttıkça priz süresi azalmakta, basınç dayanımı ise artmaktadır.

Cheng ve Chiu (2003) granüle yüksek fırın cürufunu kullandıkları çalışmada yangın dayanımı testi için 10 mm kalınlığındaki geopolimer panel 1100 °C alev tabi tutulmuş arka tarafa 35 dakika sonra 350 °C'den daha az bir sıcaklık geçmiştir.

Oh ve ark. (2010) Alkali aktive edilmiş granüle yüksek fırın cürufu ve uçucu kül temelli geopolimerde dayanım ve kristal fazın gelişimini inceledikleri çalışmada 80°C'de reaksiyon gerçekleştirilmiştir. NaOH ile aktive edilmiş olan serilerde en yüksek dayanım gelişimi granüle yüksek fırın cürufu serilerde gerçekleşirken SS ile aktive edilmiş granüle yüksek fırın cürufu serilerde dayanım çok düşük (2-3 MPa) seviyelerde iken, uçucu küllü serilerde ise 30 MPa mertebelerinde gerçekleşmiştir.

Wang ve Scrivener (1995) alkali aktive edilmiş hidrasyon ürünlerini araştırdıkları çalışmada elde

edilen sonuçlara göre; (i) ürün tepkimesi erken safhalarında çözünme ve çökme mekanizması oluşturur fakat daha sonra reaksiyon, katı halde bir mekanizma ile devam edebilir; (ii) kullanılan aktivatörden bağımsız olarak ana hidrasyon ürünü kristalizasyonun değişen derecesine ve düşük C/S oranı ile CSH'dır; (iii) hidrotalsit tipinin kristalize fazı hem NaOH hem de SS ile aktive edildiğinde oluşmaktadır. NaOH ve SS ile aktive edilen cüruf 20±2 °C'de nemli külden sonra 15 ay'a kadar veya 80 °C'de 14 gün için zeolit veya mika grubunun herhangi bir hidratı oluşmamıştır.

Richardson ve ark. (1994) yüksek fırın cürufu ve 5M KOH çözeltisi ile aktive edilerek üretilen pastalar üzerinde yaptıkları çalışmada hem kompozisyon hem de morfolojik olarak CSH jelleri belirlenmiştir; fakat bunlar oldukça kristalizedir. CSH ürünleri için zengin Mg ve AL içeriği ve Mg/Al ≈2.5 oranını içerir.

Deb ve ark. (2014) ortam sıcaklığında kür edilen geopolimer binderlerin dayanım geliştirme ve kür süresine etkilerini belirleme için F sınıfı uçucu kül ve öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu ile yaptıkları çalışmada aktivatör olarak NaOH ve SS farklı oranlarda kullanılmışlardır. YFC %0, 10 ve 20 oranlarında kullanılarak işlenebilirliği etkilemeden su azaltılmış ve dayanım arttırılmıştır.

Bagheri ve Nazari (2014) yüksek dayanımlı geopolimer üretiminde C sınıfı uçucu kül kullandıkları çalışmada agrega olarak granüle yüksek fırın cürufu kullanmış ve deney tasarımını Taguchi metodu ile belirlemişlerdir. Granüle yüksek fırın cürufunun eklenmesi özellikle erken yaşlarda yüksek mukavemet kazanılmasına katkı sağlamıştır. Agrega çevresi için gerekli pasta miktarını uygun bir şekilde azaltmıştır. Bundan dolayı zayıf ara yüzelerde, düşük güçlerde çatlak yayılması azalmıştır.

Literatürde yüksek fırın cürufu ile geopolimer üretiminin konu alındığı çalışmalarda genel olarak

öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufunun uçucu kül ve metakaolin gibi malzemeler ile çift binder şeklinde aktivasyon süreçleri ve sonuçları üzerine yoğunlaşmıştır. Bunun yanında yapılan çalışmalardageopolimerizasyon sürecinin hızlı bir şekilde gerçekleşmesi için 100 °C'nin altında olmak kaydıyla etüv kürünün uygulandığı görülmektedir. Çift binderli çalışmalarda yüksek fırın cürufu oranının artmasının dayanımı arttırdığı bilinmektedir. Granüle yüksek fırın cürufunun agrega olarak kullanıldığı çalışmalarda bulunmaktadır. Fakat çevre için ciddi bir sorun olan ve atıktan ziyade yan ürün olarak adlandırılan yüksek fırın cürufunun bir üründe kullanım miktarını arttırmak için bu çalışmada bağlayıcı olarak öğütülmüşü, agrega olarak granüle haldeki yüksek fırın cürufu kullanılarak geopolimer harcın herhangi bir etüv kürüne tabi tutulmadan, oda sıcaklığında ortam kürü uygulanarak üretilmesi hedeflenmiştir.

## 2. Materyal ve Metod

Termal kür yapılmadan granüle yüksek fırın cürufu (GYFC) ile geopolimer harç üretiminin gerçekleştirildiği bu çalışmada kullanılan GYFC Karadeniz Ereğli Demir Çelik Fabrikasından temin edilmiştir. Malzemenin kimyasal analizleri XRF (Rigaku ZSX Primus) ile gerçekleştirilmiştir. Bu malzemelerin mineralojik analizleri toz numuneler üzerinde XRD (Shimadzu-6000, Cu Ka, 1.544 Å) ile yapılmıştır. Öğütülmüş GYFC'nin partikül büyüklükleri ise lazer dağılımı yöntemi (Malvern Mastersizer-2000) ile belirlenmiştir. Harcın hazırlanmasında agrega olarak GYFC kullanılmıştır. Alkali aktivatör olarak NaOH ve 3 modül (SiO<sub>2</sub>/Na<sub>2</sub>O) sodyum silikat (SS) kullanılmıştır. NaOH ve SS çözeltilerinin özellikleri Tablo 1 göstermektedir.

Tablo 1. Alkali aktivatörlerin kimyasal özellikleri

Sodyum Silikat Çözeltisi (SS)	Sodyum Hidroksit Çözeltisi (NaOH)
Na <sub>2</sub> O: 7.5–8.5 %	9 M
SiO <sub>2</sub> : 25.5–28.5 %	M: 40 gr/mol

Yoğunluk (20 °C) 1.296-1.396 gr/ml  
Fe ≤ 0.005 %

NaOH ≥ 97.0%

### 2.1. Geopolimer harçların hazırlanması

Harçların hazırlanmasında 9M NaOH çözeltisi kullanılmıştır. Pelet halindeki NaOH planlanan oranda saf suda çözdürülerek hazırlanmış ve kullanılmadan önce 24 saat süre ile oda sıcaklığında beklemeye bırakılmıştır. Harcın hazırlanması sırasında öncelikle aktive edilecek bağlayıcılar olan öğütülmüş GYFC hobs mikserinde NaOH ve/veya SS çözeltisi ile 3 dakika boyunca karıştırılmıştır. Ardından karışıma agrega olarak GYFC ilave edilip 3 dakika daha karıştırılarak harcın hazırlanması tamamlanmıştır. Hazırlanan harca şekil vermek için 40 x 40 x 160 mm boyutlarındaki metal kalıp kullanılmıştır. Harcı kalıplara yerleştirmek için titreşim yöntemi kullanılmıştır. Kalıplara yerleştirilen numuneler daha sonra laboratuvar ortamında ortam sıcaklığında kür edilmiştir. Kalıplar 24 saat sonra sökülüştür. Hazırlanan karışımlardalikit/bağlayıcı(l/b) 1 ve 0.7 olarak iki farklı oranda seçilmiştir. NaOH/SS çözeltisi oranı olarak 1:2, 2:1, 3:0 ve 0:3 olmak üzere dört farklı aktivatör oranı belirlenmiştir. Geopolimer harç serileri adlandırılırken l/b oranına göre sınıflandırma yapıp farklı aktivatör oranları için de sıra sayısı kullanılmıştır. Örneğin l/b oranı 1 olan geopolimer harçlara "1GH" kodlaması yapılmıştır. Geopolimer harç örneklerinin hazırlanmasında kullanılan malzemeler ve karışım oranları Tablo 2 de gösterilmektedir.

Tablo 2. Geopolimer harçların karışım oranları

Seri No	l/b	GYFC (gr)	YFC (gr)	NaOH (ml)	SS (ml)	l/SS (%)
1GH-1	1	1350	450	150	300	67
1GH-2	1	1350	450	300	150	33
1GH-3	1	1350	450	450	0	0
1GH-4	1	1350	450	0	450	100
07GH-1	0.7	1350	450	105	210	67
07GH-2	0.7	1350	450	210	105	33
07GH-3	0.7	1350	450	315	0	0
07GH-4	0.7	1350	450	0	315	100

## 2.2. Fiziksel ve mekanik testler

Laboratuvar ortamında oda sıcaklığında kür edilengeopolimer harçlar 28. günden sonra fiziksel ve mekanik deneylere tabii tutulmuştur. Fiziksel deneyler için her bir gruptan üçer örnek kullanılmış ve bunların ortalaması alınmıştır. Mekanik deneylerden eğilme dayanımı deneyi için üç, basınç dayanımı deneyi için ise altı adet örnek kullanılarak ortalamaları alınmıştır. Geopolimer harçlar üzerinde yapılan mekanik deneyler TS EN 196-1 (2002)'ye uygun olarak gerçekleştirilmiştir.

Geopolimer harçların fiziksel özelliklerini belirlemek için Arşimet prensibinden faydalanılmıştır. TS EN 772-4 (2000)'e uygun olarak yapılan deney sayesinde harçların, görünür porozitesi, birim hacim ağırlığı ve görünür yoğunluğu hesaplanmıştır. TS EN 771-1 (2000) standardı kullanılarak da harç numunelerinin su emmesi belirlenmiştir.

Geopolimer harçlar üzerinde SEM ve EDX analizleri gerçekleştirilmiş ve LEO 1430 VP marka ve modelde elektron mikroskobu kullanılmıştır.

## 3. Bulgular

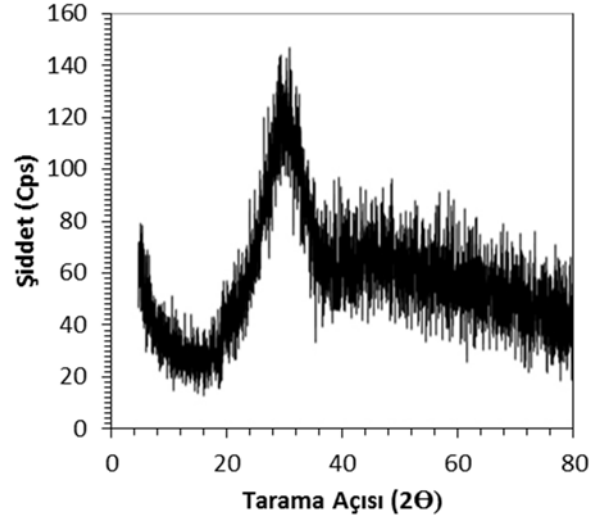
XRF analizi sonuçlarına göre GYFC'nin kimyasal kompozisyonları Tablo 3'de verilmiştir. Bu verilere göre GYFC'nin SiO<sub>2</sub> değeri %35.60, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> değeri %11.70, CaO değeri ise %39.80'dir. GYFC'nin kütlece SiO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> oranı 3.04'dür. GYFC'nin yoğunluğu 2.86 gr/cm<sup>3</sup>, özgül yüzeyi ise 4521 cm<sup>2</sup>/gr'dir. Lazer tane boyut analizinden elde edilen verilere göre GYFC; %10'u 1.9µm, %50'si 10.5 µm ve %90'ı ise 41.3 µm'den daha küçük tane boyutuna sahiptir.

Tablo 3. GYFC'nin kimyasal kompozisyonu

Oksit (%)	YFC
SiO <sub>2</sub>	35.6
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	11.7
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.88
MgO	5.23
Na <sub>2</sub> O	0.41
K <sub>2</sub> O	1.21

SO <sub>3</sub>	2.16
CaO	39.8
Toplam	96.99

Şekil 1'de GYFC'nin XRD analizi sonucu elde edilen pik değerleri ve ana malzeme fazları verilmiştir. Difraktogram incelendiğinde GYFC'nin amorf yapıda olduğu, camı fazın 2θ=20°-38° arasında en büyük değere ulaştığı görülmektedir.

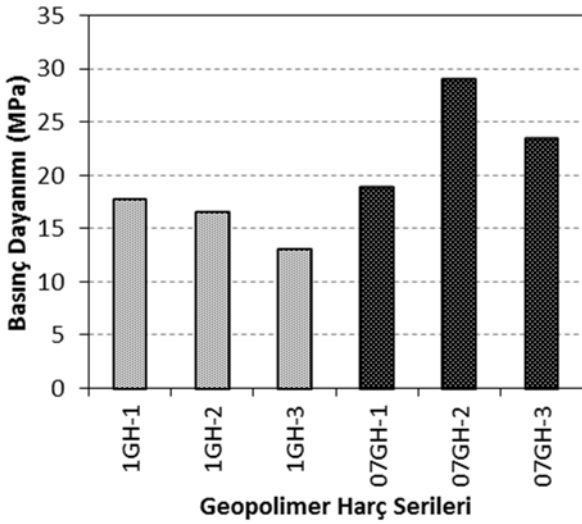


Şekil 1. GYFC'nin X-ışınları difraktogramı

iki farklı l/b oranı ile hazırlanan harçlarda, %67 SS ve %33 NaOH, %33 SS ve %67 NaOH, %100 NaOH ve %100 SS olmak üzere dört farklı konsantrasyonda aktivatör kullanılmıştır. Bu karışımlarla elde edilen harç numunelerinden %100 SS kullanılarak üretilen harç numunelerin hem l/b oranı 1 hem de 0.7 olan serilerde kalıplardan düzgün bir şekilde çıkartılamamıştır. l/b oranı 1 olan seride 7 gün geçmesine karşın harç prizini kazanamamıştır. l/b oranının 0.7 olduğu serilerde ise 7 günün sonunda harç örnekleri prizini almıştır fakat uzun süre kalıp içinde kaldıklarından dolayı numuneler düzgün bir şekilde çıkarılamamıştır. %100 SS'in bu etkisinden dolayı fiziksel ve mekanik deneylerde 1GH-4 ve 07GH-4 serilerine yer verilememiştir.

### 3.1. Geopolimer harçların mekanik test bulguları

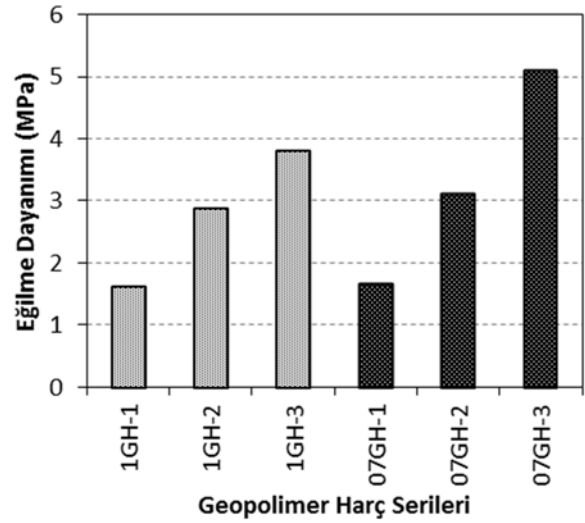
Öğütülmüş GYFC bağlayıcı ve GYFC agrega ile üretilmiş harçların basınç dayanım değerleri Şekil 2’de verilmiştir. l/b oranı azaldıkça basınç dayanımı artış göstermektedir. l/b oranı 1 olan serilerde NaOH miktarı arttıkça rölatif olarak dayanım azalması görülmekte olup ortalama basınç dayanımı 15.8 MPadır. l/b oranı 0.7 olan serilerde ise NaOH miktarı arttıkça dayanım artışı gözlenmiş fakat optimumaktivatör konsantrasyonu olarak %67NaOH ve %33 SS belirlenmiştir ve ortalama 23.9 MPa basınç dayanımı hesaplanmıştır. En yüksek basınç dayanımı 07GH-2 serisinde 29.1MPa, en düşük basınç dayanımı ise 1GH-3 serisinde 13.1 MPa olmuştur.



Şekil 2. Geopolimer harçların basınç dayanımı

Üretilen geopolimer harçların eğilme dayanımları Şekil 3’de verilmiştir. Bu grafikten görüldüğü gibi eğilme dayanımlarındaki değişimin sebebi l/b oranından ziyade aktivatörkonsantrasyonundan ötürüdür. Buna göre NaOH miktarı arttıkça eğilme dayanımları da artış göstermektedir. %67 SS - %33 NaOH konsantrasyonlu serilerde ortalama 1.6MPa eğilme dayanımı oluşurken; %33 SS - %67 NaOH konsantrasyonlu serilerde ortalama 3.0 MPa; %100 NaOH konsantrasyonu serilerde ise ortalama 4.5 MPa değeri görülmektedir. Tüm seriler dikkate alındığında en düşük eğilme dayanımı 1.6MPa değeri ile 1GH-1 serisine ait iken en yüksek eğilme

dayanımı ise 5.1 MPa değeri ile 07GH-3 serisine aittir.

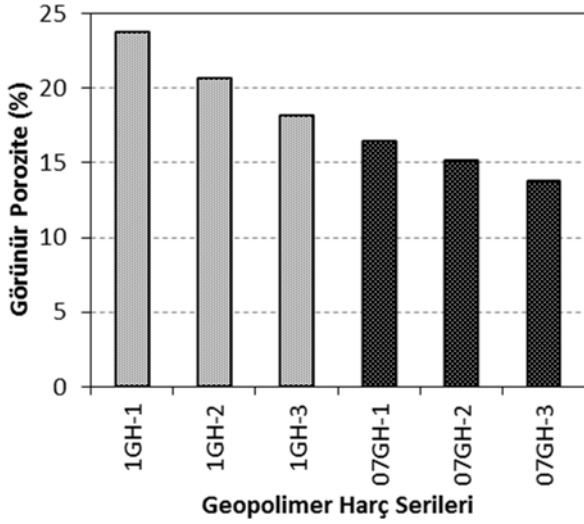


Şekil 3. Geopolimer harçların eğilme dayanımı

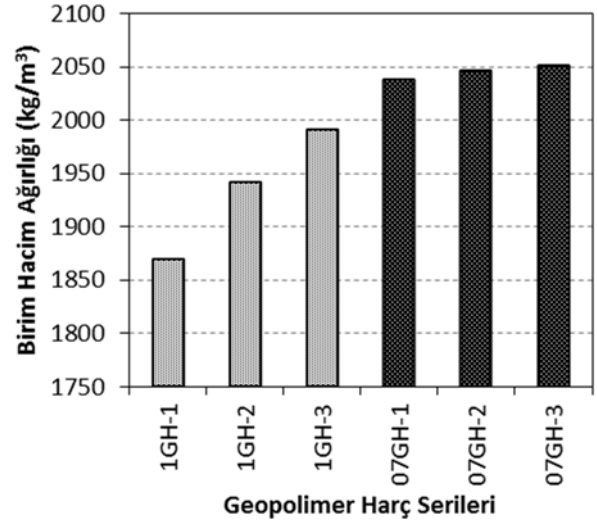
### 3.2. Geopolimer harçların fiziksel test bulguları

Yapılan deneyler sonucunda belirlenen görünür porozite değerleri Şekil 4’de verilmiştir. Görünür porozite değerlerinin değişiminde l/b oranı ve aktivatörkonsantrasyonu bir arada etkin olmuştur. l/b oranının 1 olduğu serilerde görünürporozite değerleri 0.7 olan serile göre daha yüksektir. Bu seriler içerisinde de NaOHkonsantrasyonu arttıkça görünür porozite miktarı da azalmaktadır. Buna göre en yüksek görünür porozite değeri %23.7 ile 1GH-1 serisinde; en düşük görünür porozite ise % 13.8 ile 07GH-3 serisinde belirlenmiştir.

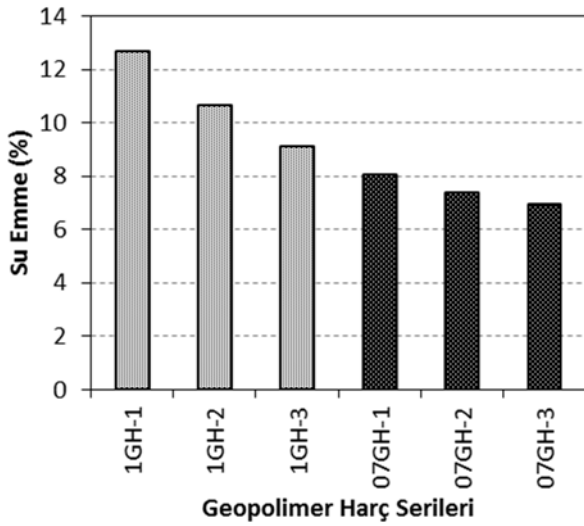
Geopolimer harçlara ait su emme değerleri Şekil 5’de verilmiştir. Genel itibari ile görünür porozite değerleri ile su emme değerleri benzerlik göstermektedir. Bu çalışmada da su emme değerlerindeki değişim görünür porozitedeki değişimler ile benzerdir. En yüksek su emmeyi %12.7 oranla 1GH-1; en düşük su emmeyi ise %7.0 ile 07GH-3 serisi göstermiştir.



Şekil 4. Geopolimer harçların görünür porozitesi



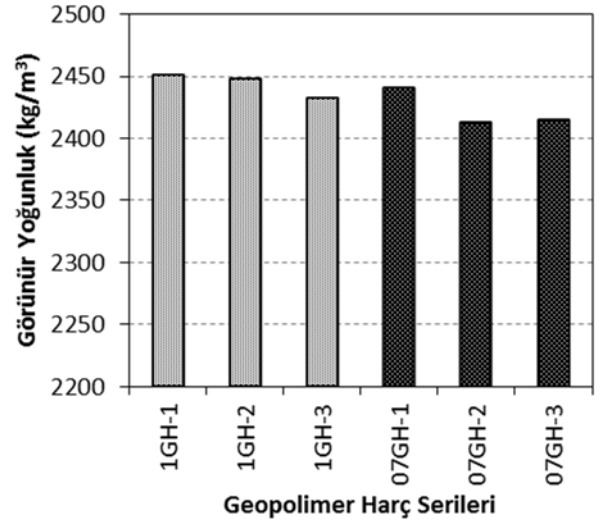
Şekil 6. Geopolimer harçların birim hacim ağırlığı



Şekil 5. Geopolimer harçların su emmesi

Şekil 6'da verilen geopolimer harçlara ait birim hacim ağırlıkları incelendiğinde su emme ve görünür porozitedeki değişimin tersi görülmektedir. Bunun yanın l/b oranın 1 olduğu serilerde aktivatör konsantrasyonunun etkisi gözlenirken; l/b oranının 0.7 olduğu serilerde bariz bir değişim görülmemektedir. l/b oranının 0.7 olduğu serilerde ortalama birim hacim ağırlığı 2046.1 kg/m<sup>3</sup> dür. En düşük birim hacim ağırlığı 1869.0 kg/m<sup>3</sup> değeri ile 1GM-1 serisine aittir.

Fiziksel özelliklerin sonucusu olarak verilen görünür porozitenin değerleri Şekil 7'dedir. Seriler arasında görünür yoğunluk değerlerinde çok büyük bir farklılık yoktur. l/b açısından bakıldığında bir nebze 0.7 olan serilerin görünür yoğunluğu daha azdır. Tüm seriler dikkate alındığında ortalama 2433.5 kg/m<sup>3</sup> 'lük bir görünür yoğunluk değeri vardır.

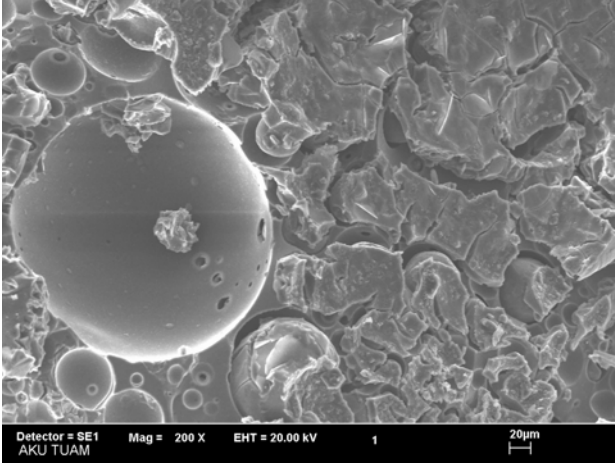


Şekil 7. Geopolimer harçların görünür yoğunluğu

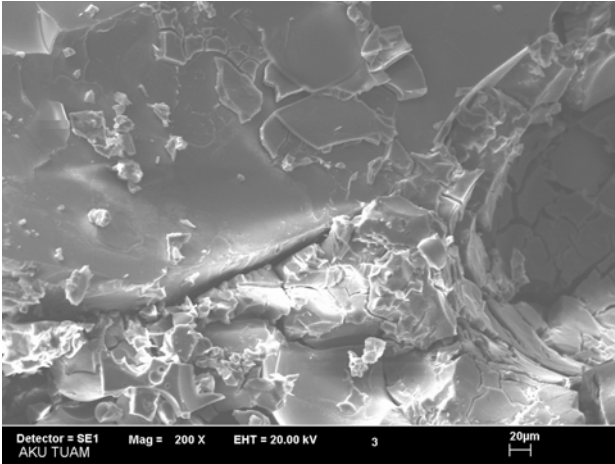
### 3.3. Geopolimer harçların SEM ve EDX analizleri

Geopolimer harç örneklerinden alınan numunelerin mikro yapısı hakkında bilgi edinmek için yapılan

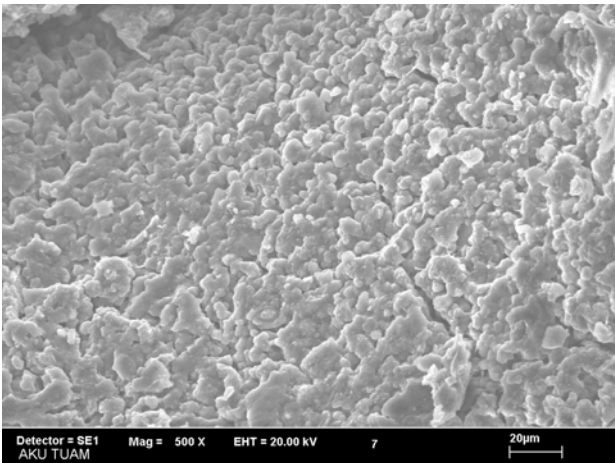
SEM analizinin görüntüleri Şekil 9-14 arasında verilmiştir.



Şekil 9. 1GH-1 Serisinden x200 SEM görüntüsü

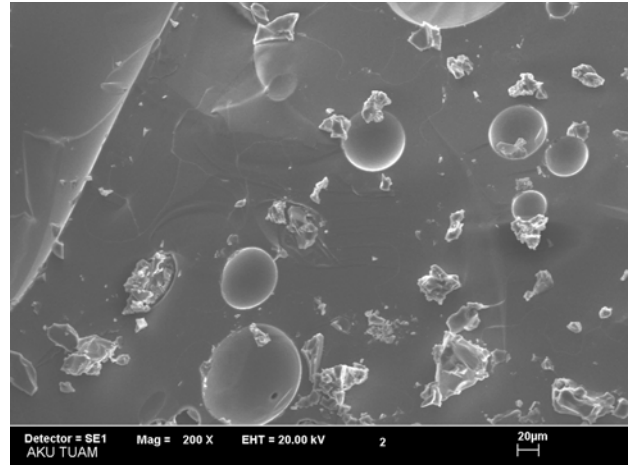


Şekil 10. 1GH-2 Serisinden x200 SEM görüntüsü

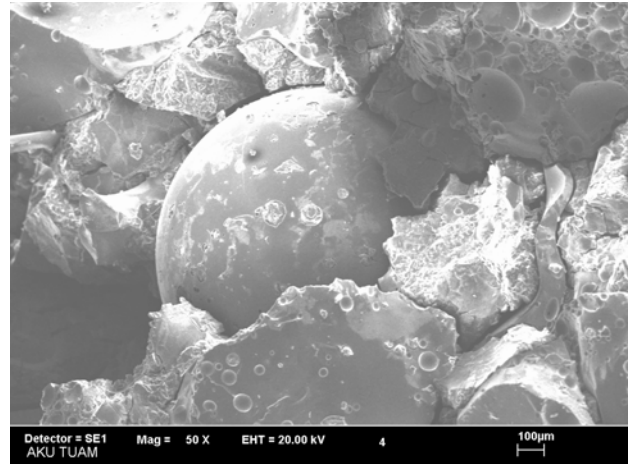


Şekil 11. 1GH-3 Serisinden x500 SEM görüntüsü

Harç numuneleri hazırlanırken bağlayıcı ve agrega özellikleri değişmemiş sadece l/b oranı ve alkali aktivatör içeriği değiştirilmiştir. Buna göre oluşan iç yapının formunda alkali aktivatörün etkileri incelenebilir. Şekil 9 ve 12’de %33 NaOH-%67 SS içerikli harçlarda içi boş kürecik yapılar görülmektedir. Bunun yanında likit miktarı fazla olan 1GH-1’de tabakalanma görülürken 07GH-1’de bu durum söz konusu değildir. Aktivatör çözeltilerindeki SS miktarını azalması ile C-S-H jel oluşumları daha belirgin orta çıkmakta ve kristal yapı elemanların etrafını kaplamaktadır.

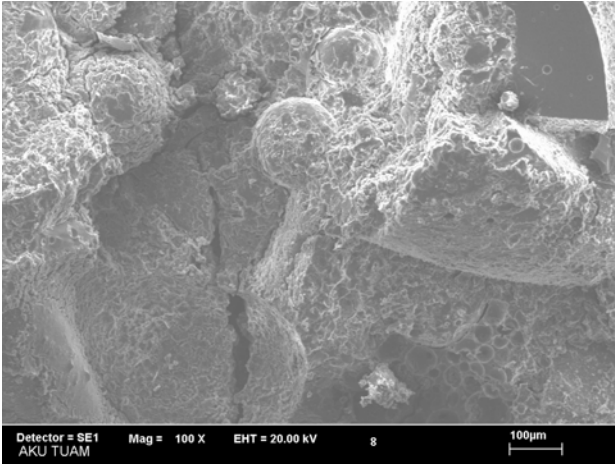


Şekil 12. 07GH-1 Serisinden x200 SEM görüntüsü



Şekil 13. 07GH-2 Serisinden x50 SEM görüntüsü





Şekil 14. 07GH-3 Serisinden x100 SEM görüntüsü

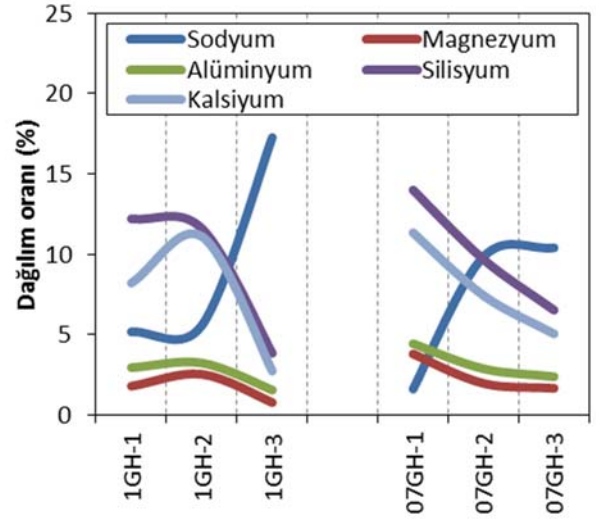
EDX ile harç örnekleri üzerinde alan taraması yapılarak elde edilen sonuçlar tüm seriler için bir arada Tablo 4 de verilmiştir. Aynı elementlerin oksitleri ile birlikte dağılım oranları da Tablo 5 de gösterilmektedir. Bu tablolara göre harç bünyesinde en çok bulunan beş element silisyum, sodyum, magnezyum, alüminyum ve kalsiyumdur.

Tablo 4. EDX analizi element dağılımı

Element (%)	1GH			07GH		
	1	2	3	1	2	3
Sodyum	5.17	5.57	17.26	1.61	9.85	10.40
Magnezyum	1.79	2.53	0.77	3.79	1.96	1.66
Alüminyum	2.94	3.23	1.55	4.43	2.87	2.38
Silisyum	12.21	11.61	3.84	14.00	9.68	6.52
Sülfür	0.25	0.18	0.16	0.52	0.20	0.24
Potasyum	0.37	0.44		0.32	0.25	0.22
Kalsiyum	8.21	11.11	2.73	11.34	7.43	5.05
Mangan		0.86		0.58		
Oksijen	69.06	64.47	73.68	63.41	67.74	73.54

Tablo 5. EDX analizi elementlerin oksitleri ile dağılımı

Oksitli (%)	1GH			07GH		
	1	2	3	1	2	3
Na <sub>2</sub> O	10.12	9.52	51.92	2.57	20	27.11
Mg	2.74	3.39	1.83	4.75	3.13	3.40
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	9.46	9.07	7.67	11.62	9.60	10.20
SiO <sub>2</sub>	46.30	38.42	22.42	43.31	38.12	32.95
SO <sub>3</sub>	1.24	0.80	1.28	2.13	1.07	1.64
K <sub>2</sub> O	1.09	1.14		0.76	0.78	0.88
CaO	29.05	34.32	14.88	32.73	27.31	23.82
MnO		3.35		2.13		



Şekil 15. Harç örneklerinde EDX element dağılımı

Harç bünyesinde en çok bulunan bu beş elementin harç serilerine göre dağılımı Şekil15 de görülmektedir. Aktivatör oranlarının değişimi direk kimyasal kompozisyona ve element oranlarına etkimektedir. NaOH miktarının artması ve SS miktarının azalmasıyla başlangıçta rölatif olarak fazla olan silisyum, magnezyum, alüminyum ve kalsiyum giderek azalmıştır ve sadece sodyum artış göstermiştir. Bu değişim l/b oranı 0.7 olan serilerde daha belirgin ve lineer bir şekilde görülmektedir.

#### 4. Tartışma ve Sonuç

Bu çalışmada demir çelik üretim sürecinde ortaya çıkan ve çevre açısından dikkate alınması gereken bir yan ürün olan yüksek fırın cürufunun hem öğütülerek bağlayıcı hem de granüle halde agrega olarak tek bir ham maddenin yapı malzemesi olarak kullanılması ilk hedef olarak belirlenmiştir. İkinci hedef ise hem uygulanması meşakkatli olabilecek hem de enerji ihtiyacını arttıracak etüv küründen kaçınarak elde edilecek sonuçların incelenmesidir.

Bu sayede GYFC'nin öğütülmesinden başka hiçbir enerji kullanılmadan geopolimer harç üretimi gerçekleştirilebilmiştir.

Likit olarak sadece SS'inaktivatörolarak kullanılması ile bu kompozisyon için harç üretimi mümkün

olmamıştır. Tek başına SS'in kullanılması işlenebilirliği azaltmış ve priz süresi çok fazla uzamıştır. Benzer bir durum olarak Oh ve ark. (2010) yaptıkları çalışmada sadece SS'li örneklerde yüksek ve düşük dayanım örnekler arasındaki kimyasal kompozisyondaki ana farklılığın ham maddedeki kalsiyum içeriği olduğunu belirtmişlerdir. NaOH yokluğunda, SS'in kullanılması açıkça göstermiştir ki Ca fazla olduğunda işlenebilirlik hızlı bir şekilde azalmakta ve basınç dayanımının da büyük bir oranda azalmasına sebebiyet vermektedir. NaOH'un varlığında, SS ilavesi işlenebilirliği arttırmıştır ve kalsiyumca zengin örneklerde basınç dayanımı artmıştır.

Kalsiyum içeriğinin yanı sıra mekanik direnci etkileyen başlıca faktörlerden biri de (Na+K) ile Al karışımındaki Al'nin ve (Na+K)'nin molar oranıdır. Mg mevcut olduğunda alkali aktivite edilmiş cürufun ana ürününün CSH ve hidratetalsit olduğu bilinmektedir. Hidratetalsit sıklıkla alkali aktive edilmiş zengin Ca içerikli cüruflarda görülmektedir. (Schillinget al. 1994) (WangandScrivener 1995) (Richardsonet al. 1994).

GYFC geopolimer harçların aktivasyonunda NaOH içerikli çözeltilerin kullanılması dayanım açısından gereklidir. Bu çalışmada basınç dayanımı açısından 2:1NaOH-SS oranı; eğilme dayanımı açısından 3:0 ideal NaOH-SS oranı olarak belirlenmiştir. Bunun sebebi olarak AFm (mono sülfat) tipi kristal faz sadece NaOH ile aktive edilmiş cürufta oluşması gösterilebilir. (WangandScrivener 1995).

Bu çalışma için ideal l/b oranı olarak 0.7 belirlenmiştir. En yüksek basınç dayanımı 07GH-2 serisinde 29.1MPa; en yüksek eğilme dayanımı 07GH-3 serisinde 5.1 MPaolarak elde edilmiştir.

#### **Teşekkür**

Bu çalışma gerçekleştirilirken TÜBİTAK 213M294'nolu projenin imkanlarından da faydalanılmıştır. Çalışmanın

ortaya çıkmasında destek sağlayan Yrd.Doç.Dr. Gökhan Görhan, Büşra Bayezit ve Elif Işık'a teşekkürler.

#### **Kaynaklar**

- Atiş, C.D., Görür, E.B., Karahan, O., Bilim, C., İlkentapar, S.andLuga, E., 2015. Veryhighstrength (120 MPa) class F flyashgeopolymermortaractivated at differentNaOHamountheatcuringtemperatureandheatcuringduration. *Construction andBuildingMaterials*, **96**, 673–678.
- Badar, M. S.,Kupwade-Patil, K., Bernal, S. A., Provis, J. L. andAllouche, E.N., 2014. Corrosion of steelbarsinducedbyacceleratedcarbonation in lowandhighcalciumflyashgeopolymerconcretes. *Construction andBuildingMaterials*, **61**, 79–89.
- Bagheri, A. and Nazari, A., 2014. Compressivestrength of highstrengthclass C flyash-basedgeopolymerswithreactivegranulatedblastfurnaceslagaggregatesdesignedbyTaguchimethod. *Material sand Design*, **54**, 483–490.
- Bakharev, T., 2005. Durability of geopolymermaterials in sodiumandmagnesiumsulfatesolutions. *CementandConcreteResearch*, **35**:6, 1233-1246.
- Bakharev T., 2005b. Resistance of geopolymermaterialstoacidattack. *CementandConcreteResearch*, **35**:4, 658-670.
- Bernal, S. A.,Provis, J.L., Walkley, B., Nicolas, R.S., Gehmanc, J.D., Brice, D.G., Kilcullen, A.R., Duxson, P.andVan Deventer, J.S.J., 2013. Gel nanostructure in alkali-activatedbindersbased on slagandflyash, andeffects of acceleratedcarbonation. *CementandConcreteResearch*, **53**, 127–144.
- Bobirică, C.,Shim, J., Pyeon J. and Park, J., 2015. Influence of wasteglass on themicrostructureandstrength of inorganicpolymers. *Ceramics International*, **41**, 13638–13649.
- Cheng T.W. andChiu J.P., 2003. Fire-resistantgeopolymerproducedbygranulatedblastfurnaceslag, *MineralsEngineering*, **16**, 205–210.
- Chindapasirt, P.,Chareerat, T., Hatanaka S. andCao T., 2010. High-Strengthgeopolymerusingfinehigh-calciumflyash, *Journal Of MaterialsIn Civil Engineering*, **23**:3, 264-270.

- Davidovits, J., 1994. Globalwarming impact on the cement and aggregates industries. *World Resource Review*, **6**, 263.
- Deb, S.P., Nath P., Sarker, P.K., 2014. The effects of ground granulated blast-furnace slag blending with fly ash and activator content on the workability and strength properties of geopolymer concrete cured at ambient temperature, *Materials and Design*, **62**, 32–39.
- Dimas, D., Giannopoulou, I. and Panias, D., 2009. Polymerization in sodium silicate solutions: a fundamental process in geopolymerization technology, *J. Mater. Sci.*, **44**, 3719–3730.
- Duxson, P. and Provis, J. L., 2008. Designing precursors for geopolymer cements, *J. Am. Ceram. Soc.*, **91**:12, 3864–3869.
- Hwang C. and Huynh T., 2015. Effect of alkali-activator and rice husk ash content on strength development of fly ash and residual rice husk ash-based geopolymers, *Construction and Building Materials*, **101**, 1–9.
- Lloyd N.A. and Rangan B.V., 2010. Geopolymer concrete with fly ash. *2nd International Conference on Sustainable Construction Materials and Technologies*, 1493–1504.
- Marjanović, N., Komljenović, K., Baščarević, Z., Nikolić, V. and Petrović, R., 2015. Physical–mechanical and microstructural properties of alkali-activated fly ash–blast furnace slag blends. *Ceramics International*, **41**, 1421–1435.
- Ng T.S., Voo Y.L. and Foster S.J., 2012. Sustainability with ultra-high-performance and geopolymer concrete construction, innovative materials and techniques in concrete construction. M.N. Fardis (Ed.), ACES Workshop, Springer, Dordrecht, 81–100.
- Oh, J.E., Monteiro, P.J.M., Jun, S.S, Choi, S. and Clark, S.M., 2010. The evolution of strength and crystalline phases for alkali-activated ground blast furnace slag and fly ash-based geopolymers. *Cement and Concrete Research*, **40**, 189–196.
- Öcal Y., 2014. Demir Çelik Sektöründe Atık Yönetimi. Uzmanlık Tezi, TC Kalkınma Bakanlığı, Ankara, 176.
- Pacheco-Torgal, F., Labrincha, J., Leonelli, C., Palomo, A., and Chindaprasit, P. (Eds.), 2014. Handbook of alkali-activated cements, mortars and concretes. Elsevier, 777–805.
- Pal, S.C., Mukherjee and A., Pathak, S.R., 2003. Investigation of hydraulic activity of ground granulated blast furnace slag in concrete. *Cement and Concrete Research*, **33**, 1481–1486.
- Park, J. and Kim, Y., 2014. Improvement in mechanical properties by supercritical carbonation of non-cement mortar using fly ash and blast furnace slag. *International Journal Of Precision Engineering And Manufacturing*, **15**: 6, 1229–1234.
- Provis, J.L. and Van Deventer J.S.J., 2009. Geopolymers: structures, processing, properties, and industrial applications. Woodhead Publishing Limited, 15–136.
- Rao, G. M., and Rao, T. G., 2015. Final setting time and compressive strength of fly ash and ggbs-based geopolymer paste and mortar. *Arabian Journal for Science and Engineering*, **40**:11, 3067–3074.
- Richardson, I.G., Brough, A.R., Groves, G.W., Dobson, C.M., 1994. The characterization of hardened alkali-activated blast-furnace slag pastes and the nature of the calcium silicate hydrate (C-S-H) phase. *Cement and Concrete Research*, **24**: 5, 813–829.
- Schilling, P.J., Roy, A., Eaton, H.C., Malone P.G. and Brabston, N.W., 1994. Microstructure, strength, and reaction products of ground granulated blast-furnace slag activated by highly concentrated NaOH solution, *Journal of Materials Research*, **9**, 188–197.
- Shi, C., 2004. Steel slag—its production, processing, characteristics, and cementitious properties. *J Mater Civ Eng*, **16**, 230–236.
- Swanepoel, J. C. and Strydom, C. A., 2002. Utilisation of fly ash in a geopolymeric material, *Applied Geochemistry*, **17**, 1143–1148.
- Şahin İ., 2015. Demir Çelik Sektörü. İktisadi Araştırmalar Bölümü, Türkiye İş Bankası.

Tang, S.W., Yao, Y., Andrade, C. and Li, Z.J., 2015. Recent durability studies on concrete structure. *Cement and Concrete Research*, **78**, 143–154.

TS EN 196-1. 2002. Çimento Deney Metotları Bölüm 1: Dayanım.

TS EN 771-1. 2005. Kâgir Birimler, Özellikler- Bölüm 1: Kil kâgir birimler (Tuğlalar).

TS EN 772-4., 2000. Kâgir Birimler, deney metotları Bölüm 4: Tabii taşkâgir birimlerin toplam ve görünen porozitesi ile boşluksuz ve boşluklu birim hacim kütlelerinin tayini.

Wang S. and Scrivener, K.L., 1995. Hydration products of alkali activated slag cement. *Cement and Concrete Research*, **25**: 3, 561–571.

Wang, K., He, H., Song, X. and Cui, X., 2015. Effects of the metakaolin-based geopolimer on high-temperature performances of geopolimer/PVC composite materials. *Applied Clay Science*, **114**, 586–592.

Xu, H., Gong, W., Syltebo, L., Izzo, K., Lutze, W. and Pegg, I., L., 2014. Effect of blast furnace slag grades on flyash based geopolimer waste forms. *Fuel*, **133**, 332–340.