Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi

Afyon Kocatepe University Journal of Science and Engineering

AKÜ FEMÜBİD **20** (2020) 015601 (83-89) AKU J. Sci. Eng. **20** (2020) 015601 (83-89)

DOI: 10.35414/akufemubid.591117

Araştırma Makalesi / Research Article

Geopolimer Harç Özelliklerine Metakaolin Kalsinasyon Sıcaklığının Etkisi

Gökhan GÖRHAN

Afyon Kocatepe Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Afyonkarahisar.

e-posta: ggorhan@aku.edu.tr ORCID ID: http://orcid.org/0000-0002-9925-1568

Geliş Tarihi: 12.07.2019 Kabul Tarihi: 05.02.2020

Öz

Yapılan bu çalışmada kaolin kili farklı sıcaklıklarda metakaoline dönüştürülmüş ve ardından bu malzemeler kullanılarak metakaolin esaslı geopolimer harç örnekleri üretilmiştir. Elde edilen bulgulara göre farklı sıcaklıklarda kalsine edilen metakaolin malzemesinin örnek özelliklerinde gösterdiği değişimler incelenmiştir. Metakaolin esaslı geopolimer harçların hazırlanmasında alkali aktifleştirici olarak 9M konsantrasyonlu NaOH çözeltisi ve sodyum silikat solüsyonu kullanılmıştır. Harçlar, 40 mm x 40 mm x 160 mm metal kalıplarda vibrasyon yöntemiyle şekillendirilmiştir. Ardından numuneler termal kür prosesinin gerçekleştirilmesi için laboratuvar tipi etüve yerleştirilmiş ve 24 saat süre ile 90 °C'de kür edilmiştir. Sonuç olarak, tüm örnek grupları içerisinde en yüksek basınç dayanım değeri 700 °C'de kalsine edilen metakaolin esaslı geopolimer harçlarda 59.7 MPa olarak elde edilirken, en düşük basınç dayanım değeri 27.8 MPa ile 900 °C'de elde edilen metakaolin esaslı geopolimer harçlarda elde edilmiştir. Bununla birlikte metakaolin kalsinasyon sıcaklığının basınç dayanım değerleri üzerinde etkisinin net olmadığı ve nispeten daha yüksek kalsinasyon sıcaklıklarında, metakaolin malzemesinin amorf yapısının bozulması nedeniyle basınç dayanım değerlerinin belirgin bir şekilde azaldığı belirlenmiştir.

Anahtar kelimeler
Metakaolin; Harç; Geopolimer; Kalsinasyon.

Effect of Calcination Temperature of Metakaolin on the Properties of Geopolymer Mortar

Abstract

In this study, the kaolin clay was transformed into metakaolin at different temperatures and then metakaolin based geopolymer mortar samples were produced. According to the findings, the changes in sample properties because of metakaolin material calcined at different temperatures were investigated. 9M NaOH solution and sodium silicate solution were used as alkali activator in preparation of metakaolin based geopolymer mortars. The mortars are shaped by vibration method in 40 mm x 40 mm x 160 mm metal moulds. Then, the samples were placed in the oven for the thermal curing process and the samples were cured at 90 °C for 24 hours. As a result, the maximum compressive strength value in all sample groups was obtained as 59.7 MPa in the metakaolin-based geopolymer mortar obtained by calcined at 700 °C, while the lowest compressive strength value was obtained in the metakaolin-based geopolymer mortar obtained at 27.8 MPa and 900 °C. However, the effect of the calcination temperature of metakaolin on the compressive strength values is not clear, and at relatively higher calcination temperatures, the compressive strength values are markedly reduced due to the deterioration of the amorphous structure of the metakaolin material.

Keywords
Metakaolin; Mortar; Geopolymer, Calcination.

© Afyon Kocatepe Üniversitesi

1. Giriş

Geopolimerler yüksek yoğunluklu alkali hidroksit yada silikat solüsyonlu katı alüminosilikat kaynaklarının polimerik reaksiyonları olan üç boyutlu inorganik polimerler olarak düşünülebilir. Kaolinit, uçucu kül ve yüksek fırın cürufu gibi farklı alüminosilikat kaynakları geopolimer sentezlenmesinde kullanılabilir (Özer and Soyer-Uzun 2015). Çünkü geopolimer malzemelerin basınç dayanımları temelde kaynak malzemelerin

seçimine, molar oranlarına ve uygulanan kür yöntemine göre değişmektedir. Genelde geopolimerizasyon, kaynak malzemeler ile alkali aktivatörlerin ısısal kür şartları altında gerçekleşmektedir (Kumar and Revathi 2016). Geopolimerlerin atomik yapısı ve mekanik özellikleri sentezleme ve kür şartları kadar geopolimerizasyonda kullanılan ham maddeye önemli derecede bağımlıdır (Özer ve Soyer-Uzun 2015). Aynı zamanda geopolimerik ürünler sıra ile oksijen paylaşan AlO_4 ve SiO_4 tetrahedral zincirli üç boyutlu Si-Al ağından oluşmaktadır (Villa *et al.* 2010).

Geopolimerik sistemlerdeki çözünme ve jel oluşum reaksiyonlarını tetikleyen kimyasal mekanizmalar net olarak bilinmemekle birlikte, uçucu kül ve kil gibi malzemelerin kullanılması durumunda, nihai sertleştirilmiş yapı oluşmadan önce başlangıç malzemelerinin çözülmesinin tamamlanmadığı düşünülmektedir. Hatta çoğu durumda, partikül yüzeylerinde bulunan sadece küçük miktarlarda silika ve alüminanın, karışımın bütününün katılaşması için reaksiyona dahil olması gereklidir. Bu nedenle, genel olarak çözünmemiş atık partikülün nihai geopolimerik yapıya bağlanmasından bir yüzey reaksiyonunun sorumlu olduğu düşünülmektedir (van Jaarsveld *et al.* 2002).

Geopolimer malzeme üretiminde kullanılan malzemelerden biri olan metakaolin, özellikle yüksek performanslı harçlarda kullanılabilen puzolanik bir malzemedir. Bununla birlikte alkali aktifleştirilmiş metakaolin esaslı geopolimerlerin portland çimentolu betonlardan daha yüksek dayanımlı oldukları belirtilmektedir (Kumar and Revathi 2016).

Metakaolin, 700 – 1000 ^oC sıcaklık aralıklarında kaolin mineralinin dehidroksilasyonu sonucu oluşan geleneksel bir malzemedir (Kaya and Soyer-Uzun 2016). 700 ^oC'den itibaren kaolinin maruz kaldığı termal işlem, iç suyun kaybı ve dehidroksilasyonu ile kristal kaolinin amorf metakaoline dönüşümü ile sonuçlanır (Özer and Soyer-Uzun 2015). Kaolinit termal olarak dehidroksilasyona uğradığında, alkali ortamda çözünür ve bu çözünme geopolimerizasyon için metakaolini ideal bir hammadde haline getirir (Kaya and Soyer-Uzun 2016). Bu nedenle geopolimer malzeme üretiminde metakaolin malzemesinin kullanılma nedenlerinin arasında bu malzemenin homojen bir yapıya sahip olması ve büyük miktarlarda elde edilebilen endüstriyel bir mineral olması sayılabilir (Rovnanik 2010).

Son çalışmalarda geopolimerizasyonda uçucu kül, pirinç kabuğu külü ve kırmızı çamur gibi endüstriyel atıklar ile metakaolinin sıkça kullanıldığı görülmüştür (Özer and Soyer-Uzun 2015). Hatta metakaolin geopolimeri esaslı betonların normal portland çimentolu betonlara göre daha yüksek basınç dayanımlarına sahip oldukları belirlenmiştir (Marin-Lopez *et al.* 2009).

Kaoline uygulanan kalsinasyon sıcaklıkları geopolimer malzemeler üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu düşünüldüğünden uygulanan kalsinasyon prosesinin önemli olduğu aşikârdır. Dolayısıyla farklı sıcaklıkların uygulandığı bir dizi çalışma incelendiğinde; 650 ve 750 ^oC'de ısıl işleme maruz kalan kaolinlerin kullanıldığı metakaolin esaslı geopolimerler ile ilgili çalışmalar yapılmıştır (Pacheco-Torgal *et al.* 2011, Kong *et al.* 2007). Kaolin malzemesinin 750 ^oC'de kalsine edilmesi ile elde edilen metakaolin ve uçucu külün beraber kullanıldığı çalışmada ilgili örnekler 24 saat süre ile 80 ^oC'de kür edilmiştir. Metakaolin esaslı geopolimer pastaların üç günlük dayanım değerlerinin ise 38.5 MPa olduğu tespit edilmiştir (Kong *et al.* 2007). Bunun yanında Elimbi ve ark. (Elimbi *et al.* 2011) 450 – 800 °C'de 10 saat, Cioffi ve ark. (Cioffi *et al.* 2003) 500 - 750 °C'de 2 ve 6 saat; Zibouche ve ark. (Zibouche *et al.* 2009) ise 800 °C'de 2 saat kaolini kalsine ederek metakaolin elde etmişlerdir.

Kaolin kalsinasyonu sürecinde metakaoline dönüşüm sırasında yüksek hızda kalsinasyonun daha düzensiz bir metakaolin oluşumuna sebebiyet verebileceği belirtilmektedir (Castelein *et al.* 2001). Bununla birlikte, metakaolin malzemesinin genelde kimyasal bileşimi tutarlıdır ve farklı metakaolin malzemesinin istenen geopolimer özelliklerini ne ölçüde sağladığı hakkında eldeki veriler çok azdır.

Kaolinit malzemesinden nasıl metakaolin elde edilebileceğine dairde herhangi bir uluslararası standart mevcut değildir. Dolayısıyla farklı metakaolin örneklerinin geopolimer mekanik özelliklerini kıyaslamak oldukça zordur (Kuenzel *et al.* 2013).

Yapılan bu çalışmada ise kaolin kili farklı sıcaklıklarda metakaoline dönüştürülmüş ve ardından bu malzemeler kullanılarak metakaolin esaslı geopolimer harç örnekleri üretilmiştir. Literatürden farklı olarak nihai kalsinasyon sıcaklıklarında örnekler bir saat ısıl işleme maruz bırakılmış ve metakaolin esaslı geopolimerlerden elde edilen bulgulara göre farklı sıcaklıklarda kalsine edilmiş olan metakaolin malzemesinin örnek özelliklerinde meydana getirdiği değişimler incelenmiştir.

2. Materyal ve Metot

2.1 Kullanılan malzemeler

Deney örneklerinin üretilmesi ve hazırlanmasında kullanılan metakaolin malzemesi kaolin kilinin beş farklı sıcaklıkta kalsinasyonu ile elde edilmiş olup örneklerde Çanakkale – Türkiye bölgesinden elde edilen kaolin kili kullanılmıştır. Geopolimer harçların üretiminde kullanılan kum standart (silis) kum olup geopolimer harçların hazırlanmasında alkali aktifleştirici olarak yüksek saflıkta NaOH ve 3 modül Sodyum silikat solüsyonu kullanılmıştır. Kullanılan kimyasal malzemelere ait özellikler Çizelge 1'de verilmiştir.

Çizelge 1. Alkali aktivatörlerin özellikleri.

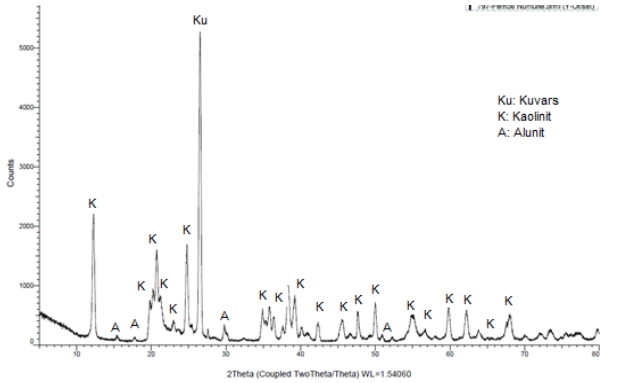
Sodyum silikat solüsyonu	Sodyum hidroksit (NaOH)
Na_2O: 26.98 (%) SiO_2 : 8.77 (%) H_2O: 64.25 (%)	M: 40 g/mol NaOH ≥ 99,0 (%)

Geopolimer harç üretiminde kullanılan ve metakaolinin hammaddesi olan kaolin malzemesinin XRF analiz sonuçlarına göre; kaolinde toplam SiO_2+Al_2O_3+Fe_2O_3 değeri % 86.21'dir (Çizelge 2) ve ASTM C 618'e (2017) göre puzolan olarak kullanılacak malzemelerde gerekli görülen kimyasal değeri sağlamaktadır.

XRD analizinden elde edilen verilere göre ise kaolinde; kuvars, kaolinit ve alunit gibi minerallerin varlığı tespit edilmiştir (Şekil 1).

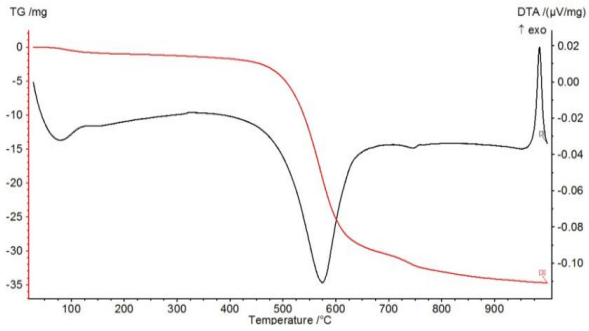
Çizelge 2. Kaolin malzemesine ait XRF kimyasal analiz sonuçları.

Oksit (%)	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	MgO	Na_2O	K_2O	SO_3	CaO	K.K.	Toplam
Kaolin	53.06	32.33	0.82	0.03	0.02	0.41	1.44	0.14	10.38	98.63



Şekil 1. Kaoline ait XRD difraktogramı.

DTA-TG analizlerine göre ise kaolin kili termodinamik olarak 574 °C'de endotermik pik göstererek metakaoline dönüşüm yapmıştır. TG analiz verileri incelendiğinde ise kaolin kilinin 1000 °C'de ki kızdırma kaybı değerinin % 10.19 olduğu belirlenmiştir (Şekil 2).



Şekil 2. Kaoline ait DTA-TG analiz grafiği.

2.2 Metakaolin malzemesinin elde edilmesi

Geopolimer malzeme üretiminde kullanılacak olan metakaolin malzemesini elde edebilmek amacıyla, kaolin kili ağırlıkça % 20 oranında su ile hobart mikserde karıştırılmış ve 5 cm çapındaki silindir metal kalıp yardımıyla kaolin kili manuel olarak şekillendirilmiştir.

Şekillendirilen kaolen kili örnekleri 600-700-800-900 ve 1000 °C'de olmak üzere beş farklı sıcaklıkta ve son sıcaklıklarda bir saat süre ile laboratuvar tipi fırında kalsine edilerek metakaoline dönüştürülmüştür.

Daha sonra metakaolin malzemeleri yine laboratuvar tipi bilyeli değirmende tane boyutu maksimum 250 µm oluncaya kadar öğütülmüştür.

2.3 Geopolimer harçların hazırlanması

Kaolinin kalsinasyon sıcaklığının geopolimer harç örnekleri üzerine etkisini belirlemek için 9M konsantrasyonlu NaOH çözeltisi kullanılmıştır. Konsantrasyonu elde etmek için çözünmüş NaOH pelletleri kullanılmıştır. NaOH çözeltileri, planlanan konsantrasyonlarda hazırlanmış ve 24 saat boyunca oda sıcaklığında beklemeye bırakılmıştır. Daha sonra, metakaolin ve alkali çözeltilerle (NaOH ve 3 modül sodyum silikat solüsyonu) standart RİLEM kumu otomatik programlanabilir çimento mikserinde 5 dakika süre ile karıştırılmıştır. Harçlar, 40 mm x 40 mm x 160 mm boyutlarına sahip metal kalıplarda vibrasyon yöntemiyle şekillendirilmiştir.

Daha sonra numuneler termal kür prosesinin gerçekleştirilmesi için laboratuvar tipi etüve yerleştirilmiş ve 24 saat süre ile 90 °C'de kür edilmiştir. Geopolimer harç örneklerinin hazırlanmasında kullanılan malzemeler ve karışım oranları Çizelge 3'de verilmiştir. Geopolimer harç örneklerine uygulanan tüm testlerde 7 günlük harçlar kullanılmıştır.

Çizelge 3. Geopolimer Harçların Karışım Oranları.

Metakaolin (MK) (g)	Kum (g)	Sodyum silikat solüsyonu (ml)	NaOH çözeltisi (ml)	Likit/MK oranı (%) (ml/g)
450	1350	66	134	0.44

Harçlar, fiziksel özelliklerinin belirlenmesi amacıyla 24 saat boyunca su tankına yerleştirilmiştir. Bu örneklerin; su emme, görünen porozite, birim hacim ağırlık ve görünür yoğunluk gibi fiziksel özellikleri Arşimet prensibine göre belirlenmiştir.

Harçların fiziksel özelliklerinin belirlenmesi sırasında; örnekler su tankından alınarak, su içerisinde asılı ağırlıkları ve suya doygun yüzey kuru ağırlıkları belirlenmiştir. Ardından ilgili örnekler etüvde değişmez ağılığa gelinceye kadar kurutulup tekrar tartılmıştır. Elde edilen bu değerler yardımıyla örneklerin; görünen porozite, birim hacim ağırlık ve görünür yoğunluk değerleri TS EN 772-4'e (2000) göre, su emme değerleri ise TS EN 771-1'e (2015) göre belirlenmiştir. Harçların mekanik özellikleri ise TS EN 196-1'e (2016) göre belirlenmiştir. Mekanik testler için otomatik kontrollü laboratuvar tipi çimento presi kullanılmıştır. Harçlarda, fiziksel testlerde ve eğilme dayanımı testinde her bir örnek grubundan üç örneğin ortalama değerleri alınırken, basınç dayanım testinde altı örneğin ortalaması alınarak sonuçlar belirlenmiştir.

3. Bulgular ve Tartışma

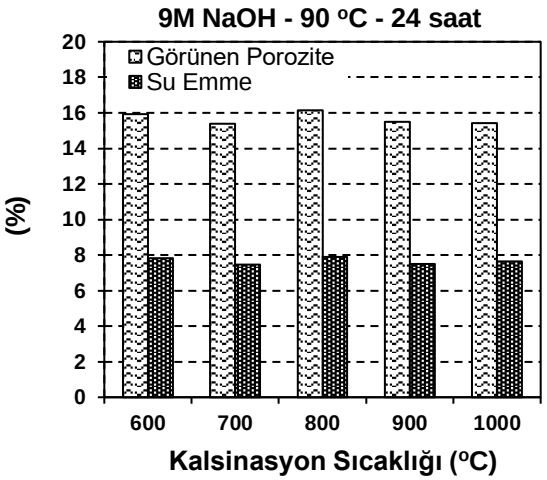
Geopolimer harçların görünen porozite ve su emme oranları Şekil 3'de gösterilmiştir. Genel anlamda örneklerden elde edilen oranların birbirine yakın değerler verdiği ve kalsinasyon sıcaklığındaki değişimlerin bulguları doğrusal olarak etkilemediği belirlenmiştir. Metakaolinin elde edildiği kalsinasyon sıcaklığının 800 °C ve üzerinde olduğu sıcaklıklarda artan sıcaklıklar görünen porozite oranlarını azaltmıştır.

Örneklerin görünen porozite oranları % 15.4 ile % 16.1 arasında değişkenlik gösterirken, en yüksek gözenekliliğe 800 °C'de elde edilen metakaolin esaslı geopolimerlerde ulaşılmıştır. Bununla birlikte 1000 °C ve 700 °C'de kalsine edilen metakaolin esaslı örneklerde en düşük porozite oranları elde edilmiştir. Bu noktada metakaolin kalsinasyon sıcaklığındaki farklılıkların ortaya çıkan geopolimer malzemelerde önemli bir gözeneklilik farklılığı oluşturmadığı söylenebilmektedir (Şekil 3).

Geopolimer harçların su emme oranlarında ise yine farklı sıcaklıklarda kalsine edilen metakaolin malzemesinin geopolimer harçlarda su emme oranları üzerinde belirgin bir etkisi olmadığı gözlenmiştir. Bu aşamada, 800 °C'de elde edilen metakaolin esaslı geopolimerlerde en yüksek su emme oranları elde edilmiştir. Geopolimer harçların su emme oranları kalsinasyon sıcaklıklarına bağlı

olarak % 7.5 - % 7.9 arasında değişkenlik göstermiştir.

Görünen porozite oranları normal şartlarda örneklerin açık gözenek oranlarını ifade etmesinden dolayı örneklerden elde edilen porozite ve su emme oranlarının aynı eğilimde olması beklenmiştir. Bu bağlamda gözeneklilik ve su emme oranları açısından en düşük değerlerin 700 ^{o}C'de kalsine edilen metakaolin katkılı örneklerde elde edilmesi doğal karşılanmıştır.

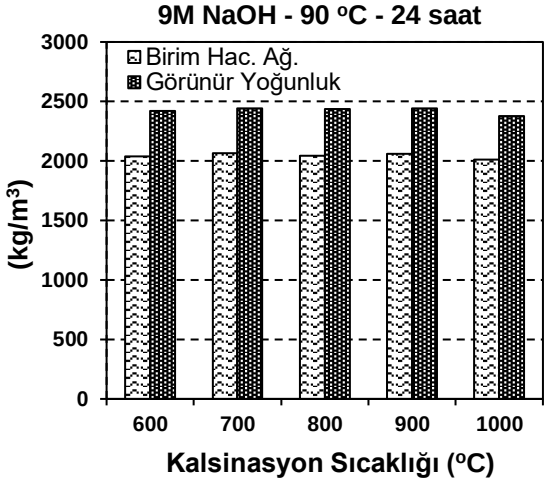


Şekil 3. Geopolimer harçların görünen porozite ve su emme oranları.

Metakaolinin elde edildiği kalsinasyon sıcaklıkları genel anlamda örneklerin yoğunlarını önemli oranda etkilememiştir. Tüm örneklerde benzer yoğunluk değerleri elde edilmiştir. Bu bağlamda metakaolinin elde edildiği kalsinasyon sıcaklıklarının malzeme özgül ağırlığında önemli bir değişikliğe sebep vermemesinden dolayı ve geopolimer yapısındaki benzerlikler nedeniyle birim hacim ağırlık ve görünür yoğunluk değerlerinin birbirine yakın olduğu düşünülmektedir. Yapılan başka bir çalışmada da kaoline uygulanan kalsinasyon sıcaklıklarının metakaolin malzemesi birim hacim ağırlıklarını önemli oranda etkilemediği belirtilmiştir (Diffo *et al.* 2015).

Geopolimer harçların birim hacim ağırlıkları 2013.1 kg/m^3 – 2066 kg/m^3 arasında değişirken, görünür yoğunluk değerleri 2442.1 kg/m^3 – 2379.9 kg/m^3 arasında değişkenlik göstermiştir (Şekil 4).

Elde edilen sonuçlara paralel olarak metakaolin esaslı geopolimerlerin 80 ^{o}C'de kür edilmeleri durumunda 1950-2000 kg/m^3'lük birim hacim ağırlıklara sahip olduğu belirtilmiştir (Rovnanik 2010). Dolayısıyla, 90 ^{o}C'de kür edilen örneklerin birim hacim ağırlık değerlerinin normal aralıklarda olduğu düşünülmektedir. Elde edilen bulgularına göre; geopolimer harçların fiziksel özelliklerinde metakaolin kalsinasyon sıcaklıklarının örnek özelliklerinde önemli bir değişiklik gerçekleştirmediği ortaya çıkmıştır.

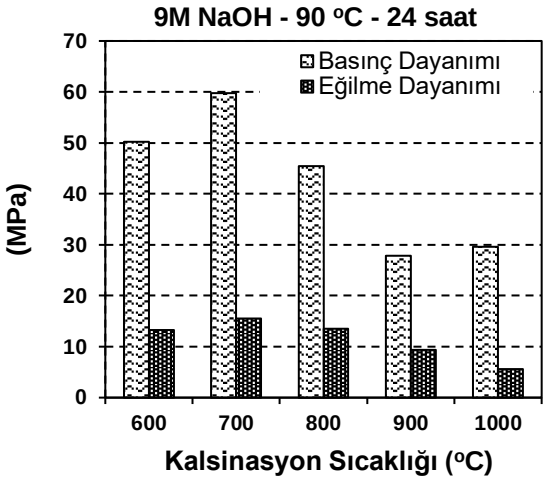


Şekil 4. Geopolimer harçların yoğunluk değerleri.

Bu nedenle geopolimerleşme mekanizmasında kullanılan metakaolin malzemesinin temelde reaktif olduğu nokta harçların mekanik özellikleri ile ilgilidir. Yapılan çalışmalarda (Curcio *et al.* 1998, He *et al.* 2012) metakaolin kullanılması durumunda yüksek performans gösteren harçların üretilebileceği belirtilmiş olup bu çalışmalara paralel olarak geopolimer harçların fiziksel özelliklerinde önemli bir değişim görülmemekle birlikte, ilgili örneklerin mekanik özelliklerinde çok büyük farklılıklar ortaya çıkmıştır. Dolayısıyla, fiziksel özelliklerde önemli bir değişim gözlenmezken, geopolimer harçların mekanik özellikleri metakaolin kalsinasyon sıcaklığından etkilenmiştir.

700 ^{o}C'de ve daha yüksek sıcaklıklarda elde edilen metakaolinin kalsinasyon sıcaklığının artması ile doğrusal olarak örneklerin eğilme dayanımı değerlerinde düşüşler olduğu gözlenmiştir. 600 ve 800 ^{o}C'de elde edilen metakaolin katkılı harçlarda

birbirine çok yakın eğilme dayanımı değerleri ortaya çıkarken, 700 °C'de elde edilen metakaolin esaslı geopolimer harçlarda 15.5 MPa ile en yüksek eğilme dayanımı değerleri elde edilmiştir. Geopolimer harçların eğilme dayanımları ise 5.7 – 15.5 MPa arasında değişkenlik göstermektedir (Şekil 5).



Şekil 5. Geopolimer harçların eğilme ve basınç dayanım değerleri.

Basınç dayanımları açısından elde edilen bulgular değerlendirildiğinde ise eğilme dayanımı değerlerine benzer bir eğilim ile karşılaşılmıştır. Bu noktada en yüksek basınç dayanımlarına 700 °C'de kalsine edilen metakaolin esaslı harçlarda 59.7 MPa ile elde edilmiştir. Bu sıcaklıkla ilgili olarak, geopolimer malzemelerin basınç dayanımlarının 500 – 700 °C arasında kalsinasyon sıcaklığının artmasıyla artış göstereceği fakat 700 °C üzerine sıcaklıkların çıkması durumunda ise basınç dayanımlarının azalacağı belirtilmiştir (Elimbi *et al.* 2011). Bunun nedeni olarak da kaolinin dehidroksilasyon neticesinde maksimum düzensiz halini 700 °C'de aldığı ve kalsinasyon sıcaklığının arttırılması durumunda düzensiz hal durumunun azalması gösterilmektedir. Bu durumunda geopolimer ürünlerin beklenen performansını azalttığı belirtilmektedir (Elimbi *et al.* 2011).

Diğer sıcaklıklarda ise basınç dayanımları değişken sonuçlar vermiştir. Bu noktada en düşük basınç dayanımları 900 °C'de kalsine edilen metakaolin esaslı harçlarda gözlenmiştir. Elde edilen sonuçlara paralel olarak yapılan bir çalışmada ise 80 °C de kür edilen 7 günlük metakaolin esaslı harçlarda yaklaşık olarak 50 MPa basınç dayanımı, 10 MPa eğilme dayanımı değerleri elde edilmiştir (Rovnanik 2010). Bunun yanında 56 günlük örneklerde en yüksek 39.7 MPa basınç dayanımı değerlerinin elde edildiği belirtilmekte olup (Tchakoute 2016), bu çalışmadan elde edilen değerlerin tatmin edici seviyelerde olduğu düşünülmektedir.

4. Sonuç

Yapılan bu çalışmadan elde edilen bulgulara göre metakaolinin elde edildiği kalsinasyon sıcaklıkları, geopolimer malzemelerin fiziksel özelliklerinde önemli bir farklılığa sebebiyet vermemiştir. Fakat bu durumun örneklerin basınç dayanım değerleri üzerinde oldukça etkili olduğu görülmüştür. Bununla birlikte metakaolin kalsinasyon sıcaklığının basınç dayanım değerleri üzerine olan etkisinin net olmadığı ve nispeten daha yüksek sıcaklıklarda metakaolin yapısının daha düzenli olması nedeniyle basınç dayanım değerlerinin belirgin bir şekilde azaldığı düşünülmektedir.

Tüm örnek grupları içerisinde en yüksek basınç dayanım değerine 700 °C'de kalsine edilen metakaolin esaslı geopolimer harçlarda 59.7 MPa olarak elde edilirken, en düşük basınç dayanım değeri 27.8 MPa ile 900 °C'de elde kalsine edilen metakaolin esaslı harçlarda elde edilmiştir.

Elde edilen veriler incelendiğinde geopolimer harç üretimi için kaolin malzemesine uygulanacak kalsinasyon sıcaklığının fiziksel özellikler açısından önemli bir farklılık oluşturmadığı bununla birlikte mekanik özellikler bakımından ise kalsinasyon sıcaklığının 800 °C'yi geçmemesinin daha uygun ve ekonomik olacağı kanaatine varılmıştır. Ayrıca metakaolin malzemesinin kullanılması ile tatmin edici mekanik özelliklere sahip geopolimer harç üretimi yapılabileceği düşünülmektedir.

Teşekkür

Yazar, bu çalışmayı destekleyen TÜBİTAK'a teşekkür eder (TUBİTAK Proje No:213M294).

5. Kaynaklar

ASTM C 618 - 17a, 2017. Standard Specification for

Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete, ASTM-USA.

Castelein, O., Soulestin, B., Bonnet, J.P., Blanchart, P., 2001. The influence of heating rate on the thermal behaviour and mullite formation from a kaolin raw material. *Ceramics International.* **27**, 517–522.

Cioffi, R., Maffucci, L., Santoro, L., 2003. Optimization of geopolymer synthesis by calcination and polycondensation of a kaolinitic residue. *Resources, Conservation and Recycling*. **40**, 27–38.

Curcio, F., DeAngelis, B.A., Pagliolico, S., 1998. Metakaolin as a pozzolanic microfiller for high-performance mortars. *Cement and Concrete Research*. **28**, 803–809.

Elimbi, A., Tchakoute, H.K., Njopwouo, D., 2011. Effects of calcination temperature of kaolinite clays on the properties of geopolymer cements. *Construction and Building Materials*. **25**, 2805–2812.

He, J., Zhang, J., Yu, Y., Zhang, G., 2012. The strength and microstructure of two geopolymers derived from metakaolin and red mud-fly ash admixture: A comparative study. *Construction and Building Materials*. **30**, 80–91.

Ozer, I. and Soyer-Uzun, S., 2015. Relations between the structural characteristics and compressive strength in metakaolin based geopolymers with different molar Si/Al ratios. *Ceramics International*. **41,** 10192–10198.

Kaya, K., Soyer-Uzun, S., 2016. Evolution of structural characteristics and compressive strength in red mud-metakaolin based geopolymer systems. *Ceramics International*. **42**, 7406–7413.

Kenne Diffo, B.B., Elimbi, A., Cyr, M., Dika Manga, J., Tchakoute Kouamo, H., 2015. Effect of the rate of calcination of kaolin on the properties of metakaolin-based geopolymers. *Journal of Asian Ceramic Societies.* **3**, 130–138.

Kong, D.L.Y., Sanjayan, J.G., Sagoe-Crentsil, K., 2007. Comparative performance of geopolymers made with metakaolin and fly ash after exposure to elevated temperatures. *Cement and Concrete Research*. **37**, 1583–1589.

Logesh Kumar, M. and Revathi, V., 2016. Metakaolin bottom ash blend geopolymer mortar - A feasibility study. *Construction and Building Materials*. **114**, 1–5.

Kuenzel, C., Neville, T.P., Donatello, S., Vandeperre, L., Boccaccini, A.R., Cheeseman, C.R., 2013. Influence of metakaolin characteristics on the mechanical properties of geopolymers. *Applied Clay Science*. **83–84,** 308–314.

Marín-López, C., Reyes Araiza, J.L., Manzano-Ramírez, A., Rubio Avalos, J.C., Perez-Bueno, J.J., Muñiz-Villareal, M.S., Ventura-Ramos, E., Vorobiev, Y., 2009. Synthesis and characterization of a concrete based on metakaolin geopolymer. *Inorganic Materials*. **45**, 1429–1432.

Pacheco-Torgal, F., Moura, D., Ding, Y., Jalali, S., 2011. Composition, strength and workability of alkali-activated metakaolin based mortars. *Construction and Building Materials*. **25**, 3732–3745.

Rovnaník, P., 2010. Effect of curing temperature on the development of hard structure of metakaolin-based geopolymer. *Construction and Building Materials.* **24**, 1176–1183.

van Jaarsveld, J.G., van Deventer, J.S., Lukey, G., 2002. The effect of composition and temperature on the properties of fly ash- and kaolinite-based geopolymers. *Chemical Engineering Journal.* **89**, 63–73.

Tchakouté, H.K., Rüscher, C.H., Kong, S., Kamseu, E., Leonelli, C., 2016. Geopolymer binders from metakaolin using sodium waterglass from waste glass and rice husk ash as alternative activators: A comparative study. *Construction and Building Materials.* **114**, 276–289.

TS EN 196-1, 2016. Methods of testing cement - Part 1: Determination of strength, TSE-Turkey.

TS EN 771-1, 2015. Specification for masonry units - Part 1: Clay masonry units, TSE-Turkey.

TS EN 772-4, 2000. Methods of test for masonry units - Part 4: Determination of real and bulk density and of total and open porosity for natural stone masonry units, TSE-Turkey.

Villa, C., Pecina, E.T., Torres, R., Gómez, L., 2010. Geopolymer synthesis using alkaline activation of natural zeolite. *Construction and Building Materials.* **24**, 2084–2090.

Zibouche, F., Kerdjoudj, H., d'Espinose de Lacaillerie, J.-B., Van Damme, H., 2009. Geopolymers from Algerian metakaolin. Influence of secondary minerals. *Applied Clay Science*. **43**, 453–458.