

## Alçı Esaslı Köpüklerin Üretimi ve Gözenek Yapısının Kontrolü

Mustafa Serhat Başpınar<sup>1</sup>, Şenol Mutlu<sup>1</sup>, Cüneyt Doğan<sup>2</sup>, Abdullah Noman Alawadhi<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Afyon Kocatepe Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Afyonkarahisar.

<sup>2</sup>Afyon Kocatepe Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Afyonkarahisar

e-posta: sbaspınar@aku.edu.tr, ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0003-2086-1935>  
senolmutlu1975@hotmail.com, ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-3094-4577>  
cuneytdogan11@gmail.com, ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-6662-8381>  
kingalawadhi@gmail.com, ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-6195-5367>

Geliş Tarihi:16.03.2020

; Kabul Tarihi:22.04.2020

### Öz

#### Anahtar kelimeler

Alçı köpük; Kalsiyum stearat; Kararlılık; Basıncı mukavemeti; Isıliletkenlik

Binalardaki ses ve ısı yalıtımı konularında alçıdan yapılmış ürünlere olan talep gün geçtikçe artmaktadır. Bina yangın yönetmeliklerindeki gelişmeler var olan polimer esaslı ürünlerin kullanımına sınırlamalar getirmektedir. Bu amaçla mineral esaslı yalıtım uygulamalarına olan talep artmaktadır. Bu çalışmada,  $\beta$ -Hemihidrat tipi alçı kullanılmıştır. Gözenek oluşumu için  $Al_2(SO_4)_3-CaCO_3$  reaksiyonu tekniği kullanılmıştır. Kullanılan köpük düzenleyici (Kalsiyum stearat) ilave oranının ürünün nihai mekanik ve fiziksel özelliklerine olan etkileri incelenmiştir. Artan köpük düzenleyici miktarı ile gözenek boyutlarının küçüldüğü ancak hacim ağırlığının yükseldiği gözlenmiştir. Küçülen gözenek boyutu nedeniyle ısı iletkenlik değerlerinde azalma ölçülmüştür.  $Al_2(SO_4)_3-CaCO_3$  reaksiyonu tekniği ve kalsiyum stearat ilavesi yüksek kararlılıkta alçı köpükleri üretilmiştir.

## Production of Gypsum Based Foams and Pore Structure Control

### Abstract

#### Keywords

Gypsum foam; Calcium stearat; Stability; Compressive strength; Thermal conductivity

The demand for products made of plaster on sound and thermal insulation in buildings is increasing day by day. Developments in building fire regulations impose restrictions on the use of existing polymer-based products. Therefore, the demand for the mineral based insulation applications is increasing. In this study,  $\beta$ -hemihydrate type plaster was used.  $Al_2(SO_4)_3-CaCO_3$  reaction technique was used for pore formation. The effects of the foam stabilizer (calcium stearat) amount on the final mechanical and physical properties of the product were examined. It was observed that the pore sizes decreased with the increasing amount of foam stabilizer but the bulk density increased. Highly stable gypsum foams were produced by using  $Al_2(SO_4)_3-CaCO_3$  reaction technique with the addition of calcium stearat as a foam stabilizer.

© Afyon Kocatepe Üniversitesi

### 1. Giriş

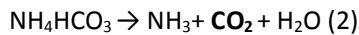
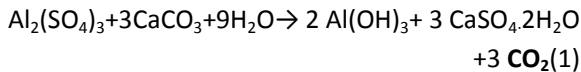
$\beta$ -Hemihidrat alçı ( $CaSO_4 \cdot \frac{1}{2}H_2O$ ) binalarda farklı amaçlarla kullanılan çevre dostu ve sürdürülebilir

bir bağlayıcı karakterli yapı malzemesidir. Alçı üretimi için gerekli enerji tüketimi çimento ve kireç üretiminin enerji tüketimi ile karşılaştırıldığında çok daha düşüktür. Alçı doğada dihidrat ( $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ ) formunda bulunur ve kalsinasyon ile hemidrat

formuna çevrilir. Ancak günümüzde gübre üretiminden (fosfojips) (Değirmenci 2008), termik santrallerin baca gazı kükürt giderilmesinden (FGD alçı) (Tesáreket *al.*2007) ve bor minerallerinin işlenmesinden (borojips) (Başpınar ve Aytekin 2019) çıkan sentetik yan ürün alçıların kullanımı da gün geçtikçe artmaktadır.

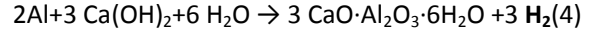
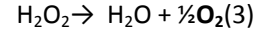
Alçının diğer avantajları mükemmel yangın koruma özellikleri, estetik ve iyi işlenebilirliktir. Avantajlarına rağmen, binalarda alçı kullanımı ç sivalar, kendiliğinden yayılan zeminler ve alçı levhalar ile sınırlıdır. Bu nedenle hafif alçı bazlı malzemelerin geliştirilmesi alçının kullanım alanlarının geliştirilmesine önemli katkıda bulunacaktır. Hafif ve gözenekli malzemeler daha iyi ısı yalıtım ve akustik özellikleri, düşük nakliye maliyetleri nedeniyle günümüzde artan bir talep görmektedir. Alçı ve sudan elde edilen ürünlerin kütle yoğunluğu genellikle 1.0 ila 1.5 kg/m<sup>3</sup> arasında değişir. Ancak 1.0 kg/m<sup>3</sup> altındaki kütle yoğunluğuna ulaşmak için bazı gözenek oluşturma yöntemleri kullanılmalıdır.

Alçı malzemelerin hafifletilmesinde iki temel yaklaşım vardır. Doğrudan ve dolaylı yöntemlerle gözenek oluşturulmasıdır. Doğrudan gözenek oluşturma yöntemlerinde, gözenekler malzeme içerisinde kimyasal veya mekanik yöntemlerle oluşturulur. Gözenekler alçı malzeme içerisinde gaz ortaya çıkaran kimyasal reaksiyonlar veya yüzey aktif maddeler kullanılarak mekanik köpürtme ile oluşturulur. CO<sub>2</sub> ortaya çıkaran reaksiyonlar çoğu zaman alçıyı hafifletmek için kullanılır. Alüminyum sülfat ve kireçtaşı reaksiyonu (1) ve amonyum bikarbonatın su içinde parçalanma reaksiyonu (2) CO<sub>2</sub> gazı veren iki önemli reaksiyondur (Çolak 2000, Rubio-Avaloset *et al.* 2005, Knott 2005).



Alçı ürünlerde daha az kullanılan ve O<sub>2</sub> gazı sayesinde gözenek oluşturulan bir diğer yöntem hidrojen peroksitin (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) parçalanmasıdır

(Huangaet *al.* 2013). Daha çok köpük beton üretiminde karşımıza çıkan bu reaksiyon ile (3) hafif ve gözenekli alçı ürünler üretilebilmektedir. Hafif betonların hazırlanması için kullanılan en yaygın yöntem, alüminyum metal tozlarını kalsiyum hidroksit ile reaksiyona sokarak (4) H<sub>2</sub> gaz çıkışını sağlamaktır. Benzer metot hafif alçı ürünlerde de denenmektedir (Vimmrováet *al.* 2014).



Doğrudan gözenek oluşturma yöntemlerinde bir diğer yaklaşım yüzey aktif malzemelerin kullanılmasıdır. Bu yaklaşımda, yüzey aktif malzeme doğrudan su-alçı karışımına eklenir ve hızlı bir mekanik karıştırma ile gözenek oluşumu sağlar. Diğer bir yaklaşım olarak, önceden hazırlanmış köpük malzemesi su-alçı karışımı ile karıştırılarak gözenek oluşumu sağlanır. Bu amaçla sodyum lauryl sülfat gibi deterjanlar sıkça kullanılır (Çolak 2000, 9, Bazelovaet *al.* 2010).

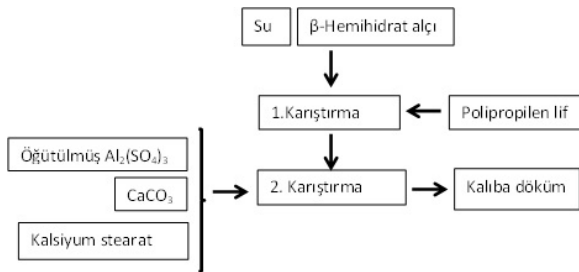
Dolaylı yöntemlerle alçı malzemeleri hafifletmek için genelde gözenekli dolgu malzemeleri kullanılmaktadır. Genleşmiş perlit, volkanik tüfler, vermikülit genleşmiş silika jel alçı ürünleri hafifletmek için kullanılan inorganik dolgu malzemeleri olarak öne çıkmaktadır (Demir ve Başpınar 2008, Gencelvd 2014, Başpınar ve Kahraman 2011).

Bu çalışmanın temel amacı, alçı esaslı köpüklerin oluşumu için Al<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub> ile CaCO<sub>3</sub> reaksiyonu tekniğinin uygulanabilirliğini incelemektir. Bununla birlikte, köpük yapının kararlılığını sağlamak için ilave edilen köpük düzenleyicinin (Kalsiyum stearat) alçı köpüğün fiziksel ve mekaniksel özelliklerine olan etkilerini ortaya çıkarmaktır.

## 2. Materyal ve Metot

Deneylerde kullanılmak üzere katkı miktarı nispeten en az düzeyde olan ve daha hızlı hidrasyonunu tamamlayan kartonpiyer tipi alçı (β-Hemihidrat alçı) seçilmiştir. Al<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub> için teknik kalite malzeme seçilmiştir (CAS no: 10043-01-3).

CaCO<sub>3</sub> için Afyonkarahisar bölgesindeki mermer fabrikasından atık olarak çıkan mermer kesim tozları kullanılmıştır. Mermer kesim atığı kullanılmadan önce 105 °C’de sabit ağırlığa gelene kadar kurutulmuştur. Kullanılan mermer tozlarının d<sub>50</sub> boyutu 24 µm olarak ölçülmüştür. Kullanılan alüminyum sülfatın alındığı durumdaki tane boyutu 1 mm’den daha büyüktür. Kireçtaşı ile reaksiyonunu hızlandırmak amacıyla, alüminyum sülfat 1 saat jet değirmende öğütülmüştür. Alüminyum sülfatın d<sub>50</sub> boyutu 105 µm olarak ölçülmüştür. Alüminyum sülfat ve kireç taşının reaksiyonu sonucu oluşan gözeneklerin kararlılığını sağlamak, gözenek dağılımını düzenlemek ve numunelerde çökmeyi engellemek için kalsiyum stearat (C<sub>36</sub>H<sub>70</sub>CaO<sub>4</sub>) kullanılmıştır. Kalsiyum stearat için Melos 3701 kodlualzeme kullanılmıştır. Çizelge 1’de üretilen 4 farklı seri numunelerin bileşimleri gösterilmiştir. Su/Alçı oranı tüm numunelerde 0.8 olacak şekilde sabit tutulmuştur. Şekil 1’de ise numune hazırlama metodu akım şeması olarak gösterilmiştir.



Şekil 1. Deney numuneleri üretim akım şeması.

Karışım suyuna ilk önce polipropilen lif (0.3 mm çap, 12 mm boy) atılmış ve 20 saniye süre ile yüksek hızda (300 devir/dk.) karıştırılmıştır. Su üzerine serpilerek eklenen alçı 15 saniye beklendikten sonra planet karıştırıcıda 30 saniye süre ile karıştırılmıştır. Tüm karışımlarda oda sıcaklığında, dinlendirilmiş şebeke suyu kullanılmıştır. Öğütülmüş Al<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>, kurutulmuş mermer tozu ve kalsiyum stearat karışımı porselen bilyalı jet değirmende 10 dakika süre ile karıştırılmıştır. Bu karışım daha sonra alçı-su karışımına eklenmiş ve 10 saniye çok hızlı devirde karıştırılarak nihai karışım 10x10x10 cm kalıplara dökülmüştür. Şekil 2’de kullanılan döküm kalıpları gösterilmiştir. Döküm yapıldıktan sonra, kimyasal

reaksiyon sayesinde açığa çıkan CO<sub>2</sub> gazı sonucu oluşan kabarmayla bir miktar kalıptan taşma meydana gelmektedir. Bu fazlalık kesildikten sonra ve dökümden 40 dakika sonra numuneler kalıptan çıkarılmıştır. Elde edilen 10x10x10 cm küp numuneler hacim ağırlık ve mukavemet deneylerinde kullanılmıştır. Yoğunluk ve mukavemet değerleri için beş numunenin aritmetik ortalaması alınmış ve değerler not edilmiştir.

Çizelge 1. Deney numunelerinin bileşimleri.

	Seri 1	Seri 2	Seri 3	Seri 4
<b>Su/Alçı</b>	0.8	0.8	0.8	0.8
Katı malzemelerin karışım oranları (% Ağırlıkça)				
<b>Alçı</b>	90	90	90	90
<b>Al<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub></b>	5.3	5.3	5.3	5.3
<b>CaCO<sub>3</sub></b>	4.7	4.7	4.7	4.7
Toplam katı miktarına göre (% Ağırlıkça)				
<b>Kalsiyum Stearat</b>	<b>0.5</b>	<b>1.0</b>	<b>1.5</b>	<b>2.0</b>
<b>Polipropilen Lif</b>	0.05	0.05	0.05	0.05



Şekil 2. Numune kalıbı ve alçı köpüğün taşma miktarı.

Numunelerin hacim ağırlıkları hesaplanmadan önce laboratuvar ortamında sabit ağırlığa gelinceye kadar (3 hafta) kurumaları sağlanmıştır. Numunelerin hacim ağırlığı basit kütle/hacim oranından hesaplanmıştır. Basınç mukavemeti ölçümü için 0,5 kN/sn basma hızı kullanılmıştır. Isıl iletkenlik ölçümü için ahşap kalıba 30x30x5 cm boyutunda olacak şekilde plakalar dökülmüştür ve HFM (heatflowmeter) tekniği kullanılarak ısı iletim davranışları ölçülmüştür (0-25 °C ölçüm şartları). Gözenek boyut çapları SEM (taramalı elektron mikroskop) incelemesinden elde edilen görüntülerden ölçülmüştür.

### 3. Bulgular

Şekil 3’de köpük düzenleyici olarak sisteme eklenen kalsiyum stearatın etkisi gösterilmiştir. Köpük düzenleyici ilave edilmediğinde, malzemede çökme ile birlikte düzensiz gelişmiş ve aşırı büyümüş gözenek yapısı gözlenmiştir.  $Al_2(SO_4)_3-CaCO_3$  reaksiyonu sayesinde ortaya çıkan gözenek yapıcı gazların kontrolsüz bir şekilde birleştiği gözlenmiştir. Bu büyüme sonucunda hücre duvarları malzemenin toplam ağırlığını taşıyamayarak çökme gerçekleşmiştir. Toplam katı ağırlığının %1’ i kadar yapılan kalsiyum stearatın etkisi Şekil 3’te gösterilmiştir. Oluşan gözeneklerin bir araya gelerek büyümesi engellenmiştir.



Şekil 3. Köpük düzenleyici olarak kullanılan Kalsiyum Stearat’ın etkisi.

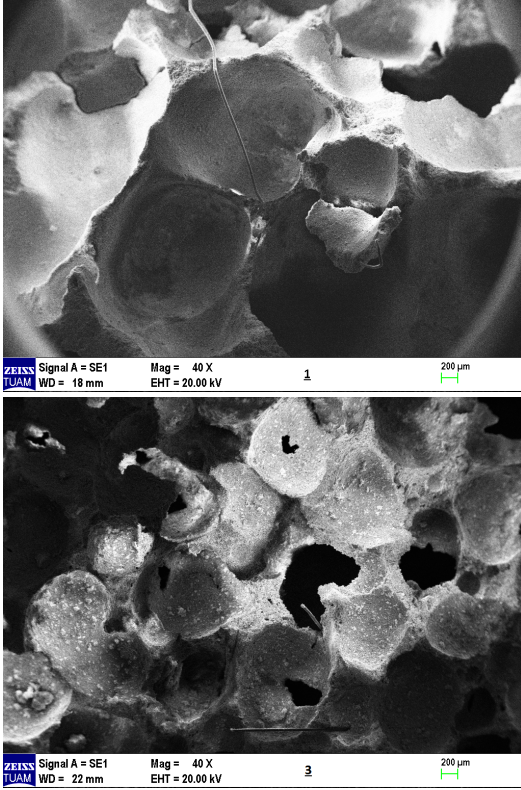
Şekil 4’te üretilen 4 farklı numune serisinin stereo mikroskopla çekilmiş makro yapı fotoğrafları gösterilmiştir. Kalsiyum stearat ilave miktarı arttıkça oluşan gözeneklerin boyutlarının küçülerek daha düzenli ve eş büyüklüğe yaklaştığı gözlenmiştir. Kalsiyum stearatın hidrofobik davranışı (Cuiet al.2018), alçı-su karışımı katılaşmadan önce sistemde ortaya çıkan gazların etrafında suyu iterek gözeneklerin birbirleriyle birleşerek büyümesini engellemektedir. Bu sayede oluşan gözenekler homojen dağılmaktadır. Artan kalsiyum stearat miktarı ile hidrofobik itme kuvveti arttığı için, oluşan gözeneklerin boyutları küçülme eğilimi göstermiştir.



Şekil 4. Kalsiyum stearat miktarına göre değişen gözenek boyut ve dağılımı.

Numunelerin kırık yüzeylerinden yapılan taramalı elektron mikroskop (SEM) incelemesinde (Şekil5), gözenek yapılarının genel olarak kapalı tipte olduğu gözlenmiştir. Polipropilen liflerin şekil ve bütünlüklerini korudukları izlenmiştir. Artan kalsiyum stearat miktarına bağlı olarak

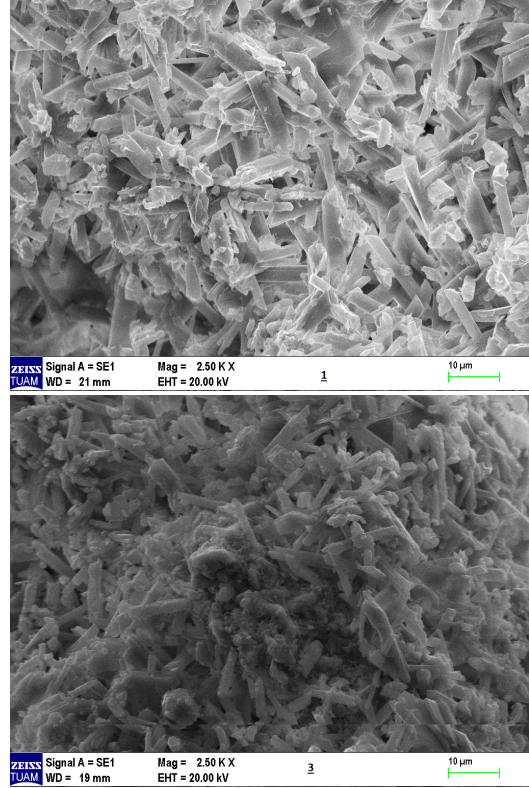
gözeneklerin boyutlarının küçüldüğü, aynı zamanda hücre duvar kalınlıklarının da arttığı gözlenmiştir. Şekil 6'da farklı oranlarda kalsiyum stearat içeren numunelerdeki alçının su ile verdiği hidrasyon reaksiyonu sonucu oluşan  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  (dihidrat) kristal gelişimleri SEM tekniği kullanılarak incelenmiştir. Kalsiyum stearat miktarı arttıkça dihidrat kristal gelişimin kötü yönde etkilendiği, prizmatik alçı kristallerinin boyutlarında bir küçülme olduğu gözlenmiştir. Kalsiyum Stearat'ın hidrofobik özelliği nedeniyle Hemihidrat alçının ( $\text{CaSO}_4 \cdot \frac{1}{2}\text{H}_2\text{O}$ ) su ile reaksiyonunun geciktiği, bu nedenle kristal gelişiminin daha az stearat içeren numunelere göre daha problemlili olduğu gözlenmiştir.



Şekil 5. % 0.5 ve % 1.5 kalsiyum stearat içeren numunelerin gözenek yapısı SEM görüntüleri.

Çizelge 2'de numunelerin fiziksel ve mekaniksel özellikleri gösterilmiştir. Kalsiyum stearat ilavesi arttıkça numunelerin temel özelliklerinde hissedilir değişikliklerin olduğu gözlenmiştir. Oluşan gözeneklerin morfolojisindeki değişim öne çıkmaktadır. Köpük düzenleyici olarak kullanılan kalsiyum stearatın miktarı arttıkça oluşan

gözeneklerin çaplarında yaklaşık dört kata kadar küçülme ölçülmüştür.



Şekil 6. % 0.5 ve % 1.5 kalsiyum stearat içeren numunelerin  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  kristalleri SEM görüntüleri.

Çizelge 2. Numunelerin deney sonuçları.

	% Kalsiyum Stearat	Basınç Mukavemeti (MPa)	Hacim Ağırlığı ( $\text{kg/m}^3$ )	Isıl İletkenlik (W/m.K)	Gözenek Çapı (mm)
Seri 1	0.5	0.45	325	0.1150	1.0-3.2
Seri 2	1.0	0.80	405	0.1093	0.8-2.2
Seri 3	1.5	0.83	410	0.1090	0.8-1.6
Seri 4	2.0	0.95	440	0.0906	0.2-0.8

Gözenek çaplarındaki küçülmeye bağlı olarak hücre duvarlarında kalınlaşma olduğu SEM incelemelerinde gözlenmiştir (Şekil 5). Köpük düzenleyici miktarı az olduğunda oluşan gaz tanecikleri birleşerek daha büyük gözeneklerin oluşmasına neden olmaktadır. Buna bağlı olarak hacim ağırlığı da azalmaktadır. En düşük oranda kalsiyum stearat ilavesi içeren Seri 1'de ortalama

yoğunluk değeri  $325 \text{ kg/m}^3$  iken, en yüksek oranda katkı içeren Seri 4'de ortalama yoğunluk değeri  $440 \text{ kg/m}^3$  olarak ölçülmüştür. Artan yoğunluk ve hücre duvar yapısına bağlı olarak, numunelerin basınç mukavemetleri bu davranışa uygun olacak şekilde artış göstermiştir.

Genel olarak azalan yoğunluğa bağlı olarak malzemelerdeki ısı iletkenliğinin de azalması beklenir. Ancak numunelerdeki yoğunluk değerleri ve ısı iletkenlik değerleri beklenen temel davranışa uymadığı görülmektedir (Çizelge 2). Ancak ısı iletkenliği etkileyen en önemli faktörlerden birisi de malzeme içindeki gözeneklerin boyut ve dağılımlarıdır. Artan kalsiyum stearat miktarı ile numunelerin gözenek çaplarında küçülme gözlenmektedir. Gözenekler küçüldükçe gözenek içinde konveksiyon ve radyasyon yolu ile iletim azalacağı için toplam ısı iletim değeri de azalır. Benzer davranış Çizelge 2'de verilen sonuçlarda da gözlenmektedir. Kalsiyum stearat miktarındaki artış  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  kristallerinin gelişimini engelleyen yönde sorun yaratsa da (Şekil 6), gözenek yapısında yaratmış olduğu pozitif etki mukavemet değerlerinin azalmasının önüne geçmiştir.

#### 4. Tartışma ve Sonuç

Maliyet, bulunabilirlik ve çevre şartları bakımından daha uygun olan  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 - \text{CaCO}_3$  reaksiyonu ile alçı köpük üretimi sonucunda hasarsız (çökme ve çatlama vb.) numuneler başarıyla üretilmiştir.  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 - \text{CaCO}_3$  reaksiyonu ile alçı köpük üretiminde, köpük düzenleyici katkı kullanılmadan alçı köpük üretiminin köpük kararlılığının sağlanamaması nedeniyle mümkün olmadığı sonucuna varılmıştır. Köpük düzenleyici olarak seçilen kalsiyum stearat kullanımı ile başarılı alçı köpük numuneler üretilmiştir. Kalsiyum stearat miktarının artması ile gözenek yapısında önemli iyileştirmeler sağlanmıştır. Gözenek boyutundaki iyileşmeye bağlı olarak mukavemet değerlerinde artış ve ısı iletim davranışında ise azalma gözlenmiştir. Ancak, kalsiyum stearatın hidrofobik özelliği nedeniyle daha fazla oranda katılmasının dihidrat alçı hidrasyonunu kötü yönde etkileyeceği ve mukavemet değerlerinin kötü

etkileneyeceği öngörülmüştür (Lee *et al.* 2018) Buna ilave olarak, hidrofobik özelliği nedeniyle artan kalsiyum stearat ilavesinin karıştırma aşamasında karışıma girmesinde problemler yaratacağı sonucuna varılmıştır.

#### 5. Kaynaklar

- Başpınar, M. S., and Kahraman, E., 2011. Modifications in the properties of gypsum construction element via addition of expanded macroporous silica granules. *Construction and Building Materials*, 25(8), 3327–3333.
- Başpınar, M.S., AYTEKİN, M., 2019. Alçı Esaslı Mineral İşlem Atığının Ticari Alçı Bünyelerinde Kullanım Şartlarının Araştırılması. *AKU Journal of Science and Engineering*, 19, 834-842.
- Bazelova, Z., Pach, L. and Lokaj, J., 2010. The effect of surface active substance concentration on the properties of foamed and non-foamed gypsum. *Ceramics-Silikáty*, 54(4), 379–385.
- Cui, Y., Wang, D., Zhao, J., Li, D., Serina, N., and Rui, Y., 2018. Effect of calcium stearate based foam stabilizer on pore characteristics and thermal conductivity of geopolymer foam material. *Journal of Building Engineering*, 20 (11), 21-29.
- Çolak, A., 2000, Density and strength characteristics of foamed gypsum. *Cement & Concrete Composites*, 22(3), 193–200.
- Degirmenci, N., 2008. Utilization of phosphogypsum as raw and calcined material in manufacturing of building products. *Construction and Building Materials*, 22(8), 1857– 1862.
- Demir, I. and Başpınar S. M., 2008. Effect of silica fume and expanded perlite addition on the technical properties of the fly ash-lime-gypsum mixture. *Construction and Building Materials*, 22(6), 1299–1304.
- Gencil, O., del Coz Diaz, J.J. and Sutcu, M., 2014. Properties of gypsum composites containing vermiculite and polypropylene fibers: numerical and experimental results. *Energy and Buildings*, 70, 135–144.

Huanga, B., Zhangb, Y. and Lic, D., 2013. Study on the Influences of Foaming Gypsum's Performance. *Materials Science Forum*, 743-744, 222-227

Knott, E.D., Foaming plaster. Patent US 20090324931, 2005.

Lee Y. L. , Oh C. H., Lim M. H. and Lee F. W., 2018. Engineering Properties of Foamed Concrete Containing Water Repellent. *E3S Web of Conferences* 65, International Conference on Civil and Environmental Engineering (ICCEE 2018), 26 November 2018. Volume 65.

Rubio-Avalos, J.C., Manzano-Ramirez, A., Yanez-Limon, J.M., Contreras-Garcia, M.E., Alonso-Guzman, E.M. and Gonzalez-Hernandez, J., 2005. Development and characterization of an inorganic foam obtained by using sodium bicarbonate as a gas generator. *Construction and Building Materials*, 19(7), 543–549.

Tesárek, P., Drchalová, J., Kolísko, J., Rovnaníková, P. and Černý R., 2007. Flue gas desulfurization gypsum: study of basic mechanical, hydric and thermal properties. *Construction and Building Materials*, 21(7), 1500–1509.

Vimmrová, A., Nazmunnahar, M. and Černý R., 2014. Lightweight gypsum-based materials prepared with aluminum powder as foaming agent. *Cement WapnoBeton*, 19(5), 299–307.