

Genleştirilmiş perlitin ısı yalıtım teknolojilerinde kullanılabilirliğinin incelenmesi

An investigation of usability of expanded perlite in heat insulation technologies

Onuralp ULUER¹, İbrahim KARAAĞAÇ¹, Mustafa AKTAŞ², Gökhan DURMUŞ³, Ümit AĞBULUT^{4*},
Ataollah KHANLARI⁵, Damla Nur ÇELİK⁶

¹İmalat Mühendisliği Bölümü, Teknoloji Fakültesi, Gazi Üniversitesi, Ankara, Türkiye.

uluer@gazi.edu.tr, ibrahimkaraagac@gazi.edu.tr

²Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü, Teknoloji Fakültesi, Gazi Üniversitesi, Ankara, Türkiye.

mustafaaktas@gazi.edu.tr

³İnşaat Mühendisliği Bölümü, Teknoloji Fakültesi, Gazi Üniversitesi, Ankara, Türkiye.

gokdur@gmail.com

⁴Makine ve İmalat Mühendisliği Bölümü, Teknoloji Fakültesi, Düzce Üniversitesi, Düzce, Türkiye.

umitagbulut@duzce.edu.tr

⁵Fen Bilimleri Üniversitesi, Gazi Üniversitesi, Ankara, Türkiye.

ata_khanlari@yahoo.com

⁶İnşaat Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Antalya Bilim Üniversitesi, Antalya, Türkiye.

damla.clk.92@gmail.com

Geliş Tarihi/Received: 09.03.2017, Kabul Tarihi/Accepted: 02.08.2017

* Yazışılan yazar/Corresponding author

doi: 10.5505/pajes.2017.61687

Derleme Makalesi/Review Article

Öz

Artan nüfusla birlikte enerji ihtiyacındaki artış, enerji kaynaklarının etkili ve verimli değerlendirilmesini zorunlu hale getirmektedir. Uluslararası projeksiyonlara göre, bilinen rezervlerle dünyadaki en etkili enerji kaynaklarının yaklaşık 100 yıllık ömrü olduğu öngörülmektedir. Enerji kullanımının büyük bir kısmının binalarda olduğu gerçeği, birçok araştırma ile tespit edilmiş olup en büyük kayıp, ısı enerjisinde olmaktadır. Binalardaki ısı enerjinin korunması açısından ısı yalıtım malzemelerine olan ihtiyaç her geçen gün artmaktadır. Bu ihtiyaçları karşılamak için yeni teknoloji ve yeni malzeme arayışları sürmektedir. Bu çalışmada, dünya rezervlerinin %74'ü ülkemizde bulunan perlitin yapı sektöründe ısı yalıtım amacıyla doğrudan ve/veya diğer yapı malzemelerinin ısı özelliklerini iyileştirilmek amacıyla takviye malzemesi olarak kullanılabilirliği araştırılmıştır.

Anahtar kelimeler: Genleştirilmiş perlit, Enerji, Isı yalıtım

Abstract

The growth of global human population has increased the world energy demand and made it necessary to evaluate effectively and efficiently usage of energy sources. According to the international energy research projections' data, world's energy reserves will be ended in the next 100 years. The fact that the large portion of energy consumption is used in buildings for heating. Therefore, saving that energy is so important in buildings and the need for thermal insulation materials has increased day by day. The investigation of new technologies and new materials has already been continued for thermal insulation. In this study, using of the perlite, whose 74% of the world reserves are in Turkey, in building sector directly as an insulation material and/or reinforcing material in other building materials has been investigated.

Keywords: Expanded perlite, Energy, Thermal insulation

1 Giriş

Enerji israfının önlenmesi, enerjinin etkin kullanılması için özellikle binalarda ısı yalıtımını önemli bir yere sahiptir. Ülkemizdeki yüksek yapı stokları ve inşaat sektöründe hızlı büyüme, ısı yalıtımının önemini fazlasıyla anlatmaktadır. Yerli malzeme ve teknoloji kullanılarak üretilecek yeni nesil yalıtım malzemeleri de bu anlamda büyük önem taşımaktadır.

Genleştirilmiş perlit (GP), genel olarak 750-1100 °C arasında sıcaklığa kadar ani bir şekilde ısıtılan ham perlitin genleştirilmesiyle elde edilen gözenekli, düşük yoğunluklu, inci parlaklığında asidik, volkanik bir camdır. Ham perlit taneciği genleştirildiğinde hacimce yaklaşık olarak 10-30 kat büyümektedir [1]. GP Tablo 1'de verilen bileşenlerden oluşmaktadır.

Tablo 1 incelendiğinde GP'i oluşturan bileşenler arasında nitrat, sülfat, fosfor, ağır metal, radyoaktif element ve organik

madde olmadığı görülmektedir. Dolayısıyla GP kimyasal olarak oldukça saftır. Ayrıca, GP, organik bir yapıya sahip olmadığı için çok uzun ömürlüdür ve sahip olduğu üstün özellikleri, uzun süreler boyunca taşıyabilme kabiliyetine sahiptir.

Tablo 1: Genleştirilmiş perlitin bileşenleri [2].

Madde	Oran (%)
SiO ₂	71.0-75.0
Al ₂ O ₃	12.5-18.0
Na ₂ O	2.9-4.0
K ₂ O	4.0-5.0
CaO	0.2-0.5
Fe ₂ O ₃	0.1-1.5
MgO	0.03-0.5

GP'in fiziksel ve kimyasal özellikleri göz önüne alındığında beyaz renkli olmasıyla birçok yapı malzemesine estetik bir görünüm kazandırabilir niteliktedir. pH aralığı 6.6-8 arasında olduğundan kimyasal olarak nötrdür, tepkimeye girmez. Bu

nedenle, GP gıda, ilaç ve kimyasal madde üretiminde de kullanılabilir. GP, inşaat sektöründe yalıtım, tekstil sektöründe ağartıcı, tarımda ekonomik sulama, sanayide fırın izolasyon uygulamalarında ayrıca gıda, ilaç ve diğer kimyasal maddelerin üretimi gibi birçok alanda kullanılmaktadır. GP inşaat sektöründe ısı yalıtım amacıyla ana malzeme olarak kullanıldığı gibi bina donatılarında yük azaltıcı katkı malzemesi olarak da kullanılabilir. Özellikle inşaat sektöründe yüksek performanslı hafif betonların üretiminde agrega veya bağlayıcılık özelliği kazandıran puzolanik malzemeler ile birlikte kullanılabilir [3]-[7]. GP'in yoğunluğu diğer yapı malzemelerine (çimento, agrega vb.) göre oldukça düşük olduğu için hem yapılarda ölü yükün azaltılmasında hem de üretilen malzemenin termal özelliklerinin iyileştirmesinde önemli rol oynamaktadır. GP'in ısı iletim katsayısı düşük olduğundan üretilen betonun termal özelliklerini de iyileştirme kabiliyetine sahiptir. GP'in en önemli avantajı yüksek sıcaklığa dayanımı ve yanmazlığıdır (Tablo 3). Bilindiği üzere beton 300 °C'den sonra yapısal bozulma gösterirken GP, 870 °C sıcaklığa bozulmadan dayanabilmektedir. Bu özellik ısı yalıtım malzemelerinde aranan en önemli özelliklerden biridir.

Düşük ısı iletim katsayısı, düşük yoğunluk, yanmazlık ve yüksek ses emme kabiliyeti gibi üstün özellikler GP'e iyi bir yalıtım malzemesi olma potansiyeli kazandırmaktadır. Bu çalışmanın ana amacını GP'in ısı yalıtım malzemesi olarak kullanılabilirliği oluşturmaktadır. Tablo 2'de GP ve diğer ısı yalıtım malzemelerinin ısı iletim katsayısı ve yanma özellikleri karşılaştırılmıştır Tablo 3'te GP'in özgün özellikleri verilmiştir.

Tablo 2 ve 3 incelendiğinde, GP'in hem ısı yalıtım amacıyla hem de ses yalıtım amacıyla kullanılabilir özellikleri bünyesinde barındırdığı açıkça görülmektedir.

İnşaat sektöründeki geleneksel ısı yalıtım uygulamalarında genellikle EPS (Expanded Polystyrene Foam), XPS (Extruded Polystyrene Foam), PIR (Polyisocyanurate), PUR (Rigid Polyurethane), PUR/PIR ve taşıyıcı kullanıldığı görülmektedir. Bu malzemelerin tutuşma sıcaklıkları göz önüne alındığında, taşıyıcı hariç olmak üzere diğer malzemelerin tutuşma sıcaklığı 245-415 °C arasında olduğu bilinmektedir. A1 sınıfı yanmaz GP ise 1100 °C'de erimekte, yapısal bozulması 870 °C'den sonra başlamaktadır (Tablo 3). Ülkemizde son dönemlerde çok sayıda yurt, hastane, okul ve benzeri kamu kuruluşu yangına bağlı olarak hasar görmüştür. Bu yangın hasarlarında, ticari ve mal kaybını artıran en önemli etken ısı yalıtım malzemelerinin sıcaklığa bağlı olarak tutuşması ve yangının daha çok yayılmasına neden olmasıdır. GP yangın sıcaklığını 3 sa. kadar geciktirebilmektedir (Tablo 3). Bu nedenle ısı yalıtım panellerinde GP'in kullanılması yangına direnç açısından önem arz etmektedir. Bu sayede kamu kurum ve kuruluşları başta olmak üzere yangına maruz kalan ortamlardan insanların binayı güvenli bir şekilde boşaltması için yeterli zamanı kazandırmaktadır. Ayrıca kamu kurum ve kuruluşlarında bulunan özel evrak ve eşyaların depolandığı alanlarda GP kullanımı, yangın esnasında bu eşyaların güvenli bir yere taşınmasına da fırsat verebileceğinden ayrı bir öneme sahiptir.

Hali hazırda yaygın kullanılan ısı yalıtım malzemelerinin diğer bir olumsuz tarafı ise zamana bağlı olarak ısı iletim kabiliyetlerinin artmasıdır. EPS, XPS ve poliüretan köpükleri gibi yalıtım malzemelerinin gözenekleri içerisinde bulunan ve ısı iletim katsayısı çok düşük olan gazların zamanla hava ile yer değiştirmesi sonucu bu malzemelerin ısı iletim katsayısı yükselmektedir. Aydın ve Ekmekçi (2002) yaptıkları çalışma

da, 5 yıl boyunca poliüretan köpüklerinin ısı iletim katsayıları test etmiş ve poliüretan köpüklerinin ısı iletim katsayı değerlerinin zamanla arttığını vurgulamışlardır [9]. Yeler ve diğ. (2015) yapmış oldukları çalışma ile poliüretan köpüklerinin zamana bağlı ısı iletim katsayılarının arttığını gösterir bir çalışma yapmışlardır. Bu çalışma da, poliüretan köpüklerine yanmazlık özelliği verilmesi için bor oksit kullanılmıştır. Poliüretan üretimi, harca %20 bor oksit eklenerek gerçekleştirilmiş ve yanmazlık özelliğinde kayda değer bir iyileşme görülürken ısı iletim katsayısı değerinde de önemli bir artış meydana gelmiştir [10]. Aksine, GP malzemesi, tamamen doğal gözenekli bir yapıya sahip olduğundan ısı özellikleri zamana bağlı olarak değişmemektedir. GP esaslı ısı yalıtım malzemelerinde bağlayıcı ve kütleme koşulları ısı iletim katsayısını etkileyebilmektedir.

Tablo 2: Farklı ısı yalıtım malzemelerinin özellikleri [8].

Isı Yalıtım Malzemesi	Isı İletim Katsayısı (W/m.K)	Yangına Tepki Sınıfı
Genleştirilmiş Perlit	0.040-0.065	A1
XPS (Ekstrüde Polistren Köpük)	0.030-0.040	D-E
EPS (Ekspande Polistren Köpük)	0.035-0.040	D-E
Cam Yünü	0.035-0.050	A1-A2'
Taş Yünü	0.035-0.050	A1-A2'
PUR (Poliüretan) ve PIR (Poliizosüenyurat)	0.025-0.040	B-C-D''/D-E'''
sert köpükler		
Fenol Köpüğü	0.030-0.045	B-C-D
Cam Köpüğü	0.045-0.060	A1-A2
Ahşap Yünü	0.035-0.076	B-C-D
Genleştirilmiş Mantar Levhalar	0.045-0.055	C-D-E
Ahşap Lifi Levhalar	0.035-0.070	C-D-E
Gazbeton Isı Yalıtım Levhası	0.042-0.050	A1

Tablo 3: Genleştirilmiş perlit agrega örneklerinin özgün özellikleri [2].

Özellik	Genleşmiş Perlit	Birim
Renk	Beyaz	-
Sertlik (MOHS Ölçeği)	5-5.5	-
Ph	6.6-8	-
Özgül Kütle	2.3	g/cm ³
Kuru Birim Hacim	40-220	kg/m ³
Ağırlık		
Su Emme	40-60	%
Doluluk Oranı	1.80-9.60	%
Gerçek Porozite	98.2-90.4	%
Zararlı Maddeler Analizi	Yok	-
Kükürt Analizi	0.34	%
Yapısal Bozunma	870	°C
Erime Noktası	1100	°C
Ateşe Dayanım	Yanmaz	-
Ateşe Geciktirme	3	sa.
Özgül Isı Kapasitesi	0.200-0.215	kcal/kg °C
Isı İletim Katsayısı	0.040-0.065	W/m.K
Ses Geçiş Katsayısı	0.25	-
Ses Yutuculuk	35-40	dB

GP esaslı yalıtım panelleri ve teknolojileri bir yalıtım malzemesinden beklenen özellikleri açısından analiz edildiğinde GP esaslı yalıtım panelleri çevrecidir. Yüksek sıcaklıklara dayanıklı olduğundan yangın ve buna bağlı oluşacak zehirli gaz tehlikelerinden uzak olduğu için güvenlidir. GP esaslı yalıtım panellerinin fiziksel görünümü, binalarda ve mekânlarda bütüncül bir yaklaşım sağlayacak olup bu yönüyle estetikdir. GP ve GP esaslı yalıtım panelini oluşturan hammaddeler tamamen yerli malzemeler oldukları için kolay ulaşılabilir. Tamamen yerli hammadde, yerli teknoloji kullanımı ve beraberinde uzun kullanım ömrü ile ekonomiktir. Ayrıca, ısıtma ve soğutma amaçlı başka sistemlerde de çözüm üretmeye yönelik ısı yalıtım amaçlı kullanılabilme potansiyelinin bulunması yönüyle de öncüdür.

Literatür incelendiğinde GP'in ısı yalıtımı amacına uygun olarak kullanılabilirliği ile ilgili ısı yalıtım paneli geliştirmeye yönelik çalışmalarına rastlanmaktadır. Çalışmalar incelendiğinde GP esaslı panellerin yapımındaki en önemli hususların uygun bağlayıcı ve bağlayıcının kullanım oranının tespiti, kalıplama ve kütleme şartlarının belirlenmesi olduğu görülmektedir.

2 Genleştirilmiş perlit ve perlit malzemelerinin bağlanması

Gelişen teknolojiye rağmen GP esaslı ısı yalıtım panellerinin oluşturulma aşamasında bağlayıcı mekanizması tam olarak belirlenmemiştir. Ancak, literatür incelendiğinde GP için genellikle sodyum silikat, sodyum hidroksit, potasyum silikat, potasyum hidroksit gibi alkali çözeltilerin bağlayıcı olarak kullanıldığı görülmektedir.

Vaou ve Panias (2010) geopolimerizasyon yöntemiyle toz ham perlit kullanarak ısı yalıtım malzemesi üretmiştir. Yapılan çalışmada, hidrojen peroksit (H_2O_2) kullanılarak gözenekli bir yapı oluşturulmaya çalışılmış ve oluşan gözeneklerin ısı özelliklerine etkisi araştırılmıştır. Ham perlit kullanılarak oluşturulan geopolimer köpük malzemenin GP kullanılarak oluşturulan geopolimer köpük malzemeye göre yalıtım malzemesi olarak daha uygun olduğunu belirtmişlerdir. Geliştirilen ısı yalıtım malzemesinin ısı iletim katsayısı $0.03 W/m.K$ olarak ölçülmüştür. Basınç dayanımı $780 kPa$ 'da %2 deformasyon göstermiştir. DIN4102 standardına göre A1 sınıfı yanmaz malzeme üretilmiştir. Maksimum uygulanma sıcaklığı $700 ^\circ C$ 'dir [11].

Arifuzzaman ve Kim (2014) GP esaslı yalıtım malzemesi geliştirmiş ve mekanik özelliklerini deneysel olarak araştırmışlardır. Bağlayıcı olarak sodyum silikat kullanılmıştır. Sodyum silikat; yanmaz, suya karşı dirençli ve nispeten ucuz bir bağlayıcıdır. GP parçacıkları üç gruba ayırarak ve dört farklı yoğunluk ölçümü gerçekleştirilmiştir. Basınç dayanımının sıkıştırma basıncı ve bağlayıcı oranına bağlı olduğu tespit edilmiştir. Sıkıştırma basıncı arttıkça, yoğunluğun arttığı görülmüştür. Katkı malzeme olmaksızın $0.3 g/cm^3$ elde edilen basma dayanımı $1 MPa$ olarak elde etmişlerdir [12].

Gharzouni ve diğ. (2015) iki farklı alkali çözelti ve 4 farklı tür metakaolin kullanarak karışımları hazırlamışlar ve karışımların farklı oranlarındaki alkali aktivasyonunun geopolimer üzerine etkisini araştırmışlardır. Oluşturulan alkali çözelti potasyum hidroksit ve amorf silika suda çözülerek oluşturulmuştur. Potasyum silikat ve potasyum hidroksit kullanılan çözeltinin sodyum silikat ve sodyum hidroksit kullanılan çözeltiye göre daha yüksek mekanik özellikler kazandırdığı gözlemlenmiştir. Si/K oranı azaldıkça çözelti daha fazla depolimerize olmuştur. Reaksiyon kinetiğinin ve

konsolidasyon zamanının direkt olarak metakaolinin reaktifliğine ve alkali çözeltiye bağlı olarak değiştiği ölçülmüştür. Bu çalışmaya dayanarak GP esaslı geopolimer elde ederken potasyum silikat ve potasyum hidroksit kullanılarak mekanik özelliklerinin iyileştirilebileceği anlaşılmaktadır [13].

Erdoğan (2011) GP'in portland çimentosunda olduğu gibi alkali aktivatörlerle karıştırılabilmesi üzerine çalışmışlardır. Perlit doğal malzeme olduğu için perlit geopolimerleri portland çimentosuna göre çevresel, enerjik ve ekonomik avantajlara sahiptirler. Elde edilen sonuçlara göre, perlitin etkili doğal puzolan olduğu ve aynı zamanda kullanılarak geopolimerik bağlayıcıların üretilebileceğini tespit etmişlerdir. Bununla birlikte sodyum hidroksit çözeltilerinin tek başlarına kullanılmalarıyla yüksek dayanımlı geopolimer hamurunun elde edilemeyeceği gözlemlenmiştir. Sodyum hidroksit'in sodyum silikat ile karışımı veya sodyum silikatın tek başına kullanılması daha yüksek dayanıma sahip karışımların elde edilmesini sağlamıştır. Mekanik özellikler için gerekli olan koşulun kuru kütleme olduğunu belirtmişlerdir. Kütleme sıcaklığı $1000 ^\circ C$ civarındayken en yüksek basınç ve eğilme dayanımına ulaşılmıştır. Aynı zamanda perlit geopolimerleri ekonomik ve çevresel açıdan diğer ürünlere göre daha üstün olabileceği saptanmıştır [14].

Shastri ve Kim (2014) GP parçacıklarını bağlamak için nişasta kullanmışlardır. Nişasta kullanılarak bağlanan GP esaslı köpük malzemenin, yoğunluğu dayanımı ve basınç modülü alçı köpüğü ile kıyaslanmıştır. Üretilen perlit köpüğünün basma yükleri altındaki kırılma mekanizmaları tespit edilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, yüksek yoğunluklu perlit köpüğü için daha fazla hasara rastlanmıştır. Perlit köpüğünün $0.3 g/cm^3$ yoğunluğundaki basınç dayanımının, $0.7-0.9 g/cm^3$ yoğunluklara sahip alçı köpüğü ile benzer olduğu tespit edilmiştir [15].

3 Kalıplama ve kütleme şartları

Genleştirilmiş perlit esaslı ısı yalıtım panellerinin üretimindeki bir diğer önemli husus ise sıkıştırma/kalıplama basıncıdır. Sıkıştırma basıncı GP esaslı ısı yalıtım panellerinin mekanik özelliklerini iyileştirici etkiye sahiptir. Fakat sıkıştırma ile birlikte artan yoğunluk, GP'in ısı iletim katsayısını yükseltici bir etki göstermektedir. Tian ve diğ. (2013) sıkıştırma basıncı ve kütleme sıcaklığının, GP esaslı ısı yalıtım levhalarının yoğunluk ve mekanik özellikleri üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Elde edilen sonuçlara göre sıkıştırma basıncı arttıkça GP'li ısı yalıtım levhasının yoğunluğu ve basınç dayanımı da artmıştır. Eğilme ve çekme dayanımı maksimum değerine, sıkıştırma basıncı değeri $0.38 MPa$ 'dayken ulaşmıştır. Kütleme rezistanslı bir elektrikli fırın içerisinde $85-105 ^\circ C$ sıcaklığında yapılmıştır [16].

GP'in ısı iletim katsayısının düşük olduğundan kütleme esnasında sıcaklık panelin iç kısımlarında düşük olmaktadır. Bu nedenle panelin iç kısımları istenilen kütleme şartlarına ulaşamamaktadır.

Skubic ve diğ. (2012) GP esaslı yalıtım panellerinin mikrodalga ile kürlenmesini incelemişlerdir. Konveksiyon esasına dayalı kurutma yöntemlerinde ısı, ürünün yüzeyinden merkezine doğru hareket etmektedir. Bu nedenle ısı yalıtım özelliği taşıyan bir malzemenin, geleneksel yöntemler ile kürlenmesi oldukça zordur ve uzun zaman alır. Mikrodalga, ürünün içine nüfuz ederek hızlı ve homojen kürlenmeyi sağlamaktadır [17]. Kürlenmenin son aşamasında, ürünün hasar görmemesi için

doğru zamanda uygulamanın sonlandırılması çok önemli olduğu çalışmada vurgulanmıştır.

Skubic ve diğ. (2013) geliştirilmiş perlitlen yapılmış yalıtım panellerinin kütleme sıcaklığını sonlu farklar yöntemini kullanarak matematiksel bir model ile sunmuşlardır. Deneysel sonuçlar ile simülasyondan elde edilen değerleri karşılaştırılmıştır. Çalışmada sodyum silikat ve GP karıştırılmıştır. Elde edilen GP numunelerin ısı iletim katsayısı 0.045 W/m.K olarak ölçülmüştür. Bağlayıcı olarak kullanılan sodyum silikat oranı kütlece %30 olan numunelerin optimum kütleme sıcaklığı 700 °C olarak belirlenmiş ve bu malzemenin ısı iletim katsayısı 0.0503 W/m.K olarak ölçülmüştür [18].

Milano ve diğ. (1996) atmosferik koşullar altında sıcaklığa bağlı olarak GP esaslı malzemenin termofiziksel özelliklerini incelemişlerdir. Numuneler, atmosferik basınç 5 µbar oluncaya kadar kuru hava ile doldurulmuş ve testler gerçekleştirilmiştir. Sıcaklık aralığı numuneler için 17-117 °C arasında değişmektedir. Sonuçlar, vakum koşullarında (5 µbar) açık gözenekli bir malzeme olan GP esaslı panelin ısı iletim katsayısı 17-117 °C sıcaklıkları arasında 0.01-0.02 W/m.K olarak ölçülmüştür. Atmosferik basınçtaki ısı iletim katsayısının aynı sıcaklık değerleri için 0.04-0.05 W/m.K olarak ölçülmüştür. Sonuçlar, atmosferik şartlarda ısı iletim katsayısının yaklaşık dört kat daha fazla olduğunu göstermektedir [19].

4 GP'in katkı/Takviye malzemesi olarak kullanılması

GP'in betonun mekanik ve termal özelliklerini iyileştirmek için katkı/takviye malzemesi olarak kullanıldığı da görülmektedir. GP'nin ısı iletim katsayısı diğer katkı malzemelerine göre düşük olduğundan GP kullanılarak üretilen yapı malzemelerinin deney sonuçlarına göre ısı iletim katsayıları geleneksel yapı malzemelerine göre oldukça düşüktür. Demirboğa ve Gül (2003) silika dumani, uçucu kül ve GP gibi katkıların hafif betonun ısı iletim katsayısına etkileri üzerine çalışmışlardır. Çalışmada GP ve pomza agregalarından oluşan betonların ısı iletim katsayıları ölçülmüştür. Silika dumani ve uçucu külün GP içeren hafif agregalı betonun ısı iletkenliği üzerindeki etkisini belirlemek için çimento ağırlıklarını %10, %20 ve %30 oranlarında azaltılarak karışıma ilave etmişlerdir. Sadece pomza agregası ve çimento içeren numunelerde en yüksek ısı iletim katsayısı 0.3178 W/m.K olarak elde ölçülürken, %70 oranında pomza agregasıyla yer değiştiren GP agregası ve %30 uçucu kül içeren numunenin ısı iletim katsayısı 0.1472 W/m.K olarak ölçülmüştür. GP katılımıyla betonun ısı iletim katsayısında %43.52'lik bir azalma meydana gelmiştir [20].

Azizi (2007) çalışmasında, farklı yoğunluklarda üretilen perlit katkılı hafif beton numunelerinin ısı iletkenlik değerleri ile yoğunluk arasındaki ilişkiyi incelemiştir. Deney sonuçlarına göre GP ve hafif betonların ısı iletkenlikleri ve yoğunlukları arasında doğru orantılı bir ilişki olduğu ortaya konulmuştur [21].

Şengül ve diğ. (2011) GP agregası içeren, hafif betonun mekanik özelliklerinin değişimi ile ısı iletkenliğinin değişimini incelemişlerdir. Deneysel çalışmada, doğal agregalar yerine yoğunluğu 700 ile 2000 kg/m³ ile değişen GP agregası kullanılmıştır. Yapılan çalışmada, GP agregasının artmasıyla, basınç dayanımı ve elastisite modülünün de arttığı gözlemlenmiştir. Doğal agregaya yerine %80 oranında GP agregası kullanılan deney sonuçlarında ısı iletim katsayısı 0.6 W/m.K değerinden 0.13 W/m.K değerine azalmıştır [3].

Gandage ve diğ. (2013) GP'in kendinden sıkışan betonun ısı özelliklerine etkisini değerlendirmek için çalışmalar yapmışlardır. Çimento yerine uçucu kül, ince kum yerine ise GP kullanarak bir malzeme elde etmişlerdir. Elde edilen malzemenin ısı iletim katsayısı ölçülmüştür. Deney sonuçlarına göre, uçucu kül ve perlit ilavesi karışımın yoğunluğunu azaltmıştır ve tüm sıcaklık aralıklarında beton karışımlarının ısı iletim katsayısı değerleri azalmıştır. Düşük sıcaklıktaki ısı iletim katsayısı değerleri, yüksek sıcaklıktaki ısı iletim katsayısı değerlerine göre daha yüksektir. Çalışmanın sonucunda en düşük ısı iletim katsayısı %20 uçucu kül ve %10 perlit karışımında 70-80 °C arasında 0.715 W/m.K olarak ölçülmüş, aynı sıcaklık aralığında %100 çimento içeren karışımın ısı iletim katsayısı ise 1.114 W/m.K olarak ölçülmüştür [22].

Sun ve Wang (2015) çimento harcının mekanik ve termal özelliklerini iyileştirmek için parafin ve GP kullanmıştır. Çimento, parafin ve GP doğrudan karıştırılmış ve karışımın mekanik ve termal özellikleri araştırılmıştır. Deneysel sonuçlara göre parafin kılcal kuvvetle GP'in gözenekli yapısına hapsedilmiş ve parafin-GP içerisindeki parafinin kütlece oranı %65'e ulaşmıştır. Çimento harcının basma ve eğilme dayanımları parafin-geleştirilmiş perlitin oranının artmasıyla azalmıştır. Çimento içindeki parafin/genleştirilmiş perlitin optimum oranı %20 olarak tespit edilmiştir. Bu oranlara uygun olarak elde edilen karışımların ısı iletim katsayıları 0.52 W/m.K değerine düşürülmüştür. Sonuç olarak sisteme GP ilave edilmesi ısı iletim katsayısına olumlu etki ederken, mekanik özelliklerini ise olumsuz yönde etkilemiştir [23].

GP tuğla ve MDF (Medium-density fibreboard) gibi yapı malzemelerinin üretilmesinde de hem hafif agrega hem de katkı malzemesi olarak kullanılmaktadır. Topçu ve Işıkdag (2007) yapılar da ısı yalıtımının başarılı bir şekilde sağlanması için gereken metodları araştırmışlardır. Isıl ve akustik izolasyon özellikleri bulunan GP'in, tuğla imalatında hafif agrega olarak kullanılabilir en iyi malzemelerden birisi olduğu bilinmektedir. Bu nedenle, kil içeriğine %0 ile %50 arasında perlit ilave edilerek mekanik ve ısı özellikleri araştırılmıştır. Farklı kompozisyonlara sahip perlit içeren tuğlaların özellikleri belirlenmiştir. Deney sonuçlarına göre basınç dayanımı 5.8 MPa olan normal tuğla GP içeriğinin artmasıyla 2.0 MPa değerine düşmüştür. Fakat normal bir tuğlanın ısı iletim katsayısı 0.465 W/m.K iken, %30 perlit içeren tuğlanın ısı iletim katsayısı 0.215 W/m.K değerine azalmıştır. Sonuç olarak, ısı iletimi ve mekanik özellik bakımından en iyi karışımın %30 GP içeren karışım olduğu belirtilmiştir [4].

Demir ve Baspınar (2008) uçucu kül-kireç-alçı karışımından yapılmış çimentoya eklenen hafif bloklara farklı puzolan ilavelerinin etkisini araştırmış ve fiziksel, mekanik, ısı özellikleri ve mikroyapısındaki değişimleri araştırmışlardır. Mekanik özellikler, hidrotermal küre koşulları ve süper akışkanlaştırıcı eklenerek iyileştirilmiştir. Uçucu kül-kireç-alçı karışımının ısı iletim katsayısı, GP'in eklenmesiyle azalmış olmakla birlikte en ideal mekanik özellikler silika dumani ilave edilerek elde edilmiş ve ısı iletim katsayısı da 0.146 W/m.K olarak ölçülmüştür [24].

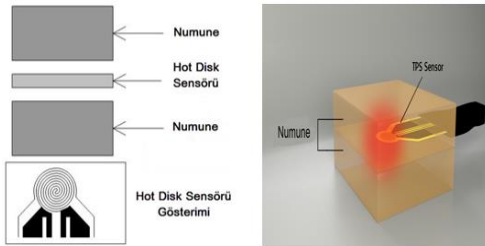
Maaloufa ve diğ. (2016) binalarda ısı yalıtımı sağlamak amacıyla GP katkılı tuğlaların ısı özelliklerine kalsinasyon etkisini araştırmışlardır. Yapılan çalışmada, tuğlalar GP ilave edilerek üretilmiş ve yoğunluk değerleri 2029 kg/m³'ten 1450 kg/m³'e düşmüştür. Sadece GP ilavesiyle birlikte yoğunluktaki azalmaya bağlı olarak ısı iletim katsayısı 0.51 W/m.K'den 0.38 W/m.K değerine azalmıştır. Daha sonra

bu numunelere kalsinasyon işlemi uygulanmış ve yoğunluk değeri 1374 kg/m³ değerine, ısı iletim katsayısı değeri de 0.258 W/m.K değerine düşmüştür. Böylece mevcut tuğlalara GP ilavesi ile daha iyi bir ısı yalıtım malzemesi elde edilmiştir. Maaloufa ve diğ. yapmış oldukları bu çalışma ile yoğunluk ve ısı iletim katsayısı arasında doğrusal ilişki olduğunu, Demirboğa ve Gül'ün yapmış oldukları çalışma ve Azizi'nin yaptığı tez çalışmasında da olduğu gibi açıkça ortaya koymaktadırlar [25].

Yapıcı ve diğ. (2011) yaptıkları çalışmada, GP'li MDF'den oluşan kompozit panel yüzeylerine, kaplama malzemesi olarak da ham malzeme içerisine farklı oranlarda eklenerek nihai ürünün ısı iletim katsayısına etkisini yorumlamışlardır. Yapılan çalışmada, GP ilave edilmeyen MDF panellerin ısı iletim katsayısı 0.222 W/m.K' dir. Çalışma kapsamında 13 adet farklı numune hazırlanmış ve bu numunelere ilave edilen GP'in ürünün ısı iletim katsayısında büyük değişiklikler meydana getirdiği gösterilmiştir. Elde edilen GP takviyeli numunelerin ısı iletim katsayıları 0.197 ve 0.222 W/m.K arasında ölçülmüştür. %1 GP ile yüzey kaplaması yapılan numune en düşük ısı iletim katsayısı değerine sahip numune olmuştur [26].

5 Isı iletim katsayısının deneysel ölçülmesi ve teorik modellerle belirlenmesi

Malzemelerin ısı iletim katsayısı sıcak disk (hot disc), sıcak plaka (hot plate) gibi düzeneklerle ölçülebilmektedir (Şekil 1-2). Bununla birlikte literatürdeki çalışmalar incelendiğinde özellikle kompozit malzemelerin ısı iletim katsayılarını belirlemeye yönelik, malzeme bileşenlerini ve oranlarını dikkate alan matematiksel modellerin geliştirildiği ve kullanıldığı da görülmüştür [27],[28]. Genellikle, ısı yalıtım paneli-harç kompozisyonlarının deneme yanılma esasına göre belirlenmesi, çalışmalarda sık karşılaştırılan bir durumdur. Oysaki bu harç kompozisyonlarından oluşacak ısı yalıtım levhalarının ısı iletim katsayılarını ön tasarım aşamasında tahmin etmeye yönelik bazı modellerin kullanılması mümkündür. Bu modellerin kullanılması, ısı iletim katsayısının daha harç kompozisyonu oluşturma aşamasında yaklaşık olarak hesaplanabilmesine ve deneme-yanılmaya dayalı gereksiz malzeme tüketiminin engellenmesine yardımcı olabileceği niteliktedir.



Şekil 1: Hot disk metodu ile ölçüm.



Şekil 2: Hot plate metodu ile ölçüm.

He (2005) ısı iletim katsayısını hızlı bir şekilde ölçmek için sıcak disk metodunu geliştirmiştir. Sıcak disk tekniğinde geçici bir düzlem kaynak kullanılarak iletim katsayısı ölçülmektedir. Bu metodun avantajları; geniş ölçüm aralığı

(0.005-500 W/m.K), katı ve sıvıların ısı iletim katsayılarının ölçme kabiliyeti, numunelerin kolay hazırlanabilmesi, numuneyi bozmaması ve hassasiyetinin yüksek olmasıdır. Sıcak plaka sensörü çift spiral ince nikel telden (10 µm) oluşmaktadır. Sıcak plaka metodu ve diğer geçici kaynak tekniklerinde ısı kaynağı olarak ince bir metal tel şerit ya da bir metal plaka kullanılır. Metal plaka veya metal tel şerit, elektrik yalıtımı için iki ince poliamid film arasında tutulmaktadır. Ölçüm sırasında, sıcak disk iki numune parçası arasında sıkıştırılır ve sensöre sabit bir akım verilir. Ek olarak sensör sıcaklık gözlemi yapar, böylece sensörde sıcaklık artışı hassas bir şekilde ölçülmektedir. Bu sıcaklık artışı sensörün etrafındaki malzemenin ısı özelliklerine bağlıdır. Deneyi başlattıktan kısa bir süre içerisinde bu sıcaklık artışını izleyerek sensörün çevresindeki malzemenin ısı iletim katsayısı ölçülür [29],[30].

Chudzik (2012) ısı yalıtım malzemelerinin ısı özelliklerini belirlemek için bir yöntem geliştirmiştir. Bu yöntemde periyodik ısıtma uygulanıp, infrared kamera ile görüntülenen malzemenin üzerindeki sıcaklık dağılımı kaydedilmektedir. Kaydedilen sıcaklık değerleri kullanılarak ısı iletim katsayısı belirlenmektedir [31].

Jannot ve diğ. (2009) düşük yoğunluklu ısı yalıtım malzemelerinin ısı iletim katsayılarını ölçmek için bir metod geliştirmişlerdir. Pulse yöntemine dayanarak üç katmanlı (pirinç plaka/numune/pirinç plaka) bir ölçüm kullanmışlardır. Ölçüm cihazında silindirik numune iki pirinç plaka arasına yerleştirilmiştir. İki adet K tipi ısı çift pirinç plakaların iç yüzeyine kaynatılmıştır. Alt plaka aynı çapta ve yalıtılmış olan başka bir dairesel plaka ile ısıtılmaktadır. Üstteki pirinç plakanın üzeri açıktır ve çevresiyle olan ısı transferi doğal taşınım ve ışınım yoluyla gerçekleşmektedir. Isıtılan plakaya bir kaç saniye süreyle ısı akışı verilir, pirinç plakaların sıcaklıkları kaydedilmektedir. Bu veriler kullanılarak ısı iletim katsayı değerleri yaklaşık olarak hesaplanabilmektedir [32].

Isı iletim katsayısının deneysel ölçülmesi özellikle kompozit yapı malzemeler için en iyi sonuç elde etme yöntemidir. Bununla birlikte deneysel yöntemlerin her biri yöntemine uygun numune üretilmesine ihtiyaç duyar. Bu, özellikle çok küçük numuneler ve çok değerli malzemeler için ya çok pahalıdır ya da mümkün değildir. Isı iletim katsayısını malzeme bileşenlerinin özelliklerini ve karışımdaki oranlarını kullanarak yaklaşık tahmin etmek üzere bazı matematiksel modeller geliştirilmiştir [27]. GP'li malzeme için en uygun modeller seri model, paralel model ve geometrik ortalama modeldir [33].

Seri model

$$k_{e(seri)} = [(V_d/k_d) + (\epsilon/k_s)]^{-1} \quad (1)$$

Paralel model

$$k_{e(paralel)} = (V_d \cdot k_d) + (\epsilon \cdot k_s) \quad (2)$$

Geometrik ortalama model

$$k_e = (k_s)^\epsilon k_d^{(1-\epsilon)} \quad (3)$$

Burada, ke, ks, kd sırasıyla kompozit malzemenin ısı iletim katsayısı, ana matrisin ısı iletim katsayısı ve katkı elemanın ısı iletim katsayısını temsil etmektedir. ε ve Vd ise sırasıyla, ana matrisin hacimsel oranını ve katkı elemanın hacimsel oranını temsil etmektedir.

GP ile yapılmış ısı yalıtım kompozit panellerinin ısı iletim katsayısı bu modeller kullanılarak yaklaşık olarak hesaplanabilmektedir.

Uluer ve diğ. (2017) yapmış oldukları çalışmada GP esaslı ısı yalıtım panellerinin ısı iletim katsayılarını deneysel olarak ölçmüş ve teorik modellerle hesapladıkları ısı iletim katsayısı değerlerinin sonuçları ile karşılaştırmışlardır. Deneysel veriler ile teorik hesaplamalarla elde edilen değerler için en yakın sonuç paralel model ile elde edilmiştir. Paralel modelden elde edilen sonuçların deneysel olarak ölçülen sonuçlar ile arasındaki sapma %1-6 arasındadır. Bu sapmanın, modellerde malzeme özelliklerinin yanı sıra kalıplama şartlarını (sıkıştırma kuvveti, ütüleme süresi vb.) ve kütleme şartlarını (kütleme ortamı, kütleme sıcaklığı, kütleme süresi, nem vb.) içerecek şekilde geliştirilmesiyle azaltılabileceği vurgulanmıştır [28].

6 GP esaslı malzemelerin kullanımında yaşanabilecek olumsuzluklar

GP, sahip olduğu ve önceki bölümlerde değinilen üstün özelliklerinin yanında, bir takım olumsuz özelliklere de sahiptir. Bunlar şu şekilde sıralanabilir:

- Ham perlitte uygulanan genleştirme işlemi sonucunda GP'in hacmi 10-30 kat oranında arttığından kütle ve hacim arasında çok büyük farklar meydana gelmektedir (yoğunluğu azalmaktadır). Bu nedenle, GP'in maden ocağından kullanıcıya ulaştırılma maliyeti yükselmektedir,
- Düşük yoğunluk GP'in özellikle katkı malzemesi olarak kullanıldığı uygulamalarda karışım içerisinde homojen olarak dağılımını olumsuz etkilemektedir,
- GP esaslı ürünler genellikle gevrek yapıdadırlar ve bu nedenle ürünlerin hem nakliyesi hem de son kullanıcı tarafından uygulanması sırasında polimer esaslı malzemelere göre daha titiz çalışılması gerekmektedir,
- Doğal gözenekli yapısı nedeniyle GP su emme özelliğine sahiptir [2]. Son ürüne dönüştürülme sırasında bu özelliği ortadan kaldıracak bir takım önlemlerin alınması gerekmektedir,
- Mevcut ısı yalıtım malzemelerinin uzun zamandır kullanılıyor ve kısmen ihtiyaçları karşılıyor olması, yeni bir ısı yalıtım malzemesinin toplum tarafından benimsenmesini ve tercih edilmesini zorlaştırmaktadır.

Tespit edilen bu olumsuz sayılabilecek özellikler, toplum tarafından benimsenen ısı yalıtım malzemelerinin kullanımı sırasında karşılaşılan "yanabilirlik ve yanma sonucunda ortaya çıkan zararlı gazlar gibi" olumsuz özellikler düşünüldüğünde olumsuzluk etkinin önüne geçmektedir. Yanabilirlik ve yanma sonucunda ortaya çıkan olumsuzluklar hem insan hayatına ve sağlığına hem de mal kaybına sebep olmaktadır. Bu ve benzer durumlar GP esaslı ısı yalıtım malzemelerinin birim maliyetlerini de daha avantajlı hale getirmektedir.

7 Sonuç ve öneriler

GP kararlı kimyasal yapıya sahiptir. Bu nedenle kimyasal reaksiyonlara girmez ve suda çözünmez. GP, sahip olduğu üstün özelliklerinden ve kimyasal kararlılığından dolayı, ilave edildiği karışımın kimyasal özelliklerine etki etmeden sistemin yoğunluğunu düşüren dolgu malzemesi ve/veya yanmayı

geciktirici, ısı ve ses emme özelliklerini iyileştirici bir katkı malzemesi olarak kullanılabilir özelliktedir.

İnorganik bir yapıya sahip olan perlit, düşük yoğunluk ve iyi ısı-ses yalıtım özelliklerinin yanı sıra, benzer mevcut polimer esaslı ısı yalıtım malzemeleri ile karşılaştırıldığında bu malzemelere yanmazlık özelliği ile üstünlük sağlamaktadır. Yanmazlığının yanında yüksek sıcaklıklarda uzun süre bozulmadan dayanabilme ve ısı yalıtım özelliğini koruyabilme özelliğine de sahiptir.

GP'in ısı yalıtım malzemesine dönüştürülmesinde en çok sodyum-silikat, sodyum-hidroksit, potasyum-silikat, potasyum-hidroksit ve bunların karışımlarından türetilen bağlayıcıların kullanıldığı literatürde görülmüştür. Bu bağlayıcıların karışıma ilave oranı genellikle hacimce %2.5-15 arasında değiştiği tespit edilmiştir. GP'i bağlamak için kullanılan bağlayıcı oranı arttığında mekanik mukavemet ve ısı iletim değerlerinin arttığı literatürden görülmüştür. İyi bir ısı yalıtım malzemesinden beklenen bu iki özellikten ısı iletimi değerinin düşük, mekanik mukavemet değerinin nispeten yüksek olmasıdır. Bu sebeple GP'i bağlamak için en uygun bağlayıcı oranının tayini son derece önemlidir.

Kalıplanan GP esaslı ısı yalıtım malzemelerinin kullanılabilir ürüne dönüşmesi aşamasında, kütleme prosesi diğer önemli bir husustur. GP ısı iletim katsayısı düşük olduğundan, kütleme esnasında ısının panel içerisine nüfuz etmesi oldukça zordur. Bu nedenle, numunelerin iç kısımları tamamen kürlenmemektedir. Bu sorunu gidermek için doğru kütleme sıcaklığı, kütleme süresi ve kürlenmenin yapılacağı ortam seçimi önemli bir parametredir. Kütlemede mikrodalga metodunun daha etkili olduğu literatürde bildirilmiştir. Bununla birlikte mikrodalga ile kütlemede süre oldukça önemli bir parametre olarak karşımıza çıkmaktadır. Fırın ortamında konveksiyon ve radyasyon ile kütlemede ise kütleme sıcaklığının 85-105 °C arasında olması literatürde tavsiye edilmektedir.

Bir malzemenin ısı yalıtım malzemesi olarak kullanılabilirliği, TS 825-Binalarda Isı Yalıtım Kuralları Standardı ile belirlenmektedir. Bu standarda göre, ısı iletim katsayısı 0.065 W/m.K değerinden düşük olmalıdır. Literatür incelendiğinde, GP esaslı ısı yalıtım malzemelerinin bu değeri karşıladığı ve ısı yalıtım amacıyla kullanılabilir olduğu görülmüştür. Dünya rezervlerinin %74'üne sahip olan ülkemiz açısından bu kaynakların katma değeri yüksek ürüne dönüştürülmesi çok önemlidir.

8 Teşekkür

Bu çalışma, Tübitak 115M041 No.lu proje kapsamında gerçekleştirilmiş olup yazarlar Tübitak'a sağlanmış olduğu imkanlardan dolayı teşekkürü bir borç bilir.

9 Kaynaklar

- [1] Orhun O. "Perlit". *MTA Madencilik Dergisi*, 8(4), 213-222, 1969.
- [2] Gündüz L, Şapçı N, Bekar M. "Bimsbetonların geliştirilmiş perlit agregalar ile teknik özelliklerinin iyileştirilmesi üzerine teknik bir analiz". *4. Ulusal Kırmataş Sempozyumu*, İstanbul, Türkiye, 2-4 Aralık, 2006.
- [3] Sengul O, Azizi S, Karaosmanoglu F, Tasdemir MA. "Effect of expanded perlite on the mechanical properties and thermal conductivity of lightweight concrete". *Energy and Buildings*, 43(2-3), 671-676, 2011.

- [4] Topçu İB, Işıkdag B. "Manufacture of high heat conductivity resistant clay bricks containing perlite". *Building and Environment*, 42(10), 3540-3546, 2007.
- [5] Liu WV, Apel DB, Bindiganavile VS. "Thermal properties of lightweight dry-mix shotcrete containing expanded perlite aggregate". *Cement and Concrete Composites*, 53, 44-51, 2014.
- [6] Türkmen İ, Kantarcı A. "Effects of expanded perlite aggregate and different curing conditions on the physical and mechanical properties of self-compacting concrete". *Building and Environment*, 42(6), 2378-2383, 2007.
- [7] Lanzóna M, García-Ruiz PA. "Lightweight cement mortars: Advantages and inconveniences of expanded perlite and its influence on fresh and hardened state and durability". *Construction and Building Materials*, 22(8), 1798-1806, 2008.
- [8] Bayraktar D, Bayraktar EA. "Mevcut binalarda ısı yalıtımı uygulamalarının değerlendirilmesi". *Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 7(1), 59-66, 2016.
- [9] Aydın H, Ekmekçi İ. "Isı yalıtım malzemesi olarak poliüretan köpüğün fiziksel ve kimyasal özellikleri, üretimi ve incelenmesi". *SAU Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 6(1), 45-50, 2002.
- [10] Yeler Y, Köseoğlu MF, Usta N, Demiryuğuran F. "Rijit poliüretan köpük malzemelere bor oksit ilavesinin ısı bozunma ve yanma özelliklerine etkilerinin incelenmesi osman yeler". *TTMD Dergisi*, 34-39, 2015.
- [11] Vaou V, Pnias D. "Thermal insulating foamy geopolymers from perlite". *Minerals Engineering*, 23(14), 1146-1151, 2010.
- [12] Arifuzzaman M, Kim HS. "Development of new perlite/sodium silicate composites". *International Conference on Mechanical, Industrial and Energy Engineering*, Khulna, Bangladesh, 26-27 December 2014.
- [13] Gharzouni A, Joussein E, Samet B, Baklouti S, Rossignol S. "Effect of the reactivity of alkaline solution and metakaolin on geopolymer formation". *Journal of Non-Crystalline Solids*, 410, 127-134, 2015.
- [14] Erdoğan ST. "Use of perlite to produce geopolymers". 31st Cement and Concrete Science Conference, Novel Developments and Innovation in Cementitious Materials, London, 12-13 September 2011.
- [15] Shastri D, Kim HS. "A new consolidation process for expanded perlite particles". *Construction and Building Materials*, 60, 1-7, 2014.
- [16] Tian Y, Guo X, Wu D, Sun S. "A study of effect factors on sodium silicate based expanded perlite insulation board strength". *Applied Mechanics and Materials*, 405(408), 2771-2777, 2013.
- [17] Skubic B, Lakner M, Plazl I. "Microwave drying of expanded perlite insulation board". *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 51(8), 3314-3321, 2012.
- [18] Skubic B, Lakner M, Plazl I. "Sintering behavior of expanded perlite thermal insulation board: Modeling and experiments". *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 52(30), 10244-10249, 2013.
- [19] Milano G, Scarpa F, Timmermans G. "Low-pressure thermophysical properties of epb-expanded perlite board". *Thermal Conductivity*, 23, 362-372, 1996.
- [20] Demirboğa R, Gül R. "Thermal conductivity and compressive strength of expanded perlite aggregate concrete with mineral admixtures". *Energy and Buildings*, 35(11), 1155-1159, 2003.
- [21] Azizi S. Perlit Katkılı Hafif Betonların Mekanik Özellikleri ve Isı Yalıtımı. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye, 2007.
- [22] Gandagea AS, Raob VRV, Sivakumarc MVN, Vasan A, Venud M, Yaswanthe AB. "Effect of perlite on thermal conductivity of self compacting concrete". *Pr°Cedia-S°Cial and Behavioral Sciences*, 104, 188-197, 2013.
- [23] Sun D, Wang L. "Utilization of paraffin/expanded perlite materials to improve mechanical and thermal properties of cement mortar". *Construction and Building Materials*, 101(1), 791-796, 2015.
- [24] Demir I, Baspınar MS. "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, 2008.
- [25] Maaloufa Y, Mounir S, Khabbazi A, Kettar J. "Effect of calcination on the thermal properties of bricks done from clay-expanded perlite on insulating walls". *Journal of Thermal Science and Engineering Applications*, 12(3), 304-311, 2016.
- [26] Yapıcı F, Özçifçi A, Nemli G, Gencer A, Kurt Ş. "The effect of expanded perlite on thermal conductivity of medium density fiberboard (MDF) panel". *Technology* 14(2), 47-51, 2011.
- [27] Karaağaç İ, Durmuş G, Uluer O, Aktaş M, Tülü FA. "Kompozit ısı yalıtım levhalarında ısı iletim katsayısı tespit yaklaşımları". *El-Cezerî Fen ve Mühendislik Dergisi*, 3(1), 133-142, 2016.
- [28] Uluer O, Aktaş M, Karaağaç İ, Durmuş G, Khanlari A, Ağbulut Ü, Çelik DN. "Manufacturing of expanded perlite based heat insulation material using theoretical thermal conductivity prediction model results". *Istanbul International Conference on Progress in Applied Science 2017-Icpas*, Istanbul, Turkey, 4-6 January, 2017.
- [29] He Y. "Rapid thermal conductivity measurement with a hot disk sensor: Part 1. theoretical considerations". *Thermochimica Acta*, 436, 122-129, 2005.
- [30] He, Y. 2005. "Rapid thermal conductivity measurement with a hot disk sensor: Part 2. Characterization of thermal greases". *Thermochimica Acta*, 436(1-2), 130-134, 2005.
- [31] Chudzik, S. "Measurement of thermal parameters of a heat insulating material using infrared thermography". *Infrared Physics & Technology*, 55(1), 73-83, 2012.
- [32] Jannot Y, Degiovanni A, Payet G. "Thermal conductivity measurement of insulating materials with a three layers device". *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 52(5-6), 1105-1111, 2009.
- [33] Uluer O, Aktaş M, Karaağaç İ, Durmuş G, Khanlari A, Ağbulut Ü, Çelik DN. "Mathematical calculation and experimental investigation of expanded perlite based heat insulation materials' thermal conductivity values". *Journal of Thermal Engineering*, Article in press.