



POLİTEKNİK DERGİSİ

JOURNAL of POLYTECHNIC

ISSN: 1302-0900 (PRINT), ISSN: 2147-9429 (ONLINE)

URL: <http://dergipark.gov.tr/politeknik>

İnşaat sektöründe kullanılan yalıtım malzemelerinin ısı ve ses yalıtımı açısından değerlendirilmesi

Evaluation of insulation materials used in construction sector based on heat and sound insulation

Yazar(lar) (Author(s)): Mehmet Ali ARSLAN¹, Mustafa AKTAŞ²

ORCID¹: 0000-0001-9294-1905

ORCID²: 0000-0003-1187-5120

Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article): Arslan M. A. ve Aktaş M., “İnşaat sektöründe kullanılan yalıtım malzemelerinin ısı ve ses yalıtımı açısından değerlendirilmesi”, *Politeknik Dergisi*, 21(2): 299-320, (2018).

Erişim linki (To link to this article): <http://dergipark.gov.tr/politeknik/archive>

DOI: 10.2339/politeknik.407257

İnşaat Sektöründe Kullanılan Yalıtım Malzemelerinin Isı ve Ses Yalıtımı Açısından Değerlendirilmesi

Araştırma Makalesi / Research Article

Mehmet Ali ARSLAN^{1*}, Mustafa AKTAŞ²

¹Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü, 06500 Ankara/TÜRKİYE

²Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü, 06500 Ankara/TÜRKİYE

(Geliş/Received : 27.02.2017 ; Kabul/Accepted : 06.02.2018)

ÖZ

Makalenin amacı inşaat sektörü için üç alanı kapsayan: geleneksel, alternatif ve gelişmiş yalıtım malzemelerini dikkate alarak yalıtım malzemelerine genel bir bakış sağlamaktır. Makalenin birinci ve ikinci bölümünde ısı ve ses yalıtımı ile ilgili mevcut durum ve literatürde yapılmış olan çalışmalar ele alınmıştır. Üçüncü bölümde ısı ve ses yalıtımı için yalıtım malzemelerinde bulunması gereken özellikler, kriterler ve malzeme özelliklerinin değerlendirilmesi için başlıca uluslararası standartlar ele alınmıştır. Dördüncü bölümde mevcut yalıtım malzemeleri sınıflandırılarak ısı ve akustik özellikleri, su buharı direnci, yangın direnci ve çevresel özellikler dikkate alınarak incelenmiştir. Beşinci bölümde ısı ve ses yalıtımı için mevcut yalıtım malzemeleri dikkate alınarak gelecekte yapılacak olan çalışmalara yönelik değerlendirmelerde bulunulmuştur.

Bu değerlendirmelere göre Türkiye enerji konusunda olduğu gibi yalıtım malzemeleri konusunda da ağırlıklı olarak dışa bağımlıdır. Bu konuda dışa bağımlılığı giderebilecek, rekabet gücü yüksek malzeme ve teknolojilerinin geliştirilmesi çok önemlidir. Literatürdeki çalışmalar genel olarak değerlendirildiğinde uygun malzeme ve bağlayıcılar kullanıp gerekli işlemler yapıldığında farklı maddelerden elde edilen yeni nesil kompozit yalıtım malzemelerinin istenen yalıtım performansı özelliklerini sağlayabileceği öngörülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Yalıtım malzemeleri, ısı yalıtımı, ses yalıtımı.

Evaluation of Insulation Materials Used in Construction Sector Based on Heat and Sound Insulation

ABSTRACT

The purpose of the paper is to provide an overview of the insulation materials, taking into including three areas for the construction sector: traditional, alternative and advanced insulation materials. In the first and second part of the paper, the current state of heat and sound insulation and the studies made in the literature are discussed. In the third section, properties and criteria to be found in insulation materials for heat and sound insulation and the main international standards for evaluating material properties are discussed. In the fourth chapter, existing insulation materials are classified and their thermal and acoustical properties are examined by taking into consideration water vapor resistance, fire resistance and environmental properties. In the fifth chapter, considering the existing insulation materials for heat and sound insulation, evaluations were made for future works. According to these evaluations, Turkey is predominantly be dependent on outside on insulation materials as well as on energy. The development of highly competitive materials and technologies is crucial in this regard. The studies in the literature are generally predicted to provide the desired insulation performance characteristics of the new generation composite insulation materials obtained from different materials when appropriate materials and binders are used and the necessary operations are carried out.

Keywords: Insulation materials, thermal insulation, sound insulation

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı tarafından 24 Haziran 2004 tarihinde onaylanan “Enerji Verimliliği Stratejisi”; Türkiye’deki nihai enerji tüketim sektörlerindeki enerji verimliliğini AB standartlarına çekmeyi hedeflemektedir. Avrupa Komisyonu Enerji ve Ulaşım Genel Müdürlüğü’nce yapılan çalışmalara göre, toplam enerji kullanım dağılımı % 32 ulaşım, % 28

endüstri ve % 40 binalar olarak belirlenmiştir. Binalardaki enerji kullanımının ise % 85’inin ısıtma için harcandığı ortaya çıkmıştır. Bu sonuca göre enerjide en büyük tasarruf potansiyelinin binalarda olduğu açıkça görülmektedir.

Ülkemizde, enerji kaynaklarının daha verimli kullanılabilmesi ve nihai enerji tüketim sektörlerindeki enerji verimliliğinin Avrupa Birliği (AB) standartlarına çekilmesi stratejisi hedeflenmektedir. Ülkemizdeki yüksek bina stokları ve bina sektöründe hızlı büyüme, ısı yalıtımının önemini fazlasıyla anlatmaktadır. Isı yalıtım uygulamalarında ısı iletim katsayısı düşük, yanmaz,

*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)
e-posta : mehmetali.arslan@gazi.edu.tr

kolay uygulanabilir ve ekonomik ısı yalıtım malzemelerine ihtiyaç duyulmaktadır.

Sürdürülebilirlik ve ekolojik tasarım konuları son zamanlarda inşaat sektöründe araştırılan ve uygulanan en önemli konular arasında yer almaktadır. Yeşil bina tasarım standartlarına göre sertifika veren “Enerji ve Çevre Dostu Tasarımda Liderlik” (Leadership in Energy and Environmental Design-LEED), “Bina Araştırmaları Kurumu Çevresel Değerlendirme Metodu” (Building Research Establishment Environmental Assessment Method-BREAM) gibi uluslararası yeşil bina değerlendirme sistemleri sertifika programları ülkemizde de uygulanmakta ve doğa dostu, enerji korunumu yüksek ve sağlıklı yapılar hızla çoğalmaktadır.

Sürdürülebilir ve sağlıklı yaşam koşullarını sağlayan ortamlar tasarlanırken dikkat edilmesi gereken kriterlerden birisi de akustik konfor şartlarıdır. Bina ve çevresel akustik konfor şartlarını içeren kriterler her ne kadar yeşil bina sertifika programlarında yer alsada bu programlarda ön plana çıkan doğal aydınlatma ve havalandırma gibi kriterler, akustik gereklilikler dikkate alınmadan uygulandığında yapılarda daha çok akustik problemler yaratmaktadır.

Enerji kaynaklarının hızla azalması yüzünden alternatif enerji üretim metotları üzerinde yoğun çalışmalar devam etmektedir. İnşaat sektöründeki enerji kullanımı, dünyanın toplam enerji kullanımının ve sera gazı emisyonlarının önemli bir bölümünü oluşturduğundan binaların enerji verimliliğini artırma çalışmaları önem kazanmıştır. Bu bağlamda enerji tasarrufu açısından yalıtım önemli yer tutmaktadır. Yalıtım teknolojileri sayesinde enerji kaybı minimize edilebilmektedir. Uygun metotlarla üretilen yalıtım malzemeleri iyi yalıtım performansı sağlayarak uzun ömürlü, ekonomik, çevre dostu ve sağlıklı, yerel ve sürdürülebilir olabilmektedir. Bu kapsamda ısı ve ses yalıtımı konutlarda makul enerji tüketimi, yeterli konfor ve sağlık koşullarının sağlanması açısından büyük önem taşıdığından gün geçtikçe bu tür yalıtım ürünlerine olan talep büyük ölçüde artmaktadır.

Bu çalışmanın amacı geleneksel, alternatif ve gelişmiş bina yalıtım malzemelerinin zayıf, güçlü yanlarını ve çeşitli özelliklerini ısı ve ses yalıtımı açısından değerlendirmektir. Bu değerlendirmede ısı ve akustik özellikler, su buharı direnci, yangın direnci ve çevresel özellikler dikkate alınmıştır.

kurutulmasında kullanılmak

2. LİTERATÜR TARAMASI (LITERATURE REVIEW)

Özkan ve ark. (2009), yalıtım malzemesi kalınlığının ısı yalıtımına etkisi incelenmiştir. Ayrıca çalışmada pencere ve dış duvar alanı değişiminin, bina ısıtma enerjisi ihtiyacına ve optimum yalıtım kalınlığına etkisi araştırılmıştır. Yakıt maliyetleri ve ülkemizin enerjide dışa bağımlılığı düşünülerek, projecilerin ve uygulamacıların daha bilinçli olarak binalarda optimum kalınlıkta ısı yalıtımı yapmaları gerektiği tavsiye edilmiştir. Ayrıca ısı, ses

ve yangın yalıtımını birlikte yerine getirebilen yalıtım malzeme ve tekniklerinin araştırılıp geliştirilmesine önem verilmesi gerektiği vurgulanmıştır. Binalarda enerjinin verimli kullanılmasına konutlarda yalıtım malzemesi ve kalınlığının doğru olarak saptanmasıyla ve binaların mimari detaylarının ısıtma gereksinimlerini azaltacak şekilde tasarlanmasıyla başlanabileceği ifade edilmiştir [1].

Günümüzde bina ısı yalıtımında yaygın olarak mantolama yöntemi kullanılmaktadır. Bu yöntemde daha çok geliştirilmiş polistiren sert köpük (EPS), haddelenmiş sert polistiren köpük (XPS), poliüretan köpük gibi köpük malzemeler ya da taş yünü-cam yünü gibi mineral yünleri (MW) ve ahşap yünü olmak üzere, lifli malzemeler yalıtım bloklarının yapımında tercih edilmektedir [2].

Ricciardi P., Belloni, E., Cotana, F., (2014), bir yapıştırıcı ile birleştirilen geri dönüştürülmüş tekstil lifleri ve atık kağıtlardan oluşturulmuş 12 mm ve 20 mm kalınlığındaki panellerin ısı ve akustik özellikleri araştırılmıştır. Numunenin ısı performansı UNI EN ISO 8990'a göre, sıcak kutu aparatı kullanılarak değerlendirilmiştir. Deney sonuçları araştırılan tüm panellerin iyi bir ısı davranış sergilediğini ve k-değerlerinin 0,034-0,039 W/m.K aralığında değiştiğini göstermiştir. Akustik yutum katsayısı ISO 10534-2 ile uyumlu olarak, Kundt's tüp kullanılarak belirlenmiştir. Numunelerin gürültü azaltma katsayısı (NRC - 250, 500, 1000 ve 2000 Hz frekanslarında) tabaka kalınlığına bağlı olarak, 0,23-0,38 aralığında değişmektedir. Deney sonuçları geleneksel yalıtım sistemlerinin, ısı ve ses özellikleri ile karşılaştırılmıştır. Buna göre yenilikçi numunenin ısı iletim katsayısı değerleri taş yünü (0,037 W/m.K), kâğıt yün ve mineral yün (0,04 W/m.K) yalıtım malzemeleri ile benzer olmakla birlikte yeni panellerin yoğunlukları (433-483 kg/m³) taş yünü (90 kg/m³), kâğıt ve mineral yünlerin (32-40 kg/m³) yoğunluklarından daha yüksek olduğu belirlenmiştir [3].

Papadopoulos A.M., (2005), son teknoloji malzemelerini değerlendirmiş ve gelecekteki araştırma gelişme hedeflerini mevzuat ve piyasa çerçevesinde incelemiştir. Yalıtım malzemeleri enerji etkin binaların tasarımı ve inşasında anahtar bir araçtır. Bunu artan yalıtım kalınlıkları ve bu alanda satış artışındaki yansımalar göstermektedir. Yalıtım malzemelerinin Avrupa pazarı inorganik lifli malzeme ve organik köpüklü malzeme grubu ürünlerinin hâkimiyeti altındadır. Bu malzemeler benzer yalıtım performansı göstermektedir. Malzemelerin ısı özellikleri son on yılda önemli ölçüde gelişmemesine rağmen, yangın ve neme karşı tepki veya mekanik özellikler gibi diğer özellikler bazen yalıtım yetenekleri pahasına geliştirilmiştir. Ayrıca, çalışmada verilen uygulamalar ve sanayi sektöründe gelecekteki belirlenen amaçlara ulaşmak için ‘optimum’ malzeme arayışında çevre ve insan sağlığının önemi giderek artan oranda rol oynayacağı vurgulanmıştır [4].

Jelle B.P., (2011), binalarda kullanılan ısı yalıtım malzemeleri ve ısı yalıtım çözümlerinin avantaj ve dezavantajlarını irdelemiştir. Hem geleneksel hem de son teknoloji

malzemelerin ısı iletkenlik, performasyon açığı, şantiye adaptasyon ve kesilebilme, mekanik mukavemet, yangından korunma, yangın sırasında duman emisyonu, sağlamlık, iklim, yaşlanma dayanıklılık, donma/çözülme direnci döngüleri, su direnci, maliyetleri ve çevresel etkileri karşılaştırılıp incelenmiştir. Bunların örnekleri mineral yün, genleştirilmiş polistiren, ekstrüde polistiren, poliüretan, vakum yalıtım panelleri, gaz dolgululu yalıtım panelleri, aerogeller, nano yalıtım malzemeleri ve dinamik yalıtım malzemeleri gibi gelecekteki olasılıklar şeklindedir. Geleneksel yalıtım malzemeleri nispeten yüksek ısı iletim katsayısı değerlerine sahiptirler, soğuk iklimlerdeki binalarda yüksek performans için çok kalın bina kaplaması gerekebilir. Geleneksel yalıtım malzemelerinde ısı iletim katsayısı değerleri artan nem içeriği ile önemli ölçüde artmıştır. En düşük ısı iletim katsayısına sahip geleneksel yalıtım malzemesi poliüretan (PUR) olup, ısı iletim katsayısı 0,020 W/m.K'den daha düşük değerlere sahiptir. Bununla birlikte, bir yangın sırasında poliüretandan gelen toksik gaz salınımı, ciddi sağlık tehlikesi sorunlarını ortaya çıkarmaktadır. Son teknoloji yalıtım malzemeleri arasında vakum yalıtım panelleri ve aerogeller, geleneksel malzemelere göre oldukça düşük ısı iletim katsayısı değerlerine sahiptir. Bir vakum yalıtım panelinin ısı iletim katsayısı değeri 0,004 W/m.K civarındadır. Buna karşın aerogel için en düşük değer 0,013 W/m.K'dir. Bununla birlikte, vakumsuz ya da delinmiş olması durumunda 0,020 W/m.K değerine ulaşır, nem ve difüzyon yoluyla hava girişi nedeniyle zamanla vakum yalıtım panellerinin ısı iletim katsayısı artar. Hem vakum yalıtım panelleri hem de aerogeller çok pahalıdır, ancak vakum yalıtım panellerinin uygun maliyetli olabileceği ve yüksek maliyetleri kaldırabilecek uygulama alanlarında kullanılacağı belirtilmiştir. Şu anda önemli özellikleri bakımından tüm gereksinimlerini yerine getirebilecek tek bir yalıtım malzemesi ya da çözüm mevcut olmadığı vurgulanmıştır [5].

Shastri, D., Kim, H.S, (2014), yapı malzeme uygulamaları için nişasta bağlayıcı ile genleştirilmiş perlit parçacıklarının sağlamlaştırarak yeni bir yapı malzemesi yapmışlardır. Üretilen perlit köpüklerin dayanımı ve basınç modülü köpük yoğunluğu aralığı (0,1–0,9 g/cm³) için alçı ile karşılaştırılmıştır. Sıkıştırma sırasında meydana gelen hasarlar görüntü analizi kullanılarak değerlendirilmiştir. Beklendiği gibi yüksek yoğunluklu perlit köpüğünün daha fazla hasar gördüğü tespit edilmiştir. Yeni oluşan üründe perlit köpüğü, perlit partikülü ve nişasta içermiştir. Perlit partikülleri başarılı yüzdürme yöntemi ve sıkıştırma tekniği ile güçlendirilmiştir. Islak perlit karışımı için üç farklı karakteristik aşama olduğu ve perlit partiküllerinin güçlendirilmesi için bu aşamalar tanımlanmıştır. Üretilmiş perlit köpüğünün sıkıştırma altında kırılma mekanizmaları tespit edilmiştir. Üretilen perlit köpüğünün köpüklü alçı ile kullanılmasında 0,3 g/cm³ yoğunluklu perlit köpüğünün basma dayanımını 0,7-0,9 g/cm³ yoğunluklu alçı köpüğü ile uyumlu bulunmuştur. Perlit köpüğünün daha yüksek yoğunluğu için daha fazla hasar tespit edilmiştir [6].

Baetens, R., Jelle, B.P., Gustavsen, A., (2011), aerogellerin özellikle bina uygulamalarında kullanımı ve aerogel yalıtımı hakkında genel bir derleme yapmışlardır. Birinci aşamada aerogellerin üretim proseslerine ikinci aşamada güncel bina uygulamaları ve diğer alandaki uygulamalara yer verilmiştir. 13 mW/m.K altındaki ısı iletim katsayısıyla ticari ürünler için geleneksel ısı yalıtım malzemeleri ile karşılaştırıldığında kayda değer özellikler göstermektedir. Geleneksel mineral yünlerden 2-2,5 kat daha düşük ısı iletim katsayısına sahiptirler. Aerogeller güneş spektrumundaki yüksek geçirgenlik olasılığından dolayı da inşaat sektörü için de büyük bir ilgiye sahiptir. Aerogeller ayrıca ısı ve ses yalıtım malzemesi olarak bina uygulamalarında güncel olarak kullanılmaktadırlar [7].

Zukowski, M., Haese, G., (2010), çalışmalarında perlit yalıtımı ile dolu modern dikey delikli duvar ünitesinin ısı özelliklerinin araştırmışlardır. Sayısal hesaplamalara ve ölçümlere dayalı olarak yeni içi boş tuğlanın ısı özellikleri belirlenmiştir. Perlit rezervlerinin yaklaşık % 70'i Türkiye'de bulunmaktadır. Genleştirilmiş perlit çoğunlukla hafif ağırlıklı beton uygulamalarında kullanılmaktadır. Perlit ile doldurulmuş modern içi boş tuğlalar yüksek ısı dayanım sağlamakta ve herhangi bir ek yalıtım katmanı kullanmaksızın uygulanabilirler. Bu durumda da duvarın toplam ısı transfer katsayısı (U) değeri 0,29 W/m²K'den daha düşüktür. Perlit dolgululu içi boş tuğlaların perlit yalıtımı tuğlaların elle taşınması esnasında hasar görmektedir. Ayrıca uygulama esnasında boşluk içerisine harç girebilmekte ve bu durum ısı yalıtımını olumsuz etkilemektedir [8].

Alam, M., Singha, H, Brunner, S., Naziris, C. (2014), dumanlanmış silika yerine daha ucuz olarak genleştirilmiş perlit kullanarak vakum yalıtım paneli dolgusu için dumanlanmış silika-genleştirilmiş perlit kompozitinin ısı ve fiziksel özelliklerini incelemişlerdir. Genleştirilmiş perlitli kompozitin radyasyon iletkenliği, gaz ısı iletkenliği, ısı iletkenliği 1 atm basıncında ve 0,5 mbar basıncında değerlendirilmiştir. 100x100 mm örnek VIP panel değişen oranlarda genleştirilmiş perlit dumanlanmış silika, silikon karbür ve polyester elyaf içeren kompozit hazırlanmıştır. % 60 kütle oranında genleştirilmiş perlit içeren panel dolgusunun ısı iletim katsayısı atmosferik basınçta 53 mW/m.K olarak ölçülmüştür. Genleştirilmiş perlit oranı % 30'a düşürüldüğünde ısı iletim 28 mW/m.K ölçülmüştür. Bir vakum yalıtım panelinin maliyeti genleştirilmiş perlit kullanılarak % 20 oranında azaltılabileceği vurgulanmıştır [9].

Picho'r W., Janiec, A., (2009), porselen ile modifiye edilen genleştirilmiş perlitin ısı kararlılığını araştırmıştır. Genleştirilmiş perlit alimino silikat jel ile modifiye edilmiştir. Genleştirilmiş perlitin ısı kararlılığı ve dayanıklılığı, perlit tanelerinin boşluklu yapısındaki yere porselen sentezi ile iyileştirilmiştir. Porselen alimino silikat jelden elde edilmiştir. Jel, erime noktasının altındaki kaba genleştirilmiş perlitin ısı kararlılığı ve dayanıklılığını iyileştirmek için gözeneklerin yüzeyine uygulanmıştır. Kimyasal modifikasyon porselen kristalleri ile takviyelendirilen genleştirilmiş perlit yapısının güçlenmesine neden olmuştur [10].

Lu, Z., Xu, B., Zhang J., Zhu, Y., Sun, G., Li, Z., (2014), parafinin genişletilmiş perlitin gözenekli bağları içerisine emdirilmesi ile kararlı genişletilmiş perlit/parafin kompoziti hazırlamışlardır. Kompozit yapı iyi ısı enerji depolama özelliği, ısı kararlılık ve ısı güvenilirlik göstermiştir. Genleştirilmiş perlit ve parafin arasında kimyasal etkileşimin olmadığı ortaya çıkmıştır. Ayrıca direkt emdirme yöntemiyle sıvı sızıntısı olmaksızın kompozit içerisinde parafin üniform bir şekilde dağılmıştır. Kompozit yapı binalarda ısı enerji depolaması için büyük bir potansiyele sahiptir [11].

Yılmaz, S., Ozdeniz, M.B. (2005), genişletilmiş perlitin yapılan plakaların ses davranışını deneysel olarak araştırmışlardır. Bu plakalar ses yutumu için kullanılmaktadır. Ses parametresi olarak bu çalışmada ses yutum katsayısı belirlenmiştir. Nemin ses yutma katsayısını azalttığı deneysel olarak gözlemlenmiştir. Plakalar nemlendirilirse ve özellikle su ile doyduğunda ses yutum özelliği azalmaktadır. Kuru ve % 50 nem şartları arasında plakalarda ses yutma katsayısında bir farklılık olmadığı gözlemlenmiştir. % 50-% 95 arasında nem için ses parametreleri arasında önemli farklılıklar vardır. Sodyum silikat ile kaplanan genişletilmiş perlitin nem dayanımını arttırdığı ve karışım içerisine mineral fiberlerin eklenmesi plakaların ses yutma katsayısını ve dayanımını arttırdığı gözlemlenmiştir [12].

Vaou, V., Panias, D., (2010), geopolimerizasyon teknolojisiyle ham madde olarak perlit kullanılarak ısı yalıtım malzemesi yapmışlardır. Malzemenin köpürmesi ve gözeneklerin oluşabilmesi için hidrojen peroksit kullanılmıştır. Eklenen köpürücü malzemenin yapılan ısı yalıtım malzemenin ısı özellikleri üzerindeki etkisi incelenmiştir. Genleştirilmemiş perlitin yapılan geopolimer köpüklerin özellikleri yalıtım malzemesi için uygun olduğu kanıtlanmıştır. Yapılan malzemenin ısı iletim katsayısı 0,03 W/m.K olarak elde edilmiştir. Basınç dayanımı 780 kPa'da %2 deformasyon göstermiştir. DIN4102 standardına göre A1 sınıfı yanmaz malzeme üretilmiştir. Maksimum uygulanma sıcaklığı 700 °C olarak belirlenmiştir [13].

Celik, A.G., Depci, T., Kılıç, A.M., (2014), yeni hafif ağırlıklı kolemanit katkılı perlit tuğla ve ticari diğer hafif ağırlıklı malzemeler ile fizikomekanik özelliklerini karşılaştırmışlardır. Genleştirilmiş perlit (GP), kömür tozu, CMC ve su kullanılarak hazırlanan karışım ile hafif ağırlıklı tuğla kullanılmıştır. Kolemanit içeren hafif ağırlıklı betonun dayanımı, ısı ve ses dayanımları araştırılmıştır. Farklı miktarlarda ağırlıkça kolemanit % 0'dan % 20'ye kadar, 200 oC'den 400 oC'ye kadar farklı sıcaklıklar uygulanarak tuğlalar hazırlanmıştır. Karşılaştırılan sonuçlar tuğlaların en iyi özelliğinin 400 °C'deki başlangıç karışımına % 10'luk kolemanit ilavesi sırasında elde edildiğine işaret etmektedir. Üretilen tuğlaların ses yalıtımı (50 dB), ısı iletim katsayısı (0,12 W/m.K) ve birim ağırlığı (533 kg/m³) diğer inşaat malzemelerinden daha iyi olduğu belirtilmiştir [14].

Liu, W.V., Apel, D.B., Bindiganavile, V.S., (2014), genişletilmiş perlit agrega içeren hafif ağırlıklı kuru karışım

püskürtme betonunun ısı özelliklerini incelemişlerdir. Farklı oranlarda (Genleştirilmiş perlit/kum) kuru karışım hazırlanmış, püskürtme tekniği yardımıyla ahşap kalıplara yerleştirilerek panel üretilerek mekanik ve ısı iletkenlik testleri yapılmıştır. Genleştirilmiş perlit agrega ile püskürtme beton karışımlarının dökme beton ile karşılaştırıldığında benzer tek eksenli basınç direncine ve üstün yarma çekme dayanımına sahip olduğunu göstermektedir. Genleştirilmiş perlit agreganın eklenmesi, ısı iletim katsayısı ve ısı yayılım katsayısının düşmesine neden olmuştur. Dökme beton ile karşılaştırıldığında kuru karışım püskürtme betonunun özgül ısı kapasitesinin daha düşük olduğu belirlenmiştir [15].

Abidi, S., Nait-Ali, B., Joliff, Y., Favotto, C., (2015), bir alçı kompozit malzemede ısı iletim katsayısına perlit, vermikülit ve çimento etkileri incelenmiştir. Sayısal ve deneysel yaklaşımlar ile ısı yalıtım malzemesi olarak kullanılan yeni bir kompozit malzemenin ısı mekanik davranışı ve yapıyı yangından koruması araştırılmıştır. Kompozit panelde kalsiyum sülfat hidrat, su ve inorganik malzemeler kullanılmıştır. Analitik ve sayısal modeller kullanılarak ısı iletim katsayısı hesaplanmıştır. Kompozit karışımına ağırlıkça % 5 veya % 25 vermikülitle ilave edildiğinde ısı iletim katsayısı sırasıyla 0,50 W/m.K'den 0,45 W/m.K'e ve 0,23 W/m.K'e düşmüştür. Ağırlıkça % 5 ve % 25 çimento ilave edilmesi durumunda ısı iletim katsayısı sırasıyla 0,53 W/m.K ve 0,52 W/m.K'e düşmüştür. Ağırlıkça % 5 ve % 25 perlit ilave edilmesi durumunda ısı iletim katsayısı sırasıyla 0,35 W/m.K ve 0.16 W/m.K olarak tespit edilmiştir. ısı iletim katsayısı sonuçları perlit ilavesinin kompozitin ısı yalıtım kalitesini arttırmak için vermikülit ve çimentodan daha iyi bir katkı maddesi olduğunu göstermiştir. Perlit ilavesi, yalıtkan olarak malzemenin ısı özelliklerini iyileştiren gözeneklilik oranını arttırmıştır. Ayrıca numune hazırlama esnasında perlit tabakalar arasında sıkışan suyun kompozitin ısı iletim katsayısı arttırdığı düşünülmektedir. Hacimce eşit oranda 1/3 sıva 1/3 perlit ve 1/3 vermikülit olarak hazırlanmış üç fazlı kompozit 4 saat boyunca yangına karşı test edilmiştir. Kompozit yüzeyinde ölçülen ortalama sıcaklık 98 °C (standart: Tmaksium <180 °C) ve ulaşılan maksimum sıcaklık 105 °C' dir. Üç fazlı kompozit standart tarafından istenen sıcaklıktan yaklaşık % 50 daha düşük bir sıcaklık değerine ulaşarak çok iyi bir yalıtım malzemesi olduğunu göstermiştir [16].

Gao ve ark. (2014), nano ısı yalıtım malzemelerinin çevresel etkilerini incelemişlerdir. Geri dönüştürülebilir ve çevre dostu hammadde kullanılarak çevresel etkiler büyük ölçüde azaltılmaya çalışılmıştır. Nano yalıtım malzemesi olarak silika nano-küreler kullanılmıştır. ısı iletim katsayısı 0.02 W/m.K olarak elde edilmiş ve sonuçlara göre ısı yalıtım malzemesinin diğer numunelere göre yüksek çevresel etkisi olduğu saptanmıştır [17].

Bajraktari ve ark. (2015) doğal havalandırma açıklıklarına sahip çift cephelerin ses yalıtımını incelemiştir. Yaşam kalitesini arttırabilmek için binada havalandırma yapılması gerektiğini ancak gürültü ve hava kirliliği nedeniyle her zaman doğal havalandırmanın mümkün olmadığını belirtmişlerdir. Laboratuvar ortamında örnek

numuneler yapılarak test edilmiştir. Amprik değerler kullanılarak ses yalıtımını tahmin edebilecek bağıntılar elde edilmiştir. Ek olarak ses geçişini tahmin edebilen basit bir analitik model geliştirilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre havalandırma boşlukları konumlarının ses yalıtımına önemli etkisi olduğu görülmüştür. Yani açıklıkların doğru yer seçimleri ile doğal havalandırmanın yanında ses yalıtımını da elde edilebileceği öngörülmüştür [18].

Nurzyński (2015), ses ve ısı yalıtımı arasındaki ilişkiyi incelemiştir. Çeşitli yapı elemanlarının ısı ve ses davranışları arasındaki farklar gösterilmiştir. Farklı yapılar için elde edilen ölçüm sonuçlarının analizi ses ve ısı yalıtımı arasında basit bir ilişki bulunmuş ve oldukça zor olduğunu göstermektedir. Bununla birlikte iyi bir ısı yalıtımı sağlarken yapı elemanının ses yalıtım özelliğinin olumsuz etkilendiği belirlenmiştir [19].

Arifuzzaman ve Kim (2014), geliştirilmiş perlit esaslı yalıtım malzemesini geliştirmiş ve mekanik özelliklerini deneysel olarak araştırmışlardır. Bağlayıcı olarak sodyum silikat kullanılmıştır. Sodyum silikat; yanmaz, suya karşı dirençli ve nispeten ucuzdur. Geliştirilmiş perlit parçacıkları üç gruba ayrılmıştır ve dört farklı yoğunluk ölçümü yapılmıştır (kütle yoğunluğu, parçacık kaplama yoğunluğu, parçacık iskelet yoğunluğu, malzeme yoğunluğu). Panellerin hazırlanması; sodyum silikatın sulandırılması, kalıplanma, preslenme, kalıptan çıkarılıp kurutulması (sinterleme) aşamalarından oluşmuştur. Basınç dayanımı sıkıştırma basıncı ve bağlayıcı oranına bağlı olduğu tespit edilmiştir. Sıkıştırma basıncı arttıkça, yoğunluğun arttığı görülmüştür. Ayrıca panelin yoğunluğunun geliştirilmiş perlit boyutuna göre çok hassas olmadığı vurgulanmıştır [20].

Arifuzzaman ve Kim (2015), perlit ve sodyum silikattan yapılmış kompozitin mekanik özelliklerini incelemiştir. Geliştirilmiş perlit boyutlarına göre üç ayrı gruba ayrılmıştır. Bağlayıcı olarak sulandırılmış sodyum silikat kullanılarak elde edilen kompozit köpük yoğunluğu 0,2-0,5 gr/cm³'dir. Geliştirilmiş perlit kırılmalıdır ve bağlayıcı ile karıştırıldığı zaman hasara uğrar. Bu olumsuz etkiyi telafi etmek için yoğunluk artırılır. Daha büyük partiküllerden yapılan panelde belli bir yoğunluğu elde edebilmek için daha fazla sıkıştırma işleminin gerekli olduğu tespit edilmiştir [21].

Skubic ve ark. (2013), geliştirilmiş perlitten yapılmış yalıtım panellerini sinterleme sıcaklığına göre matematiksel bir model ile simüle etmişlerdir. Daha sonra deneysel sonuçlar ile simülasyondan elde edilen değerler doğrulanmıştır. İlk olarak sodyum silikat ile geliştirilmiş perlit karıştırılmış ardından kalıplanmış ve preslenmiştir. Son olarak mikrodalga fırınında kurutulduktan sonra yüksek sıcaklıkta ısı işlem görmüştür. Isıl işlem görmüş panellerde büzülmeler meydana gelmiştir. Geliştirilmiş perlitin ısı iletim katsayısı 0,045 W/m.K olarak hesaplanmıştır. Sodyum silikat oranı azaldıkça sinterleme (kürleme) sıcaklığının arttığı görülmüştür. Sodyum silikat oranı % 30 olan numunelerin sinterleme sıcaklığı 700 °C olarak saptanmıştır. Geliştirilmiş perlit

esaslı panelin ısı iletim katsayısı 0,0503 W/m.K olarak ölçülmüştür [22].

Skubic ve ark. (2012), geliştirilmiş perlit esaslı yalıtım panellerinin mikrodalga ile kurutulmasını incelemiştir. Konveksiyon prensibine göre yapılan kurutma yöntemlerinde ısı ürünün yüzeyinden merkezine doğru nüfuz eder. Bu yüzden ısı yalıtım özellikleri olan bir maddenin geleneksel yöntemler ile kurutulması oldukça zor ve uzundur. Mikrodalga ürünün içine nüfuz ederek hızlı kurutmayı sağlamaktadır. Ancak kurutmanın son aşamasında ürünün hasar görmemesi için doğru zamanda kurutma işlemi sonlandırılmalıdır. Ek olarak kurutulmuş panelin içindeki sıcaklık dağılımı ve kurutma hızını tahmin etmek için matematiksel model geliştirilmiştir. Matematiksel modelden elde edilen değerler ile deneysel değerler birbiri ile çok yakındır ve kurutmanın bitiş süresi tahmini için kullanılabilir. Mikrodalga kurutmanın geliştirilmiş perlit esaslı yalıtım paneli için uygun bir kurutma yöntemi olduğu tespit edilmiştir. Ancak ürünün içindeki su tamamen uzaklaştırıldıktan sonra kurutma işlemi hemen sonlandırılmalıdır. Kurutma işlemi doğru bir zamanda sonlandırılmazsa ürün sıcaklığının hızlı bir şekilde artacağı ve ürünün hasara uğrayacağı vurgulanmıştır [23].

Bostancıoğlu (2011), binalarda yapılan ekolojik iyileştirmelerin enerji kazancına etkisini incelemiştir. Enerji tüketiminin sektörlere göre dağılımına bakıldığında bina sektörü sanayi ve ulaşımdan sonra enerji verimliliğinin sağlanabileceği öncelikli alanlardan biri olarak görülmektedir. Binanın inşasından yıkımına dek geçen sürede kullanılan toplam enerjinin %80'i binanın kullanımı sırasında harcanmaktadır. Başta sanayi ve konut sektörleri olmak üzere enerji tüketimi her geçen yıl artmakta; konutlarda kullanılan enerjinin büyük bir kısmı ısıtma ve soğutma amaçlı tüketilmektedir. Konutlarda en etkin enerji tasarrufu; kolay uygulanabilir bir enerji verimlilik teknolojisi olan ısı yalıtımının uygulanmasıyla sağlanabilmektedir. Çalışma kapsamında seçilen bir konut binasının duvarlarına uygulanan farklı yalıtım uygulama alternatiflerinden elde edilen enerji kazancı değerlendirilmiştir. Farklı ekolojik iyileştirme uygulamalarının yıllık enerji maliyetleri hesaplanmış ve yalıtımsız binada meydana gelen enerji tasarrufları belirlenmiştir. Yapılan alan çalışmaları mevcut binalarda TS 825 standardına uygun olarak yapılan yalıtım uygulaması ile yapıların ısıtma enerjisi maliyetlerinde yaklaşık % 60 dolayında bir tasarruf sağlandığını ortaya koymuştur [24].

Sun ve Wang (2015), çimento harcının mekanik ve ısı özelliklerini iyileştirmek için parafin ve geliştirilmiş perlit kullanılmıştır. Çimento, parafin ve geliştirilmiş perlit doğrudan karıştırılmış ve karışımın mekanik ve ısı özellikleri araştırılmıştır. Deneysel sonuçlara göre parafin kılcal kuvvetle geliştirilmiş perlitin gözenekli yapısına hapsedilmektedir. Parafin/geliştirilmiş perlit içindeki ortalama parafinin kütle oranı % 65'e ulaşmıştır. Çimento harcının basma ve bükülme dayanımları parafin/geliştirilmiş perlitin artmasıyla azalmıştır. Çimento içindeki parafin/geliştirilmiş perlitin optimum oranı

%20 olarak tespit edilmiştir. Bu oranda yapılmış karışımın ısı iletim katsayısı 0,52 W/m.K olarak elde edilmiştir (normal çimentoğunun ısı iletim katsayısı 0,66 W/m.K'dir). Ek olarak parafin ile geliştirilmiş perlitin uyumlu olduğu görülmüştür [25].

Güner (2000), yaptığı çalışmada gürültünün insan sağlığı üzerindeki etkilerini incelemiştir. Giderek artan sanayileşme ve kentleşme sonucunda gürültü önemli bir çevresel kirlilik etkeni haline gelmiştir. Türkiye'de büyük şehirlerin pek çok semtinde yapılan gürültü ölçümlerinde elde edilen değerlerin eşik değerleri geçtiği saptanmıştır. Yine Avrupa'da 13 milyondan fazla insanın 65 dB'in üzerinde çevresel gürültüye maruz kaldığı belirtilmiştir. Gürültü, insanlarda işitme kayıplarının yanı sıra önemli bir stres ajanı olarak psikolojik, nörovegetatif ve kardiyovasküler sistemleri etkileyerek çeşitli hastalıklara yol açmaktadır. Gürültünün insan sağlığını pek çok yönüyle olumsuz etkilediği görülmeye karşın, toplumumuzda halen bir risk olarak algılanmamaktadır. Gürültü ile ilgili mevzuatımızda bulunan gürültü limit değerleri konusunda etkin denetim ve kontrollerin yapılması, yerel yönetimlerin ve işverenlerin bu konudaki sorumluluklarını yerine getirmeleri konusunda ısrarla izlenmesi gürültü kontrolünde etkili olacağı belirtilmiştir [26].

Topçu ve Işıkdag (2008), yaptıkları çalışmada farklı orandaki çimento tiplerini dikkate alarak genişletilmiş perlit agregası içeren betonun özelliklerini incelenmiştir. Deneylerde belirli oranlarda geliştirilmiş perlitli agrega miktarının artırılmasının betonların basınç ve çekme dayanımı özelliklerini olumsuz olarak etkilediği fakat daha hafif bir malzeme olarak kullanılabilir nitelik kazandığını gözlemlemişlerdir. Çalışmada ayrıca geliştirilmiş perlitli agregaların ısı ve ses yalıtımı özelliği gösterdiği, inşaatlarda ekonomik fayda sağlayan hafif bir malzeme olarak kullanılabilmesi vurgulanmıştır [27].

Anonim (2010), ses yalıtımı ile ilgili 2010 yılında yürürlüğe giren "Çevresel Gürültünün Değerlendirilmesi ve Yönetimi Yönetmeliği" 2011 yılında revize edilmiş ve yönetmeliğin AB uyumlaştırma süreci devam etmektedir. Gürültünün fazla olduğu sanayi bölgelerinde, yoğun trafik alanlarında, eğlence mekânlarında ve konut gibi iç mekânlarda gündüz ve gece müsaade edilen en yüksek ses değerleri yönetmelikle belirlenmiştir [28].

Demirkale ve Aşçıgil (2007), Türkiye'de kentler ve yapıların gürültü açısından sağlıklı olabilmesi için Avrupa Birliği uyum sürecinde yayınlanan ve yürürlüğe giren yönetmelikleri değerlendirmişlerdir. Günlük yaşamda, istenmeyen ses olarak tanımlanan gürültü, insan sağlığını olumsuz etkiler. Gelişmekte olan ülkelerde, sadece işyeri gürültüsü değil, çevre gürültüleri de işitme bozukluğu için risk oluşturmaktadır. 1971'de Dünya Sağlık Örgütü (WHO) tarafından gürültünün, insan sağlığına karşı ana bir tehdit olarak görülmesi gerektiği bildirilmiştir. WHO'nun yaptığı araştırmalara göre Avrupa nüfusunun % 25'i, 65 dB'den fazla şiddette olan, insan sağlığını olumsuz etkileyecek derecedeki gürültüye maruz kalmaktadır. Türkiyede sorunlu bölgelerdeki yapılarda 29/6/2001 tarihli, 4708 sayılı Yapı Denetim

Hakkında Kanun ve 8/9/2002 tarihli, 24870 sayılı Resmi Gazetede yayımlanan "Yapı Malzemeleri Yönetmeliği"ndeki (89/106/EEC) esasları sağlamak koşulu ile yalıtım yapılması zorunludur. Çalışmada ilgili yönetmelilerin çok geniş kapsamlı olduğu önemli olan bu yönetmeliklerin ilgili bütün paydaşlar tarafından doğru ve tam olarak uygulanması gerektiği vurgulanmıştır [29].

He (2005), ısı iletim katsayısını hızlı bir şekilde ölçmek için sıcak plaka metodunu geliştirmiştir. Sıcak plaka 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 tutulur. Ölçüm sırasında, sıcak plaka iki numune parçası arasında sıkıştırılır ve sensöre sabit bir akım verilir. Ek olarak sensör sıcaklık gözlemi yapar, böylece sensörde sıcaklık artışı hassas bir şekilde ölçülür. Bu sıcaklık artışı sensörün etrafındaki malzemenin ısı özelliklerine bağlıdır. Deneyi başlattıktan kısa bir süre için bu sıcaklık artışını izleyerek sensörün çevresindeki malzemenin ısı iletim katsayısı ölçülür. Doğru düzeltmelerle sıcak plaka tekniği geniş bir yelpazedeki malzemelerin ısı iletim katsayısını ve ısı yayılım katsayısını için hızlı ve doğru ölçüm sağlayan bir yöntem olduğu vurgulanmıştır. Bu teknik, yüksek doğrulukla geniş bir aralıkta ısı iletim katsayısını 2,5-5 saniye içerisinde ölçülebilmektedir. Sıcak disk tekniği malzeme incelemesi ve seçimi için değerli bir araç olduğu belirtilmiştir [30].

Jannot ve ark. (2009), düşük yoğunluklu ısı yalıtım malzemelerinin ısı iletim katsayılarını ölçmek için metod geliştirmişlerdir. Palslı yöntemle dayanarak üç katmanlı (pirinç plaka/numune/pirinç plaka) bir ölçüm yöntemi kullanılmıştır. Ölçüm cihazında silindirik numune iki pirinç plaka arasında yerleştirilmiştir. İki adet K tipi termokupl pirinç plakaların iç yüzeyine kaynatılmıştır. Alt plaka aynı çapta ve yalıtılmış olan başka bir dairesel plaka ile ısıtılmıştır. Üstteki pirinç plakanın üzeri açıktır ve çevresiyle olan ısı transferi doğal taşınım ve ışıyım yoluyla gerçekleşmektedir. Isıtılan plakaya bir kaç saniyelik ısı akısı verilip pirinç plakaların sıcaklıkları kaydedilmektedir. Bu veriler kullanılarak ısı iletim katsayısı elde edilebilmektedir. Ölçüm metodu atmosferik basınçta ve vakum altında yapılan deneysel ölçümlerde uygulanabilir olduğu belirtilmiştir. Ayrıca çok düşük ısı iletim katsayısına sahip malzemelerin ($k < 0,15$ W/m.K) ölçümünde % 5'den daha iyi bir hassasiyetle sahip olduğu ve ısı yayılım katsayısı hassasiyetinin malzemenin yoğunluğuna bağlı olduğu vurgulanmıştır [31].

S. Schiavoni, F.D'Alessandro, F.Bianchi, F.Asdrubali (2016), inşaat sektörü için yalıtım malzemelerinin ısı özelliklerini, akustik özelliklerini, ateş tepki ve su buharı direnci tepkilerini çevre sorunlarını da dikkate alarak bir

değerlendirme yapmışlardır. Üç kargir duvar ve bir ahşap duvarda farklı tipteki yalıtım malzemeleri ve farklı montaj türleri (dış, iç ya da boşluk yalıtımı) ile yalıtılmış 10 cm'lik bir yalıtım malzemesi tabakası göz önüne alınarak hem ısı geçirgenlik ve hem de dinamik ısı özellikleri için bir vaka çalışması yapılmıştır. Vaka çalışmasında kullanılan malzemeleri arasında, en iyi performans gösterenlerin poliizosiyanürat (k-değeri 0,022 W/m.K civarında), poliüretan (k-değeri 0,025 W/m.K civarında), kenaf (0.030 W/m.K civarında k-değer), geri dönüşümlü cam elyaf (k-değeri 0,031 W/m.K civarında), XPS (k-değeri 0,034 W/m.K) ve taş yünü (k-değeri 0,040 W/m.K eşit) olduğu belirlenmiştir. En yoğun malzemeler mineralize ağaç lifleri (533 kg/m³), geri dönüştürülmüş kauçuk (en fazla 930 kg/m³) ve hafif genişletilmiş kil agrega (en fazla 750 kg/m³), olduğu tespit edilmiştir. En yüksek özgül ısıya sahip malzemeler ağaç lifleri (2,1 kJ / kg K), mineralize ağaç lifleri (1,8 kJ / kgK), kenevir (1,7 kJ / kgK), kenaf (1,7 kJ / kgK), koyun yünü (1,8 kJ / kgK) ve XPS'dir (1,7 kJ / kgK). Mineral yünler, hafif genişletilmiş kil agrega, vermikülit ve perlit gibi genişletilmiş mineraller ve vakum yalıtım panelleri yangına karşı en iyi reaksiyona sahip malzemelerdir. Çalışmada poliüretan ve poliizosiyanüratın organik malzemeler arasında yangın direnci açısından B Euroclass sınıfında olduğu ancak bazı araştırmalarda bu malzemelerin yangın şartlarında zararlı gazlar açığa çıkardığı vurgulanmıştır [32].

zamanda yerel kaynaklardan üretilmiş yerli malzemelerin geliştirilebileceği öngörülmüştür.

3. YALITIM MALZEMELERİNİN ISI VE SES ÖZELLİKLERİ, ÖNEMLİ KRİTERLER VE STANDARTLAR (HEAT AND SOUND PROPERTIES OF INSULATING MATERIALS, IMPORTANT CRITERIA AND STANDARDS)

3.1. Isıl Özellikler (Thermal Properties)

Bir yalıtım malzemesinin ısı performansını ifade eden ana parametreler kararlı durumda ısı iletim katsayısı (k) ve kararsız durum için ısı yayılım katsayısı D' dir. Isı iletim katsayısı 1 m kalınlığındaki homojen bir malzemenin sıcaklık gradyanının (farkının) 1 K olduğunda birim alanından geçen ısı akışıdır; birimi W/m.K'dir.

Isı yayılım katsayısı, ısı iletim katsayısı yani ısı enerjisi iletim kabiliyeti k ve malzemenin ısı enerjisi depolayabilme kabiliyetini ifade eden yoğunluk ρ ve özgül ısı kapasitesi c_p 'nin çarpımı arasındaki orandır. Bu nedenle ısı yayılım katsayısı, ortamdaki ısı dalgalarının yayılımını açıklar. Birimi m²/s'dir ve malzemenin kendine has özelliklerinden oluşan türetilen bir niceliktir. Yukarıda belirtilen büyüklükler bir dizi yöntem ile ölçülebilir veya değerlendirilebilir. Çizelge 1'de en çok kullanılan uluslararası standartların bir listesini görülmektedir.

Çizelge 1. Isı iletim katsayısı, ısı geçirgenlik ve ısı yayılım katsayısı değerlendirilmesi için yöntemlerin listesi (List of methods for the evaluation of thermal conductivity, transmittance and diffusivity)

Değişken	S.I. ölçüm birimi	Standart	Not
Isı iletim katsayısı, k	W/m.K	EN 12664 [33]	Düşük ısı direnç
		EN 12667 [34]	Yüksek ısı direnç
		EN 12939 [35]	Kalın malzemeler
		ASTM C518 [36]	Isı akış ölçer cihazı
		ASTM C177 [37]	Güvenlikli sıcak plaka aparatı
		ISO 8990 [38]	Sıcak kutu yöntemi
Yoğunluk	kg/m ³	EN 1602 [39]	-
		ASTM C303 [40]	-
Özgül ısı kapasitesi	J/kgK	ISO 11357 [41]	-
		ASTM E1269 [42]	-
Isı yayılım katsayısı	m ² /s	ISO 22007-1 [43]	Genel ilkeler
		ISO 22007-2 [44]	Sıcak disk metodu
		ISO 22007-3 [45]	Sıcaklık dalga analizi yöntemi
		ISO 22007-4 [46]	Lazer flaş yöntemi

Yapılan literatür çalışmalarının genel bir değerlendirmesi yapıldığında, çevreci ve uygun bağlayıcılar kullanılarak gerekli işlemler yapıldığında farklı maddelerden elde edilen kompozit yalıtım malzemeleri üretilebilmektedir. Bu yalıtım malzemelerinin ısı ve akustik yalıtım performansını makul enerji tüketimi, yeterli konfor ve sağlık koşullarını sağlayarak sürdürülebilir nitelikte ve ekolojik aynı

Bir çok katlı duvar için, ısı özellikleri ısı transfer katsayısı [47] ya da U-değeri ile ifade edilmiştir. Bir kompleks bileşen veya homojen olmayan bir malzemenin sıcaklık gradyanının (farkının) 1 K olduğunda birim alanı boyunca geçen ısı akışı olarak ifade edilir. Birimi W/m².K'dir. Isı direnç veya R değeri (m²/K.W) ısı geçirgenlik katsayısının aritmetik olarak tersidir. Ayrıca ısı transfer katsayısı hesaplanırken yalıtım malzemesinin

kalınlığı ile konveksiyon ve radyasyonla ısı transferinin her ikisi de dikkate alınır.

3.1.1. Isı yalıtım malzemelerinde aranan genel özellikler (General characteristics of thermal insulation materials)

Sadece ısıl iletkenlik değerine bakılarak seçilen bir ısı yalıtım malzemesiyle istenilen sonuçlara ulaşmak neredeyse imkânsızdır. Yapıdaki nem ve yoğunlaşma problemleri sebebiyle ısı yalıtım malzemesinin başka özelliklere de sahip olması gereklidir. Isı yalıtım malzemesi seçerken ısıl performansla birlikte dayanıklılık, maliyet, basınç dayanımı, su buharı emilimi ve iletimi, yangına karşı direnci, uygulama kolaylığı ve ısıl iletkenlik da dâhil olmak üzere birçok parametre göz önüne alınmalıdır. Çizelge 2’de ısı yalıtım

inde hala havanın bulunması nedeniyle ısı yalıtım malzemesi için genellikle faydalıdır.

Hava kaynaklı ses yalıtımında olduğu gibibu özellik, malzeme kütleline güçlü bir şekilde bağlıdır. Hafif malzemeler genellikle zayıf ses yalıtım malzemeleridir. Büyük bir yapının ses yalıtımı ağırlıklı olarak duvar veya beton gibi en ağır bileşenlerin performansına bağlıdır. Bir çift duvar söz konusu olduğunda ise arada ses emici malzemenin varlığı boşluk rezonanslarını sınırlamaya ve sonuç olarak duvarın ses yalıtımını arttırmaya izin verir. Ses yalıtım malzemeleri akustik konfor ve konuşma anlama üzerinde olumlu etkisi ile odaların yankılanma süresini azaltmak için kullanılır.

Yankılanma süresinin en uygun değerler oda içinde yapılacak faaliyetlere ve hacmine göre tanımlanır.

Çizelge 2. Isı yalıtım malzemelerinde aranan genel özellikler (General properties of heat insulation materials) [48,49,50,51]

Fiziksel işlevsellik	Dayanıklılık	Ekolojik Açıdan Uygunluk	Uygulama Kolaylığı	Ekonomiklik
Yüksek ısı tutuculuk	Su ve neme dayanıklılık	Çevre ve ekosistem açısından zararsızlık	Kolay işlenebilirlik	Ucuzluk ve kolay temin edilebilirlik
Düşük birim ağırlık	Kimyasal etmenlere dayanıklılık	Sağlık açısından zararsızlık	Üzerine uygun katmanların uygulanmasına olanaklılık	
Koşullara uygun buhar geçirimliliği	Biyolojik etkilere dayanıklılık	Az enerji tüketimi	Sıva tutuculuk	
Yeterli basınç dayanımı	Yüksek sıcaklığa dayanıklılık-yangın emniyeti	Bakım gerektirmezlik ve kullanım sonrası değerlendirilebilirlik		
Yeterli çekme dayanımı	İnsan sağlığına ve çevreye zararlı olmaması	Kokusuzluk		
Boyutsal kararlılık	Yanmazlık ve alev geçirmezlik (yangın sınıfı)			
Isıl iletkenlik; düşük ısı iletim katsayısı	Sıcaklık dayanımı			
Yüksek ısıl direnç	Çürümezlik			
Uygun yoğunluk	Uzun ömürlülük			
	Parazitlere dayanıklılık			
	Buhar difüzyon direnci			
	Mekanik dayanım			

malzemelerinin sahip olmaları gereken özellikler listelenmiştir [48,49].

3.2. Akustik Özellikler (Acoustical Properties)

Akustik bakış açısına göre inşaat malzemeleri ses iletimini karşılaştırma ve çarpan ses dalgalarını yutma kabiliyetleri açısından karakterize edilebilir. İlk durumda hava kaynaklı ve yapısal (darbe) ses yalıtım özellikleri dikkate alınır. Diğer taraftan ses yutumu, sürtünme veya ısı kaybı (gözenekli malzemeler) veya rezonans olayı (delikli ve membran emiciler) nedeniyle bir malzemenin içinde dağılan akustik enerjinin bir bölümü olarak tanımlanır. Gözenekli ses yutucular genellikle iyi ısı yalıtım malzemeleri iken tam tersi her zaman doğru değildir. Ses yutucu malzemeler içinde hareketli havayı bulundurması gerekir. Bu nedenle açık gözeneklilik esastır. Bunun tam tersine kapalı gözeneklilik boşlukların

Katlarda ses yalıtımı söz konusu olduğunda ise, darbe sesi yalıtımı dikkate alınmalıdır. Yani yapı zemini boyunca darbe seslerinin (ayak, düşen nesnelere, vb) iletimini karşılaştırma yeteneği.

Bu durumda iyi bir performans elde etme yolları aşağıdaki gibidir:

- Rahatsız edici gürültünün olduğu alt odaya asma tavan yapmak,
- Rahatsız edici gürültünün olduğu üst odanın döşemesine vinil (sentetik kumaş) veya halı gibi bir esnek tabaka koymak,
- Üst odada yüzer bir döşeme oluşturmak (yapısal levha tarafından esnek bir tabaka ile ayrılmış zemin).

Akustik yalıtım gerçek boyutlu veya küçük numuneleri için hava kaynaklı ve darbe sesi için değerlendirilebilir; ilk durumda ölçümler laboratuvarında veya yerinde

Çizelge 3. Ses yalıtımının değerlendirilmesi ile ilgili yöntemlerin listesi (List of methods for the assessment of sound insulation)

Değişken	Ölçüm birimi	Standart	Not
Ağırlıklı ses azaltma indeksi, R_w	dB	ISO 717-1 [52]	Tek sayı, çinlama odası ölçümleri, gerçek boyutlu numune
Görünür ağırlıklı ses azaltma indeksi, R'_w	dB	ISO 717-1 [52]	Tek sayı, yerinde ölçümler, gerçek boyutlu numune
Ses Azaltma İndeksi, R	dB	ISO 10140 [53] EN 12354-1 [54]	Çinlama odası, gerçek boyutlu numune Tahmin
Görünür ses azaltma indeksi, R'	dB	ISO 16283-1 [55]	Yerinde ölçümler, gerçek boyutlu numune
Ses iletim kaybı, TL	dB	Standart'ı bulunmamaktadır.	Empedans tüpü, küçük numuneler
Ağırlıklı darbe sesi yalıtım iyileşmesi, ΔL_w	dB	ISO 717-2 [56] EN 12354-2 [57]	Tek sayı, çinlama odası ölçümleri, gerçek boyutlu numune Tahmin
Darbe sesi yalıtım iyileşmesi, ΔL	dB	ISO 10140 [53]	Çinlama odası, gerçek boyutlu numune
Ağırlıklı standartlaştırılmış darbe ses basınç seviyesi, $L_{n,w}$	dB	ISO 717-2 [56]	Tek sayı, çinlama odası ölçümleri, gerçek boyutlu numune
Standartlaştırılmış darbe ses basınç seviyesi, L_n	dB	ISO 10140 [53] EN 12354-2 [57]	Çinlama odası, gerçek boyutlu örnek Tahmin
Ağırlıklı görünür standartlaştırılmış darbe ses basınç seviyesi, $L'_{n,w}$	dB	ISO 717-2 [56]	Tek sayı, yerinde ölçümler, gerçek boyutlu numune
Görünür standartlaştırılmış darbe ses basınç seviyesi, L'_n	dB	ISO 16283-2 [58]	Yerinde, gerçek boyutlu numune
Dinamik sertlik	MN/m ³	ISO 9052-1 [59]	Laboratuvar, küçük numuneler

gerçekleştirilebilir. Darbe ses yalıtımı ile ilgili olarak, yüzer bir döşemenin ses yalıtım performansının tahmini, küçük boyutlu numuneler (0,04 m²) üzerinde yapılan dinamik sertlik ölçümlerinin sonuçlarını kullanarak yapılabilir.

Malzemelerin ses yutumu performansı bir dizi yolla ölçülebilir. En yaygın olanı bir çinlama odasında dağınık ses alanında veya bir empedans tüpü içinde bir düzlem dalga alanında yapılan ölçümlerdir. Çizelge 3'de ses yalıtımının değerlendirilmesi için kullanılan yöntemlerin bir listesi gösterilmiştir.

Çizelge 4 'de ses yutumu özelliklerinin değerlendirilmesi için kullanılan yöntemlerin listesi görülmektedir. Listedeki tüm parametreler boyutsuz büyüklüklerdir.

3.2.1. Akustik performansa etki eden temel malzeme özellikleri (Basic material properties affecting acoustic performance)

Aşağıdaki çizelge 5'de akustik performans parametreleri olan ses yutumu ve ses iletim kaybına etki eden temel malzeme özellikler görülmektedir.

4. YALITIM MALZEMELERİ VE SINIFLANDIRILMASI

(INSULATING MATERIALS AND CLASSIFICATION)

Bu bölümde ısı ve ses yalıtımında kullanılan malzemeler sınıflandırılarak ısı ve ses yalıtımı için bu malzemelerde bulunması gereken özellikler hakkında bilgi verilecektir.

4.1. Geleneksel Malzemeler (Traditional Materials)

4.1.1. Taş yünü (Stone wool)

Taş yünü inorganik hammaddeler olan dolomit, bazalt ve diyabaz gibi birkaç çeşit taşların 1400 °C - 1600 °C sıcaklıkta eritilip elyaf haline getirilmesi sonucu üretilen bir ısı ve ses yalıtım malzemesidir. Daha sonra genellikle reçineler, yiyecek cinsi nişasta ve sıvı yağlar gibi bağlayıcılar kullanılarak birbirine bağlanıp lifleri elde edilir [67,68].

Fiziksel Özellikleri: Yoğunlukları 20-200 kg/m³ arasında değişmektedir. Isı iletim katsayıları ise 0,033-0,040 W/m.K arasında değişmektedir. Özgül ısısı ise 0,8-1,0 kJ/kgK arasında değişmektedir. Taş yünü yanmaz olmasına karşın bağlayıcı bakalit, kaplama malzemesi olan mukavva ve bitümlü karton gibi malzemelerin

Çizelge 4. Ses yutum özelliklerinin değerlendirilmesi için kullanılan yöntemlerin listesi (List of methods for the assessment of sound absorption)

Değişken	Standart	Not
Ses yutum katsayısı, α	ISO 354 [60]	Çınlama odası, gerçek boyutlu numune
Ses yutum katsayısı, α	ASTM C423-09a [61]	Çınlama odası, gerçek boyutlu numune
Ses yutum katsayısı, α	ISO 10534-2 [62]	Empedans tüpü, küçük numuneler
Gürültü azaltma katsayısı, NRC	ASTM C423-09a [61]	Tek sayı, çınlama odası, gerçek boyutlu numune
Ses yutum ortalaması, SAA	ASTM C423-09a [61]	Tek sayı, çınlama odası, gerçek boyutlu numune

Çizelge 5. Akustik performansa etki eden temel malzeme özellikleri (Basic material properties affecting acoustic performance) [63,64,65,66].

Makro yapı özellikleri [63,64]	Mekanik özellikler	Gözenekli yapı içerisindeki hava özellikleri [65]	Malzemenin fiziksel özellikleri [66]
Hava Akış direnci Gözeneklilik Kıvrımlılık Termal Karakteristik uzunluk Vizkoz karakteristik uzunluk	Kayıp faktörü, Kayma modülü, Young modülü Poisson Oranı	Havanın yoğunluğu, Gözenek içerisindeki sesin hızı, Havanın viskozitesi, Özgül ısı oranı Prandtl sayısı Hava akışı hızı	Uygun birim ağırlık Malzeme yoğunluğu Kalınlık Boyutsal kararlılık

etkisiyle sıcaklık dayanımı azalır. 250 °C'den fazla sıcaklıklar karşısında deforme olur.

Basınç, çekme ve kopma dayanımı yoğunluğuna göre değişmekle birlikte liflerin her yönde dağılması sebebiyle cam yününe göre daha yüksektir. Isıl değişiklikler etkisiyle boyutsal değişikliğe uğramamaktadır [49].

Buhar geçirgenlik direnci 1,1-1,4 ile neredeyse cam yününe eşdeğerdir. İçeriğindeki hava boşluklarının gerek buhar yoğunlaşması gerekse doğrudan su etkisiyle ıslanması gerekmektedir. Aksi takdirde taş yünü malzemesinin ısı yalıtım performansı su buharı yoğunlaşmasından olumsuz etkilenerek ısı iletkenlik özelliği artacak ve kaliteli çözümler malzeme bünyesi bozulmaya başlayacaktır [49].

Kimyasal olarak cam yününe göre daha dayanıksızdır. Bileşiminde kalsiyum varsa sert asitlerden kolayca etkilenir kükürt varsa metaller üzerinde korozyona sebep olabilir. Higroskopik değildir ve çürümektedir. Yangın dayanımları açısından sınıflandırıldığında, A1 (yanmaz) ve A2 (zor yanıcı) olabilirler [49].

Kullanım yeri ve amacına göre farklı boyut ve yoğunlukta değişik kaplama malzemeleri ile panel, keçe, rulo, şilte, levha, boru ve dökme şeklinde üretilmekte ve ticarileştirilmektedir. Sıcığa ve rutubete maruz kalması halinde dahi boyutlarında bir değişim olmaz. Taş yünü iyi bir ses emici kabul edilebilir ve genellikle boşluk yalıtımı için kullanılır. Ayrıca genel olarak yanmaz özelliğe sahip olduğundan cephe kaplamalarının arkasında ısı ve ses yalıtımı amacıyla, havalandırılmalı cephelerde yangın güvenliği amacı ile kullanılır [68]. Ekolojik Özellikleri cam yünü malzeme özellikleriyle benzer özellikler gösterirler.

Taş yünü malzemeleri üreticiler tarafından geri dönüştürülebilir veya katı atık sahasında yok edilebilir [69].

4.1.2. Cam yünü (Glass wool)

Cam yünü 1300-1450 °C'de doğal silis kumu ve cam (genellikle geri dönüşümlü) karıştırılarak üretilen bir ısı ve ses yalıtımı malzemesidir. Liflere dönüşümü santrifüjleme ve üfleme işlemleri sayesinde gerçekleşir. Daha sonra toz önleyici yağ ve fenolik reçinelerin ilavesi ile lifler bağlanır [32,67].

Kullanım yeri ve amacına göre farklı boyut ve yoğunlukta değişik kaplama ve katkı malzemesi ile şilte, levha, boru ve dökme şeklinde üretilmektedir. Günümüzde özel sistemlerle yerinde sprey olarak da uygulanabilmektedirler [68].

Fiziksel Özellikler: Yoğunlukları 10-120 kg/m³ arasında değişmektedir. Isı iletim katsayısı 0,040 W/m.K'dır. Bina uygulaması için kullanılan cam yünü malzemelerinin ısı yalıtım performansı yüksek sıcaklık ve nem koşullarından etkilenmemektedir. Cam lifleri yangın dayanımları açısından sınıflandırıldığında A1 (yanmaz) ve A2 (zor yanıcı) olabilirler. Buna karşın bağlayıcı baskın sebebiyle 250°C'den fazla sıcaklıklar karşısında deforme olur [49,70].

Basınç, çekme ve kopma dayanımı yoğunluğuna göre değişmekle birlikte liflerin yüzeye paralel olarak yer alması sebebiyle genel olarak düşüktür. Dış kuvvetlerin etkisiyle kolayca boyutsal değişikliğe uğrayabilmektedir. Bununla birlikte 8 ila 11 MN/m³ arasında dinamik sertliğe sahip

camyününden yapılmış yenilikçi ürünler piyasada bulunmamaktadır [32].

Buhar geçirgenlik direnci 1,2 ile neredeyse havaya eşdeğerdir. İçeriğindeki hava boşluklarının gerek buhar yoğunlaşması gerekse doğrudan su etkisiyle ıslanmaması gerekmektedir. Aksi takdirde ısı iletkenlik özelliği artacak ve bakalit çözülerek malzeme bünyesi bozulmaya başlayacaktır. Kimyasal olarak nötr olup hidroflorik asit dışında asitlerden etkilenmemektedir. Higroskopik değildir ve çürümektedir [49].

Ekolojik Özellikler: Hammaddelerin yüksek sıcaklıklarda eritilmesi söz konusu olduğundan orta derecede enerji kullanımı söz konusudur. Cam lifi üretimine bağlı olarak oluşan toz ve partiküller etrafa saçılarak deri, gırtlak ve göğüs rahatsızlıkları yaratabilmektedir. Her ne kadar Alman ve Kanada hükümeti tarafından kanserojen etkisi olmadığı açıklanmış olsa da özellikle imalat sektöründe çalışan 30 yıllık işçilerin % 25'inde akciğer kanseri gözlenmektedir. Buna sebep olan cam yünü liflerinin, malzeme bünyesinden kopması ve iç ortam havasına karışması söz konusu olabileceğinden kullanıcıların etkilenmemesi açısından önlemler alınmalıdır. Cam üretimine bağlı olarak sülfür ve nitrojen oksidasyonundan asit yağmuru oluşturabilecek salınımlar gerçekleşmektedir. Kalker ve silis çıkarmaya bağlı olarak yerel toprak kalitesine olumsuz etkileri olabilir. Biyolojik olarak parçalanmaz, zamanla bozulmaz, çürümez, küf tutmaz, korozyon ve paslanma yapmaz, böcekler ve mikroorganizmalar tarafından tahrip edilemez. Geri dönüştürülebilmesi konusunda hava kalitesine olumsuz etkileri olabileceğinden sağlıklı olacağı düşünülmektedir. Ancak günümüzde geri dönüştürülerek büyük oranda zemin dolgusu vb. alanlarda yeniden kullanılabilirler [68,69].

4.1.3. Mineral yün (Mineral wool)

Mineral yün cam yünü (cam elyafı) ve taş yünü içerir, normal olarak paspas ve pano olarak üretilir ancak dolgu malzemesi olarak da üretilmektedir. Hafif ve yumuşak mineral yün ürünleri ahşap iskeletli evler ve diğer boşlukları olan yapılarda uygulanır. Ağır ve sert mineral yün panolar yüksek kütle yoğunlukları ile ısı yalıtım malzemesi olarak kullanılır. Taşıyıcı yükler için, dairelerde veya çatılarda kullanımı uygundur. Mineral yün aynı zamanda çeşitli boşlukları ve alanları doldurmak için dolgu malzemesi olarak kullanılabilir. Mineral yünün ısı iletim katsayısı değerleri 30 ve 40 mW/m.K arasında bulunmaktadır. Mineral yünün ısı iletim katsayısı sıcaklık, nem içeriği ve kütle yoğunluğu ile değişir. Bir örnek olarak mineral yününün ısı iletim katsayısı sırasıyla % 0 hacimden % 10 hacme artan nem içeriği ile 37 mW/m.K'den 55 mW/m.K'e artabilir. Mineral yün ürünleri delikli olabilir ve ayrıca ısıl direnç kaybı olmaksızın inşaat alanında kesilebilir ve boyutlandırılabilir [5].

4.1.4. Genleştirilmiş polistiren (Expanded polystyrene-EPS)

EPS katı köpük halinde termoplastik, kapalı gözenekli, tipik olarak beyaz renkli bir ısı yalıtım malzemesidir. EPS genellikle polistiren tanelerine ilave edilen pentanın

buharlaştırılmasıyla elde edilir. EPS kapalı gözeneklilik ve düşük yoğunluk nedeniyle önemli bir akustik özellik göstermez [67, 68].

Fiziksel Özellikler: Polistiren'in ısı iletim katsayısı 0,031 ila 0,037 W/m.K arasındaki, yoğunluğu 15 ila 75 kg/m³ arasında ve özgül ısısı yaklaşık 1,25 kJ/kgK'dir. Malzeme kolay yanıcı olduğundan ve yanarken tehlikeli gazlar açığa çıkardığından imalat sürecinde genellikle bir yangın geciktirici ilave edilir. 80°C'den fazla sıcaklıklar karşısında yanarak özelliğini yitirir. Basınç (0,012-0,062 N/mm²), çekme ve kopma dayanımı yoğunluğuna, hücre şekillerine ve dizilimlerine göre değişmekle birlikte düşük yoğunluğuna rağmen yüksektir. Dış kuvvetlerin etkisiyle boyutsal değişikliğe uğramamaktadır. Belirli bir kullanım süresi sonunda içeriğindeki hapsolmuş gazın havayla etkileşimi halinde ısı yalıtım özelliğini yitirebilir. Buhar geçirgenlik direnci 15-100 ile oldukça geçirimsizdir. Kapiler ve higroskopik olmadığından bünyesine su almaz ve buna bağlı olarak ısı yalıtım özelliğini yitirmez. Bununla birlikte bazı araştırmalar EPS'nin ısı iletim katsayısının nemden etkilendiğini ortaya koymuştur. Kuru EPS malzemesini 4 saat süreyle bağıl nem oranı % 90 olan bir iklim odasında tutarak, ısı iletim katsayısında % 1,4 ile % 2,1 arasında bir artış tespit edilmiştir [49, 71].

Kimyasal olarak çeşitli çözücülere dayanıksızdır ve güneş ışınlarından etkilenir. Biyolojik etkilere dayanıklıdır ve çürümektedir. Yangın dayanımları açısından sınıflandırıldığında, B1 (zor alevlenici) ve B2 (normal alevlenici) olabilirler [49].

Ekolojik Özellikler: Hammadde olarak petrokimyasallar, dolayısıyla yağ ve gaz kullanılması sebebiyle üretimde oldukça yüksek enerji kullanımına neden olurlar. Dünyadaki yağ tüketiminin % 4'ü plastik üretimi için kullanılmakta olup dünyadaki yağ rezervleri sadece 40 yıl daha kullanılabileceği öngörülmüştür. Petrokimyasal üretime bağlı olarak partikül, yağ, fenol ve ağır metaller gibi atıklar oluşmakta bu da dünya üzerindeki toksik emisyonların yaklaşık yarısını oluşturmaktadır. Petrokimyasal rafinerileri sülfür ve nitrojen oksidasyonundan asit yağmuru oluşturabilecek salınımların ve hidrokarbonlar gibi fotokimyasal aşındırıcıların açığa çıkmasında büyük rol sahibidirler. İşlenmemiş yağ çıkarımı ve nakliyesi yerel anlamda olumsuz etkilere neden olabilmektedir. Yangın halinde, karbon monoksit (CO), karbon dioksit (CO₂) dumanı ve buharı oluşturarak sağlık açısından büyük tehditler oluşturabilmektedirler [69].

Kullanım yeri ve amacına göre farklı boyut ve yoğunlukta kalıp olarak üretilebilmektedir. Genellikle yalıtım performanslarını kaybetmeden değişik kenar ve yüzey şekillerinde kolayca işlenip kesilebilir levha ve paneller halinde kullanılabilir. Bu tür malzemelerin geri dönüşüm süreci uzmanlaşmış endüstriler tarafından gerçekleştirilmektedir.

4.1.5. Ekstrüde polistiren (Extruded polystyrene-XPS)

XPS, bir şişirme maddesi ilavesi ile polistiren tanelerinin bir ekstrüzyon presine eritilerek levha haline getirilmesi suretiyle üretilmektedir. XPS, EPS'ye benzer yalıtım özelliklerine sahiptir, ancak daha az nemi (% 2-4'e karşı

% 0,3) emer ve nem ısı iletim katsayısı değerlerini olumsuz olarak etkiler [32,72].

Fiziksel Özellikler: Yoğunlukları 25-50 kg/m³, özgül ısısı 1,3 -1,7 kJ/kg.K, ısı iletim katsayıları ise 0,028-0,036 W/m.K arasında değişmektedir. XPS, EPS'ye benzer yangına karşı tepki özelliklerine sahiptir. Basınç (0,20-0,70 N/mm²), çekme ve kopma dayanımı yoğunluğuna, hücre şekillerine ve dizilimlerine göre değişmekle birlikte, geliştirilmiş polistirene kıyasla daha yüksektir. Dış kuvvetlerin etkisiyle boyutsal değişikliğe uğramaktadır. Belirli bir kullanım süresi sonunda içeriğindeki hapsolmuş gazın havayla etkileşimi halinde ısı yalıtım özelliğini yitirebilir. Buhar geçirgenlik direnci 80-220 ile neredeyse geçirimsizdir. Üretim tekniği dolayısıyla kapalı gözenekli olup Kapiler ve higroskopik olmadığından bünyesine su almayan bir ısı yalıtım malzemesidir. Kimyasal olarak çeşitli çözücülere dayanıksızdır ve güneş ışınlarından etkilenir. Biyolojik etkilere dayanıklıdır ve çürümemektedir. Yangın dayanımları açısından sınıflandırıldığında B1 (zor alevlenici) ve B2 (normal alevlenici) olabilirler [49].

Ekolojik Özellikler: Geliştirilmiş polistiren malzeme özellikleriyle benzer özellikler gösterir. Geliştirilmiş polistirende pentan yerine genellikle hidro floro karbon (HFC) ve karbon dioksit (CO₂) gazı kullanılır. HFC'ler CO₂'ye göre küresel ısınmaya sebep oluş bakımından 3200 kat daha etkilidir [69].

Kullanım yeri ve amacına göre farklı boyut ve yoğunlukta değişik kenar ve yüzey şekillerinde levha olarak üretilmektedir. Endüstride sandviç çatı ve cephe panellerinde, frigorik kamyon kasalarında, soğuk hava depolarında, acil durum barakalarında, şantiye ve askeri amaçlı korunma ünitelerinde, doğrama sistemlerinin camsız bölümlerinde, ısı yalıtımlı sandviç ara bölme duvarlarında, besi çiftliklerinde kullanılabilir [68].

4.1.6. Fenolik köpük (Phenolic foam)

Fenolformaldehit bakalitine şişirici ve sertleştirici maddelerin katılmasıyla elde edilen organik bir malzemedir. Fenol köpüğü levhaları; muhtelif yoğunluklarda, sert fakat kırılğan, küçük gözenekli ve yüzeyi sürtünmeyle tozlaşan bir yapıya sahiptir. Açık ve kapalı hücre yapısında olabilirler [49, 68].

Fenolik köpük fiziksel özellikleri; düşük ısı iletim katsayısı değerleri 0,018-0,032 W/m.K ve diğer plastik köpüklerden (80-160 kg/m³'e kadar) daha yüksek yoğunluk ile karakterize edilirler. Özgül ısısı yaklaşık 1,3-1,4 kJ/kgK'dir. Zor alev alıp yangın halinde duman ve zehirli gaz oluşumu çok azdır. 150 °C'den fazla sıcaklıklar karşısında deforme olarak özelliğini yitirir. Basınç, çekme ve kopma dayanımı açık ve kapalı gözenekli olması durumuna göre değişiklik göstermektedir. İçeriğindeki freon gazı sayesinde ısı yalıtım değerini zamana bağlı olarak yitirmez. Buhar geçirgenlik direnci 3-40'dir (levha ve yerinde köpük oluşuna göre değişiklik gösterir). Açık gözenekli olanlar kapilerdir ve nem etkisiyle özelliklerini yitirebilmektedir. Kimyasal olarak potasyum ve yoğun asitlere dayanıksızdır. Güneş ışınlarından

etkilenir. Biyolojik etkilere dayanıklıdır ve çürümemektedir. Yangın dayanımları açısından sınıflandırıldığında B1 (zor alevlenici) olmak üzere plastik yalıtım malzemeleri arasında en yüksek yangın dayanımı gösteren malzemelerdir [32, 49].

Ekolojik Özellikler: Diğer plastik yalıtım malzemelerin özellikleriyle benzer özellikler gösterirler. Yapı ömrü boyunca kullanılacak kadar dayanıklılıkları yüksektir. İçeriğindeki bulunan fenol oldukça toksik bir malzemedir. Fenolik köpük uygulamaları sırasında çalışanların kimyasal bileşenlerin buharına maruz kalma riskleri olduğundan önlemler alınması gereklidir [69].

4.1.7. Poliüretan (Polyurethane-PUR)

PUR, poliöl ve izosiyanürat denen iki kimyasal malzemenin karıştırılarak hava yardımıyla köpürüp sertleşmesiyle elde edilir. Levha, sandviç panel ve boru kesitleri olarak üretilerek veya inşaat alanında püskürtme yöntemiyle ve köpük olarak genişletilerek kullanılan bir ısı yalıtım malzemesidir [49,68].

Fiziksel Özellikler: Isı iletim katsayısı 0,021 ila 0,040 W/m.K, yoğunluk 15 ila 45 kg/m³ arasında değişir ve özgül ısı 1,3 ila 1,45 kJ/kgK arasında değişir. Kolayca alev alıp yangın halinde yoğun duman oluşumuna sebep olabilir, bu nedenle özel katkı maddelerinin kullanılmasını gerektirir. 120 °C'den fazla sıcaklıklar karşısında deforme olarak özelliğini yitirir. Basınç (0,10-0,90 N/mm²), çekme ve kopma dayanımı yoğunluğuna, hücre şekillerine ve dizilimlerine göre değişmekle birlikte, yüksektir. Dış kuvvetlerin etkisiyle boyutsal değişikliğe uğramaktadır. Ancak tek taraflı ısıtılması sonucu deformasyona uğrar, bu nedenle levha halinde üretildiğinde iki yüzeyinin de kaplanması gerekir. Buhar geçirgenlik direnci levha halinde üretilenlerde 40-50, yerinde püskürtülenlerde 3-8'dir. Kapiler ve higroskopik olmadığından bünyesine su almaz ve buna bağlı olarak ısı yalıtım özelliğini yitirmez. Kimyasal olarak hafif asitlere, alkalilere ve deniz suyuna karşı dayanıklıdır. Güneş ışınlarından etkilenir. Biyolojik etkilere dayanıklıdır ve çürümemektedir. Yangın dayanımları açısından sınıflandırıldığında B1 (zor alevlenici) ve B2 (normal alevlenici) olabilirler [32,49].

Ekolojik Özellikler: Rijit poliüretan köpük üretiminde halen, ozon tabakasına zararı yüksek olan (kloro floro karbon) CFC kullanılmaktadır. Kurulum işçilerinin yerinde köpük uygulamalar sırasında, uçucu poliizosiyanata maruz kalması sonucunda nefes darlığı ve çeşitli alerjik reaksiyonlar geçirme olasılığı vardır. Yangın sırasında hidrojen siyanür gazı açığa çıkarması nedeniyle 1989 yılında mobilya yapımında kullanımı yasaklanmış olmasına rağmen yapıda kullanımı serbesttir. Formaldehit yüzdesi oldukça yüksek olması sebebiyle sağlık açısından büyük tehditler oluşturabilmektedir. Termoset bir plastik olduğundan geri dönüştürülemez, yeniden şekil verilemez ve yeniden kullanılamaz [69].

4.1.8. Poliizosiyanürat (Polyisocyanurate-PIR)

PIR, poliüretana benzer bir kimyasal reaksiyon ile oluşturulur ancak bir poliestere türevi poliöl ve daha yüksek

oranda metilen difenil diizosiyanat kullanılır. PIR malzemeler PUR olanlara göre daha yüksek bir yangın dayanımı ile karakterize edilir (B sınıfı, E sınıfı poliüretan yalıtıktan daha iyi) PIR malzemeler köpük pilastikler arasında en iyi yangın dayanımı olanlardır. Polyisocyanurate PUR yalıtkan ile karşılaştırıldığında 0,018 ve 0,027 W/m.K arasında daha düşük bir ısı iletim katsayısı ile tanımlanırlar ve yoğunluk (15-45 kg/m³) ve özgül ısı (yaklaşık 1,4 kJ/kgK) değerleri benzerdir. Bu yalıtım malzemesinin geri dönüşümü uzman sanayi kuruluşları tarafından yapılmalıdır [32,73,74].

4.1.9. Selüloz (Cellulose)

Selüloz haşarat, yangın ve çürümeye karşı direncini arttırmak için geri dönüştürülmüş kâğıtlar, ağaç lifleri ve bazı kimyasal kompozitlerin bir öğütücüde karıştırılıp birleştirilmesi ile üretilmektedir. Panel ve paspas olarak üretilebile duvar boşluklarına üflenebilen gevşek bir malzeme olarak daha yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Selüloz 0,037 ile 0,042W/m.K arasında bir ısı iletim katsayısı, 30 ve 80 kg/m³ arasında bir yoğunluk ve özgül ısı 1,3 ve 1,6 kJ/kgK arasında değişmektedir [32,75].

Gözeneklilik ve akış direnç değerleri ses yutumu ve boşluk yalıtımı için yeterli olup ısı ve ses yalıtımı sağlamak amacıyla kullanılabilir. Ayrıca esnek bir malzeme olarak selüloz panellerin yüzer döşemelerde akustik yalıtım amaçlı kullanımı uygundur. Bu malzemeler yalıtım özelliklerinde istenmeyen azalmaları engellemek için üfleme işleminden sonra sıkıştırılmış olmamalıdır. Bu malzemeler geri dönüştürülebilir fakat bor tuzlarının içeriğinden dolayı gübreleştirme amaçlarına uygun değildir.

4.1.10. Mantar (Cork)

Meşe mantarı ağacı kabuklarının öğütülerek yüksek sıcaklıklarda fırınlanmasıyla elde edilir. Bazı ağaç türlerinden elde edilen mantar granülleri yüksek sıcaklık ve basınç etkisi altında kendi reçineleri ile birbirlerine bağlanırlar (aglomere mantar). Bazı türler için de çeşitli katkı maddeleri ve bağlayıcılar kullanmak gerekebilir (emprenye mantar). Açık hücreli yapıdadırlar.

Meşe mantarı ağacı malzemeleri ısı ve akustik performansları nedeniyle inşaat sektöründe yüzer şap ve ahşap döşemelerin altında, yumuşak ve esnek olmasından ötürü çatılarda özellikle ısı ve ses yalıtımının birlikte çözülmesi beklenen durumlarda yaygın olarak kullanılmaktadır [49]. Mantar tanelerinden yapılmış malzemeler de darbe sesi yalıtımı, hava ile yayılan sesin yalıtımı ve ses yutumu için iyi akustik özelliklere sahiptirler [76].

Bu malzemelerin ısı iletim katsayısı 0,037 ila 0,050 W/m.K arasında, yoğunluğu 110 ila 170 kg/m³ arasında, özgül ısı ise 1,5 ila 1,7 kJ/kgK arasındadır [77,78].

Bu malzemeler paneller, şeritler halinde üretilebilirler. Katkısız veya sıva katkılı olarak kullanılabilir ve kolaylıkla geri dönüştürülebilir. Zor yanan bir malzeme olmasına karşın alev alınca sonuna kadar yanmaktadır. 130°C'den fazla sıcaklıklar karşısında deforme olur. Buhar geçirgenlik dirençleri 5-10'dur. Basınç (0,10-0,20 N/mm²), çekme ve kopma dayanımı yoğunluğuna göre

değişmekle birlikte, darbesel etkilere dayanımları yüksektir. Higroskopiktirler ama bünyelerine su almazlar. Kimyasal olarak halojenlere, amonyağa ve eter yağlarına dayanıksızdır. Organik oluşları sebebiyle biyolojik etkilere açıktır ve çürüyebilirler. Yangın dayanımları açısından sınıflandırıldığında B2 sınıfı normal alevlenicidirler. Bu nedenle katkı maddeleriyle bu özellikleri iyileştirilmeli ve detaylandırmada çeşitli önlemlerin alınması gerekir [49].

Ekolojik Özellikler: Mantar malzemeler toksik veya kanserojen etkileri olmayan doğal ürünlerdir. Hammadde kaynak kullanımını olarak tamamen yenilenebilir malzemelerdir ancak dış kabuğu zarar görürse ağaç enfekte olabilir. Üreticiler tarafından verilen bilgilere göre üretim ve işleme enerjileri bakımından bir miktar enerji kullanımı söz konusudur. Genellikle Portekiz, İspanya, Cezayir ve Korsika'da yetiştirilebilen bir meşe ağacı türünden elde edilebildiği için nakliye enerjileri yüksek olabilmektedir [69].

4.1.11. Ağaç lifleri (Wood fibers)

Sürdürülebilir ormancılıktan, kereste fabrikası atıklarından ve orman bakım çalışmalarından elde edilen ağaç yalıtım amaçlı ahşap lif üretiminde kullanılabilir. Bir bağlayıcı eklenebilir; alternatif olarak ahşap lignin (odun özü) alüminyum sülfat kullanılarak aktif hale getirilebilir. Eklenen katkı maddesi böcek ilacı ve anti-güve gibi davranır [79]. Bu malzemelerin ısı iletim katsayısı 0,038 den 0,050 W/m.K'e yoğunluğu 50 den 270 kg/m³'e ve özgül ısı 1,9 dan 2,1 kJ/kgK arasında değişir. Isı iletim katsayısı sıcaklık ve nem içeriği değerlerinin artması ile artar [80]. Ağaç liflerinden yapılmış dirençli malzemeler 30 ve 50 MN/m³ arasında dinamik sertlik ile karakterize edilir. Ağaç lifleri kolaylıkla geri dönüştürülebilir.

4.1.12. Mineralize ağaç lifleri (Mineralized wood fibers)

Bu malzemeler kavak, köknar (veya diğer hızlı büyüyen bitkiler) ya da kereste endüstrisinin artıklarından türetilen ağaç malzemelere bir mineralizasyon işlemi uygulanarak elde edilmiştir. Yapılan işlemler ateş, kemirgenler ve böceklerle karşı liflerin direncini artırır. Ağır paneller oluşturmak için bağlayıcı madde olarak kaliteli çimento kullanılmaktadır (Yoğunluk 320 ila 600 kg/m³). Isı iletim katsayısı 0,060 ve 0,107 W/m.K arasında ve özgül ısıları 1,8 ve 2,1 kJ/KgK arasında değişmektedir. Akustik yalıtım özellikleri ile ilgili olarak 58 dB ağırlıklı ses azaltma indeksine sahip mineralize ağaç lifleri kullanan sistemler vardır. Bu malzemeler, beton agregaları gibi geri dönüştürülebilir [32].

4.1.13. Hafif Genleştirilmiş Kil Agregası (Lightweight expanded clay aggregate)

Hafif genişletilmiş kil agregası yüksek sıcaklıklarda kil genişletme işlemleri kullanılarak üretilmiş hücreli bir malzemedir [81]. Granüllü malzeme serbest veya sıva ile karıştırılarak kullanılabilir. Ayrıca hafif beton üretimi için de kullanılır [82]. Bu malzemelerin ısı iletim katsayısı oldukça yüksektir (0,08-0,20 W/m.K), ancak yüksek yoğunlukta (290-750 kg/m³) düşük ısı yalıtım katsayısı

seviyelerinin elde edilebilir. Hafif genişletilmiş kil agrega'nın özgül ısısı 0,9 ila 1,0 kJ/kgK arasında değişmektedir [32]. Hafif genişletilmiş kil agrega geniş bir frekans aralığında ses emici olarak etkin bir şekilde kullanılabilir [83]. Hafif genişletilmiş kil agrega beton veya dolgu alanları atığı için agrega olarak geri dönüştürülebilir.

4.1.14. Genleştirilmiş Vermikülit (Expanded vermiculite)

Vermikülit, volkanik mağma kaynaklarından elde edilen bir mineraldir. Yüksek ısı (800-1100 °C) altında işlenerek hacmi genişler, geçirgenliği artar ve hacim ağırlığı belirgin bir şekilde düşerek şekil değiştirir. Elde edilen ürün çok hafif, temiz, kokusuz ve sterildir [68].

Tuğla ve hafif betonlarda bağayıcı olmadan (tane boyutu 0,1-15 mm) veya bir bağlayıcı madde ile karıştırılarak kullanılabilir ve ısı yalıtım performansı uzun bir süre için sabittir [84,85,86]. Çoğu mineral malzeme gibi kemirgenler ve böcekler tarafından hasar görmez. Genleştirilmiş vermicülit'in ısı iletim katsayısı 0,062 ila 0,090 W/m.K arasındadır. Bağlayıcı ile karıştırıldığında 0,080 ve 0,100 W/m.K arasındadır. Serbet (sıkıştırılmamış) malzemenin yoğunluğu 85 ve 105 kg/m³ arasında ve özgül ısısı 0,8 ve 1 kJ/kgK arasındadır [32]. Diğer granüllü malzemelerde olduğu gibi gözenekli ortamda iyi akustik performans doğru tane boylarını seçerek, doğru bağlayıcı yoğunluğunu ve kalınlıklarını kullanarak elde edilebilir [86].

Malzeme ekolojik olarak inorganiktir ve 20 yıl boyunca yapısı bozulmaz. Çok yüksek su tutma kapasitesine sahiptir. Ekstra hafif ağırlıktır. Yüksek havalanma kapasitesine sahiptir. Absorbe edilen sıvıları yavaşça serbest bırakma özelliği yanında düşük ısı geçirgenliği ile yüksek ısı yalıtım özelliğine sahiptir [68]. Genleştirilmiş vermicülit zararsız olup ısıtıldığında tehlikeli gazlar açığa çıkartmadığından güvenli bir şekilde kullanılabilir. Kullanım ömrünün sonunda yeniden kullanılabilir veya beton için agrega olarak geri dönüştürülebilir [87-89].

4.1.15. Genleştirilmiş Perlit (Expanded perlite-GP)

Sülfatlı organik tortul bir taş olan perlitin 900-1100 °C'de şok ısı ile genleştirilmesiyle elde edilir. Karma (açık ve kapalı) hücreli yapıdadır. Perlit bünyesinde % 2 – % 6 oranında su bulunduran volkanik bir kayadır; genellikle gri veya koyu gri renktedir. Perlitin kimyasal yapısının yaklaşık % 75'ini silika (SiO₂) ve % 15'ini alüminyum oksit (Al₂O₃) oluşturmaktadır. Volkanik bir taş olan perlitin hacmi 850 – 1100 °C arasında ısıtıldığında yapısında bulundurduğu suyun ve sıcaklığın etkisiyle 5 ila 25 kat arasında artmaktadır [68].

Genleşmiş perlit fiziksel Özellikleri: yoğunluğu 80 ve 150 kg/m³, ısı iletim katsayısı 0,040 ve 0,052 W/m.K, özgül ısısı 0,9 ve 1,0 kJ/kgK arasındadır. Genleştirilmiş perlit diğer mineral malzemelerle karşılaştırıldığında en düşük ısı iletim katsayısı ile tanımlanır. Genleştirilmiş perlit ile yapılmış paneller yüksek yoğunluğa (150 - 280 kg/m³) sahiptir ancak ısı yalıtım özellikleri ayıdır. İyi

bir ses yutucu olarak ses yutma katsayısı hafif genişletilmiş kil agrega ve genişletilmiş vermicülit gibi diğer granüllü malzemelere benzerdir [86,90].

Yanmaz ve yangın halinde alev geçirmez, toksik değildir. 1000°C'ye kadar özelliklerini yitirmeden kullanılabilir. Basınç (0,15-1,00 N/mm²), çekme ve kopma yoğunluğuna bağlı olarak değişiklik gösterir. Buhar geçirgenlik direnci 1,8'dir. Katkı maddesi içermiyorsa kapiler bir malzemedir, buna bağlı olarak ısı yalıtım özelliğini yitirebilir. Kimyasal olarak nötr olduğundan asitler ve bazlardan etkilenmez. Güneş ışınlarından etkilenmez. Biyolojik etkilere dayanıklıdır ve çürümektedir [52].

Ekolojik Özellikler: Hammadde olarak perlit filizi çıkarımına bağlı toprak kalitesine ve zemin suyuna olumsuz etkiler yaratabilir. Yeniden kullanılabilir, alçı ve çimento sıva katkısı olarak kullanılmak üzere geri dönüştürülebilir [69]. Gevşek dolgu yalıtım malzemesi olarak veya sıva, kompozit panel, tuğla ve beton gibi çeşitli malzemelerin bünyesine serbest bir bağlayıcı madde ile karıştırılarak kullanılabilir [68].

4.2. Alternatif Malzemeler (Alternative materials)

4.2.1. Kenevir (Hemp)

Kenevir hint keneviri'dan üretilen genellikle polyester elyaf ve yangın geciktiricilerle karıştırılmış bina uygulamaları için kullanılan bir tekstil lifidir. Kenevirin ısı iletim katsayısı 0,038 ila 0,060 W/m.K arasında yoğunluğu 20 ila 90 kg/m³ arasında ve özgül ısı 1,6 ila 1,7 kJ/kg K arasındadır. Kenevir esaslı malzemeler her doğal materyal gibi havadan büyük miktarda su emme eğilimi gösterirler ve bunun sonucunda ısı iletim katsayıları artar [32, 91]. Zach ve ark. çeşitli hidrofobik katkı maddeleri ile yapılan uygulamaların etkilerini test ettiler. Bu malzemelerin nem artışı % 31-34 oranında içerebileceklerini tespit ettiler [92]. Kymäläinen ve ark. tarafından gerçekleştirilen karşılaştırmalı pazar ve performans analizi çalışmasında kenevir lifi malzemesi öncelikle daha uzun bir kullanım süresine olanak tanıyan biyolojik bozunabilirlik, düşük ısı iletim katsayısı ve bazı ekolojik özellikleri nedeniyle ısı yalıtım malzemesi olarak potansiyelini kanıtlamıştır [91]. Bununla birlikte, bu malzemelerin nem, kemirgenler, böcekler ve serbest suya karşı korunması gerekir. Korjenic ve ark kenevir lifleri (% 64 ve % 48), mıcır (sırasıyla % 16 ve % 32) ve bir bağlayıcı kullanılarak elde ettikleri numuneleri test etmişlerdir. Yoğunluğu 82 kg/m³ olan malzeme için ölçülen en düşük ısı iletim katsayısı değeri 0,039 W/m.K bulunmuştur [93]. Kenevir mıcırı, bağlayıcı ve su karıştırılarak oluşturulan yenilikçi bir materyal Glé ve ark. tarafından geliştirilmiş ve çalışılmıştır. Çalışmada ısı iletim katsayısı yaklaşık 0,060 W/m.K ve 150 Hz üzerinde en iyi performans gösteren karışım için ses yutma katsayısı yaklaşık 0,5 olarak elde edilmiştir [94]. Kenevir verimli toprağa ihtiyacı yoktur, gübrelemeye gerek duymaz, hızlı büyür ve kolay işlenebilir [68]. Atık kenevir esaslı malzemeler geri dönüştürülebilir veya atık toplama alanlarında imha edilebilir.

4.2.2. Kenaf (Kenaf)

Kenaf lifleri 2 yıl içinde yüksekliği 3,5 m ulaşabilen hızla büyüyen bir bitki olan *Hibiscus cannabinus*'dan elde edilir. Lifler genellikle polyester ve yangın geciktirici ile karıştırılır. Kenaf'ın protein içermemesi kemirgenler veya böcekler için cazip olamamasını sağlar. Isı iletim katsayısı 0,034 ve 0,043 W/m.K arasında yoğunluğu 30 ve 180 kg/m³ arasında özgül ısıları 1,6 ila 1,7 kJ/kgK arasındadır. Bazı kenaf esaslı malzemelerin akustik yutum katsayısı 500 Hz'den daha yüksek frekanslar için 0,2'nin üzerinde ve 1000 Hz'den daha yüksek frekanslar için 0,4'ün üzerindedir. Ayrıca dinamik sertlik 27,7 MN/m³ kadar düşük olabilir [32]. Xu ve diğerleri bağlayıcı olmadan üretilmiş yenilikçi bir kenaf panelin ısı yalıtım ve akustik yutum özelliklerini test etmişlerdir. Bu panellerin ısı iletim katsayısı yoğunluğuna bağlı olup 0.040 W/m.K'den (100 kg/m³'e eşit yoğunlukta) 0,060 W/m.K'e (250 kg/m³) kadar değişir [95]. Ses yutum katsayısı geleneksel malzemeler için gözlenen değerlere benzerdir. Daha hafif malzemeler daha iyi bir akustik yutum performansı ile karakterize edilebilir [96].

4.2.3. Keten (Flax)

Keten lifleri, M.Ö. 5000'den beri Mısırlılardan günümüze kadar kullanılan bir bitki olan (*linum usitatissimum*) ketenden üretilmektedir. Keten bitkisi yaklaşık %70 selüloz içerir. Keten lifleri havayı muhafaza ederek iyi yalıtım özellikleri gösterir. Liflerin elastikiyeti ayrıca darbe ses yalıtımları olarak kullanılmasını sağlar. Keten panellerin ve ruloların yoğunluğu 20 ile 100 kg/m³ arasında, ısı iletim katsayısı 0,038 ile 0,075 W/m.K arasında ve özgül ısı kapasitesi 1,4 ile 1,6 kJ/kgK arasındadır. Keten lifleri genellikle mekanik direnci arttırmak için polyester ile, ateş ve güve direncini arttırmak için bor tuzları gibi katkı maddeleri ile karıştırılır [91]. El Hacja ve ark. çekilmiş keten (kısa lifler) ve bazı keten ürünlerinden oluşan yenilikçi bir malzemenin ısı ve akustik performansını değerlendirmiştir. Test edilen malzeme sentetik bağlayıcı içermeyip 0,060W/m.K'lik bir ısı iletim katsayısına ve yaklaşık 170 kg/m³ yoğunluğa sahiptir. Bu yeni malzemenin akustik özellikleri 2 mm kalınlığındaki bir panel için 500 Hz'den yüksek frekanslarda test edilmiş ve ses yutum katsayısı 0,4'den yüksek olduğu belirlenmiştir [97]. Keten ve kenevir, yüksek performanslı ısı yalıtım malzemesi üretmek için birlikte karıştırılabilir. En iyi performans gösteren karışım malzemesinin ısı iletim katsayısı 0,033 W/m.K'dir [98]. Keten lifi, mıcır ve sentetik bir bağlayıcıdan yapılmış 32 kg/m³'lük yoğun bir numune üzerinde yapılan ölçümler 0,043 W/m.K'lik bir ısı iletim katsayısı ve 2,9 su buharlı direnç faktörünü göstermiştir [93]. Keten yetiştirilmesi kolaydır ve gübreleme yada arındırma işlemine gerek duymadan herhangi bir toprakta yetiştirilip işlenebilir [68]. Ketende polyester elyaf kullanılmadığında atık ürünleri tekrar kullanılabilir, geri dönüştürülebilir ve gübre üretimi için de kullanılabilir [32].

4.2.4. Koyun yünü (Sheep wool)

Kullanılmamış ve geri dönüşümlü yünler bina yalıtım malzemelerinin üretimi için kullanılmaktadır. Lifler

polyester ile karıştırılabilir veya bir polipropilen ızgaraya sabitlenebilir [87]. Malzeme genellikle rulolar halinde satılır ve elastikiyeti yüzer döşemelerde esnek malzeme olarak kullanılmasını sağlar (Dinamik sertlik yaklaşık 5 MN/m³). Koyun yünü malzemelerin yoğunluğu 10 ve 25 kg/m³ arasında, ısı iletim katsayısı 0,038 ve 0,054 W/m.K arasında ve özgül ısıları 1,3 ila 1,7 kJ/kg.K arasında değişmektedir. Bu yüzden koyun yünü malzemelerin kışın ısı yalıtımı için yararlı olsa bile yaz şartlarında kararsız durumlar için performansı oldukça kötüdür. Ballagh bu malzemelerin ses yutum katsayısı ilgili yaptığı çalışmada 75 mm kalınlıkta bir numune için 500 Hz üzerindeki frekanslarda ses yutum katsayısını 0,8 ve daha yüksek değerler olarak ölçmüştür [99]. Zach ve diğerleri değişik kalınlık ve yoğunluktaki birkaç örnek üzerinde koyun yünü malzemelerinin ısı, akustik ve hidrotermal performansını değerlendirmiştir. Beklendiği gibi nem içeriği ne kadar yüksek olursa ısı iletim katsayısı da o kadar yüksek olur (0,036 dan 0,081'e W/m.K). Test edilen koyun yünü numunelerinde yüksek higroskopisite değerleri elde edilmiştir (% 35 kadar) [100]. Yünün yüksek higroskopisiteye sahip olması bu malzeme için en uygun nem düzenleyici yapar. Koyun yünü bina uygulamasında kullanmadan önce yangın geciktirici anti-güve ve parazit öldürücü ile takviye edilmelidir. Atık koyun yünü malzemeleri tekrar kullanılabilir, pilastığın yünden ayrılması durumunda geri dönüştürülebilir, çöp sahasında stoklanabilir veya organik gübre üretimi için kullanılabilir [32].

4.2.5. Hindistan cevizi lifi (Coir fiber)

Lifler hindistan cevizinin orta kabuğundan elde edilir. Lifler (Her hindistan cevizinin lifi, yaklaşık 80 g), çürüyebilen organik bileşenlerden ayırmak için işlenir. Bu malzeme hindistancevizi endüstrisinin bir yan ürünü olup genellikle ısınma ve gübreleme amacıyla kullanılır. Hindistan cevizi başta Hindistan, Endonezya ve Sri Lanka'da yetiştirilir. Bu nedenle ulaşım bu ürünlerin çevresel etkilerini etkileyen ana faktördür. Bununla birlikte, hindistan cevizi lifi düşük miktarda enerji ve sentetik malzemeler kullanılarak yan ürünlerden de üretilmektedir. Lifler yüksek mekanik direnç sahiptir. Ayrıca böcek ve kemirgen çekmeyen, çürümeye dayanıklı anti bakteriyel bir malzemedir. Yangın dayanımını arttırmak için yanma geciktiriciler eklenir [32, 87]. Bu malzemenin ısı özelliklerini değerlendirmek için bazı çalışmalar gerçekleştirilmiştir. İlk girişimlerden biri Manohar tarafından yapılmıştır. Yoğunluğu 40 ila 90 kg/m³ arasında değişen Hindistan cevizi lif numunesinin ısı iletim katsayısı 15,6 °C de ve 21,8 °C de değerlendirilmiştir. En iyi performans gösteren malzeme için k değeri 24 °C 'de 0.049 W/m.K olarak belirlenmiştir [101]. Bu ısı iletkenlik değeri aynı yazar tarafından yapılan bir sonraki çalışmalarda ölçümlere ile doğrulanmıştır [102]. Diğer çalışmalar daha yoğun (250-350 kg/m³) Hindistan cevizi tabanlı bağlayıcısız suntalar dikkate alınarak yapılmış ve daha az yoğun numunenin ısı iletim katsayısı 0,046 W/m.K olmuştur [103]. Isı ve ses yalıtımı amacıyla Hindistan cevizi lifi kullanılan paneller ve üretilen rulolar piyasada mevcuttur.

Hindistan cevizi lifinden yapılan paneller ve ruloların ısı iletim katsayısı 0,040 ve 0,050 W/m.K arasında, yoğunluğu 50 ila 160 kg/m³ ve özgül ısı 1,3 ve 1,7 kJ/kgK arasındadır. Bazı ticari ürünlerin dinamik sertlik değeri yaklaşık 15 MN/m³'dir. Hindistan cevizi lifleri atık malzeme olarak geri dönüşütürülebilir, yeniden kullanılabilir ve gübre üretimi için kullanılabilir [32]. Genelde ses yalıtımı için çok nadir olarak da ısı yalıtımı için kullanılır. Ancak yakın geçmişte özellikle ziftli çatılar için hindistan cevizi hasırı geliştirilmiştir [68].

4.2.6. Geri dönüşütürülmüş kauçuk (Recycled rubber)

Geri dönüşümlü kauçuk, özellikle darbe sesi yalıtımı için binalarda kullanılabilir. Yoğunluk genellikle 500 ila 930 kg/m³ ve dinamik sertlik 15 ve 60 MN/m³ arasındadır. Kalınlık arttıkça dinamik sertlik azalır [32]. Ömrünü doldurmuş lastiklerin çokluğu, yeni kullanım alanlarını bulmayı amaçlayan araştırmalara neden olmuştur. Lastik ömrünün sonunda üretilen yanık malzemeler test edilmiştir. Yapılan çalışmada en iyi performans 61 MN/m³ dinamik sertlik ve ağırlıklı ölçülen iyileşmiş darbe sesi yalıtım değeri 26 dB olarak elde edilmiştir [104,105]. Geri dönüşümlü kauçuk kullanılan malzemelerin ısı iletim katsayıları 0,100 ve 0,140 W/m.K arasında değişmektedir. Benkreira H., ve ark. atık elastomerik artıklardan yapılan numunelerin ısı ve akustik performansı değerlendirilmiştir. Açık gözeneklilik ile karakterize edilen malzemeler en iyi akustik yutum özelliklerine (500 Hz üzerindeki frekanslar için akustik yutum katsayısı 0,5'den daha yüksektir) ayrıca yüksek ısı iletim katsayısı değerine (1 W/m.K) sahiptir. Kapalı gözenekli bir yapıya sahip numunelerin ısı iletim katsayısı 0,034 W/m.K gibi düşük bir değer göstermekle birlikte bu malzemeler akustik yalıtım için etkisizdirler [106]. Genellikle geri dönüşütürülmüş kauçuk esaslı malzemelerin ses absorpsiyon katsayısı tane büyüklüğü, bağlayıcı türü ve miktarı, sıkıştırma oranı ve kalınlığa bağlıdır [107]. Ayrıca geri dönüşütürülmüş kauçuk esaslı atık malzemeler geri dönüşütürülebilir.

4.2.7. Hint keneviri lifi (Jute fiber)

Bitki hint keneviri lifi olarak üretilmekte olup ağırlıklı olarak Hindistan'da ve Bangladeş'te yetiştirilmektedir. Taşınması malzemenin kullanılmasını önemli oranda etkiler. Bununla birlikte liflerin elastikiyeti, en yaygın kullanım alanı olan yüzer döşemelerde esnek malzemeler olarak kullanılmaya uygundur. % 85-90 hint keneviri lifleri, polietilen lifleri ve sodadan yapılmış bir yalıtım malzemesi 2,35 kJ/kgK'lik yüksek bir özgül ısı değeri ve 35-40 kg/m³ arasında düşük yoğunluklu değerlerine sahiptir. Bu durum dinamik ısı yalıtım performansı üzerindeki ilk parametrenin olumlu etkilerini olumsuz olarak dengelemektedir [32, 87]. Hint keneviri esaslı ticari malzemelerin ısı iletim katsayısı 0,038 ve 0,055 W/m.K arasındadır. Dinamik sertlik ise kenevir tabakalarına benzerdir [108]. Ayrıca Korjenic ve ark. hint keneviri lifi, talaş parçacıkları ve bir sentetik bağlayıcılardan yapılmış bir numune için ısı iletim katsayısını 0,046 W/m.K olarak ölçmüşlerdir.

Yoğunluğu 26 kg/m³ ve su buharı difüzyon direnç faktörünü 2 olarak bulmuşlardır [93].

4.2.8. Karton esaslı paneller (Cardboard based panels)

Yapılan çalışmalarda genel olarak düşük maliyetli bir ambalajlama için kullanılan karton panellerin ısı, akustik ve çevresel performansı hem deneysel hem de sayısal olarak değerlendirilmiştir. Karton paneller farklı boyalarda standardize edilmiş, ortası oluklu olarak birbirine yapıştırılmış iki yüzeyden oluşan levhaların farklı sayıda üst üste getirilmesi ile hazırlanırlar. Olukların yüksekliğini panellerin hava boşlukları boyutu belirler. Bu da malzemenin ısı özelliklerini etkileyebilir. İki tip oluk analiz edilmiştir: C ve E oluklar sırasıyla 4,1 ve 1,9 mm kalınlığındadır. E-oluk panellerin genel performansı kötüdür. Bu panellerin ısı iletim katsayısı korunaklı sıcak plaka cihazı ile ölçüldü ve sonuçlar sırasıyla C ve E-oluk örnekleri için 0,053 ve 0,058 W/m.K bulunmuştur. Hava oluklar içinde sıkıştırdığından ve açık gözenek bulunmadığından karton paneller çok iyi bir ses emici değildirlir. Bu malzeme gözenekli bir malzemenin ziyade membran emiciye benzemektedir ve akustik performans açısından membran emiciden daha iyidir. Bununla birlikte karton panelin kalınlığı arttıkça daha iyi ses yalıtımı özellikleri gösterirler. Çünkü yüksek yoğunluk nedeniyle E-oluklu paneller 900 ve 1600 Hz arasındaki C-oluk olanlara göre ses yalıtımı daha iyidir. Ses iletim kaybı C-oluklu panellerde yaklaşık 30 dB olmasına karşılık E-oluk panellerde 60 dB'lik ses iletim kaybı değerleri ölçülmüştür [109].

4.3. Gelişmiş Malzemeler (Advanced Materials)

Son zamanlarda, araştırmacılar ve üreticiler tarafından çok düşük ısı iletim katsayısı değerleri elde etmek amacıyla ağırlığı ve kalınlığı azaltılmış birçok yenilikçi malzemeler ve sistemler geliştirilmiştir. Bu malzemelerin örnekleri vakum yalıtım panelleri, gaz dolgu paneller ve aerogellerdir. Bu sistemlerin maliyeti, belirsiz hizmet ömrü, zayıf mekanik dayanımı ve esnek olmaması gibi bazı sorunları nedeniyle mevcut uygulamalarda yaygın kullanımını sınırlandırmaktadır [32].

4.3.1. Vakum yalıtım paneli (Vacuum insulation panels-VIP)

VIP etrafına gaz giderici, nem giderici ve matlaştırıcı monte edilmiş çok katmanlı bir kaplama ile ötümlü bir çekirdek malzeme vasıtasıyla oluşturulmaktadır. Panelin içinde oluşturulan vakum ısı direnci artırır. Çekirdek, düşük ısı iletim katsayısına sahip gözenekli bir malzemenin yapılıdır. Malzeme küçük gözenekler (çapı yaklaşık 10 nm), açık hücre yapısı, yeterli sıkıştırma direnci ve kızılötesi radyasyon geçirimsizliği ile karakterize edilmiş olmalıdır [110]. Genellikle isli silika VIP çekirdeği için en sık kullanılan malzeme olup, bazı açık hücreli köpükler (poliüretan ve genleştirilmiş polistiren), tozlar (silika aerogeller, genleştirilmiş perlit ve bunların karışımları) ve ayrıca cam elyafı (yüksek sıcaklık uygulamaları için uygun) kullanılabilir [111]. Kaplama tasarımı en önemli VIP konularından biridir. Çünkü çekirdek içindeki vakumu korumak ve ısı köprüsü

etkilerini sınırlamak için iyi mekanik mukavemete sahip olması talep edilmektedir. Ayrıca kaplama kullanım ömrünü ve VIP panelin küresel yalıtım performansını derinlemesine etkiler [110]. Kaplama için genellikle metal folyolar, metalize filmler ve polimer filmler kullanılır. Polimer filmler, kısa ömürlü olması nedeniyle neredeyse hiç kullanılmamaktadır. 5 mm kalınlıkta bir VIP panel 60 ile 160 yıl arasında bir kullanım ömrüne, 0,004 W/m.K den daha düşük bir ısı iletim katsayısı değerlerine ulaşabilir [110]. Yapılacak çalışmalar ve teknolojik gelişmeler VIP'lerin gerçek hayat performansını optimize etmek için gereklidir. Özellikle paneller delinmeye çok açıktır. Çünkü VIP bulunan bir duvara çakılan basit bir çivi ısı iletim katsayısını önemli ölçüde azaltabilir ve inşaat sırasında şantiyede kesilip boyutlandırılmaz. Ayrıca VIP'ler neredeyse tamamen su geçirmezdir ve bu durum yoğuşma sorunlarına neden olabilir.

4.3.2. Gaz dolgulı paneller (Gas filled panels-GFP)

Gaz dolgulı paneller [112,113] dış ortamdan mümkün olduğunca daha az geçirgen olan kaplama ile izole edilmiş bir gaz içeren yansıtıcı bir yapıdan (bölme) yapılmıştır. Gaz hava olabilir ancak ısı iletim katsayısı daha düşük olan gazlar tercih edilir. Panel içine doldurulan gaz maliyet, çevresel etki, toksisite, yangın direnci ve çiy noktası sıcaklığı dikkate alınarak seçilir. Baetens ve ark. sırasıyla hava ve argon ile dolu GFP'nin iki prototipini üretmiş ve test etmişlerdir. İki sistem arasında ısı iletim katsayısı hava doldurulmuş paneli için 0,046 W/m.K ve argon dolu diğeri için 0,040 W/m.K olmuştur. Ancak asal gaz kullanımı 45 mm'lik bir panelin maliyetini ikiye katlamıştır [112]. Farklı çalışmalarda daha iyi ısı yalıtımı performansı gözlemlenmiştir. Griffith ve ark. 44,5 mm'lik kripton dolu bir panel için 0,012 W/m.K'lik bir ısı iletim katsayısı değeri ölçmüşlerdir [113]. Numunenin kalınlığı panelin maliyetini ve ısı iletim katsayısını etkiler. GFP ne kadar kalın olursa, gaz miktarı ve maliyet ne kadar yüksekse, ısı iletim katsayısı o kadar düşük olur.

4.3.3. Aerojel (Aerogel)

Aerojel çapı 2 ila 50 nm arasında değişen gözeneklere sahip yüksek açık gözeneklilik ile karakterize edilen katı bir köpüktür. Genellikle süper kritik sıcaklıkta silika içeren bir jel kurutularak üretilirler [114]. Silis aerojelin gözenekliliği % 85 ve % 99,8 arasındadır [115]. Baetens ve ark. monolitik (tek parçalı) bir malzemenin ısı iletim katsayısının 0,0131 ile 0,0136 W/m.K arasında düşük değerlerle değiştiğini rapor etmişlerdir [116]. Çok yüksek gözeneklilik 3 kg/m³ gibi düşük bir yoğunluğa neden olabilir. Ancak bina uygulamaları için aerogellerin yoğunluğu genellikle 70-150 kg/m³'tür. Granül aerojelin ısı iletim katsayısı yüksek değerler göstermektedir. Bununla birlikte Neugebauer ve ark tarafından yapılan çalışma bu malzemelerin ısı iletim katsayısının sıkıştırma işlemi ile azaltılabileceğini göstermiştir. Sıcak tel yöntemi ile ölçülen ısı iletim katsayısı yoğunluğu 88 kg/m³ olan bir numune için 0,024 W/m.K'den, yoğunluğu 150 kg/m³ olan diğeri için 0,013 W/m.K'e düşer

[117]. Granül aerojel çift camlı pencerelerin boşluğu içinde görünür geçirgenliğini aşırı etkilemeden U-değerini düşürmek için kullanılabilir [118,119]. Ricciardi ve ark. 7 cm kalınlığında çok tabakalı bir silika aerojel numunesi için ses azaltma indeksi 60 dB olarak ölçülmüştür. Sonuçlar literatürdeki araştırma sonuçlarıyla tam uyuşmasa da bu malzemenin akustik potansiyelini teyit etmektedir [119]. Yeni aerojelli malzemeler ısı yalıtımını artırmak ve onların üretim ve kullanımı kolaylaştırmak amacıyla test edilip ve geliştirilmektedir. Geliştirilmiş olan yenilikçi bir malzeme 0,015 W/m.K ısı iletim katsayısı ve 20 kg/m³ bir yoğunluk değerleriyle karakterize edilmiştir [120].

Isı ve ses yalıtımı için malzeme seçerken ısıl ve akustik performansına etki eden makro yapı özellikleri, mekanik özellikler ve malzemenin fiziksel özellikleri ile birlikte fiziksel işlevsellik, dayanıklılık, ekolojik açıdan uygunluk, uygulama kolaylığı ve maliyet de dâhil olmak üzere birçok parametre göz önüne alınmalıdır.

İnşaat sektöründe ısı ve ses yalıtımı amaçlı mevcut kullanılan yalıtım malzemelerinin genel bir değerlendirmesi yapıldığında, tek bir yalıtım malzemesinin bu parametrelerin tümüne birden cevap verebilmesi neredeyse olanaksızdır. Bununla birlikte birlikte, bunların önemli bir kısmına sahip olan malzemeler üretilebilir. Yapılan ve yapılacak araştırmalar ile bu özelliklerin birçoğuna sahip ısı, ses ve yangın yalıtımını birlikte yerine getirebilen yalıtım malzeme ve tekniklerinin araştırılıp geliştirilmesine önem verilmesi gerektiği öngörülmüştür.

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER (CONCLUSIONS AND RECOMMENDATIONS)

Makale de hem geleneksel, alternatif ve gelişmiş yalıtım malzemelerini dikkate alınarak inşaat sektöründe kullanılan yalıtım malzemelerinin ısı, ses, yangına tepki ve çevresel özellikler, su buharı geçirgenliği özellikleri hakkında bilgiler verilmiştir.

Türkiye'de sanayideki ve konutlardaki nihai enerji tüketimi hızla artmaktadır. Türkiye'de toplam enerji tüketiminin yaklaşık % 40'ı konutlarda gerçekleşmektedir. Konutlardaki enerji kullanımının yaklaşık % 85'i ısıtma için harcanmaktadır. Türkiye'de yaklaşık 22 Milyon konutun % 70'inin yalıtımsız olduğu gözönünde bulundurulduğunda konutlardaki enerji tasarrufu amaçlı ısı yalıtım uygulamalarının önemi ortaya çıkmaktadır.

İnşaat sektöründeki enerji kullanımı, dünyanın toplam enerji kullanımının ve sera gazı emisyonlarının önemli bir bölümünü oluşturduğundan binaların enerji verimliliğini artırma talebi gittikçe artan bir zorunluluk haline gelmektedir. Dolayısıyla pasif evler ve sıfır emisyonlu binalar gibi kavramlar tanıtılmaktadır. Bu yüzden yalıtım malzemeleri mümkün olduğunca düşük ısı iletim katsayısına sahip olmalıdır. Dahası, yalıtım malzemeleri binanın tüm yaşam döngüsü boyunca kabul edilebilir bir performansı garanti etmek zorundadır. Buna ek olarak bu malzemeler ve çözümler, yerel ısı

köprülerinden kaynaklanan artış haricinde çivi ve benzeri dış nesnelere delinmiş olsa dahi düşük ısı iletim katsayısını koruyabilmelidir. Fakat ısı performans bir yalıtım malzemesi seçerken ele alınması gereken tek parametre değildir. Aynı zamanda yangın direnci, su buharı geçirgenliği, yaşlanma, delinme, şantiye uyarlamaları açısından da iyi bir performans sağlamalıdır.

Çevre ve insan sağlığı konusundaki farkındalığın artması, yalıtım malzemelerinin bütüncül bir şekilde değerlendirilmesine yol açmakta ve gelecekteki yalıtım malzemeleri ve çözümlerinin kullanım süresi boyunca sürdürülebilir ve sağlıklı yaşam koşullarını sağlayacak ses yalıtımı gibi ısı olmayan özellikler dikkate alınarak geliştirilmesi gerekir.

Belirli bir uygulama veya inşaat sektörü için hangi yalıtım malzemesinin veya çözümünün seçileceğini belirlerken, yukarıda ifade edilen tüm önemli özellikler zayıf yönleri ve güçlü yönleriyle değerlendirilmelidir. Günümüz itibarıyla, her yönden üstün veya en iyi tek bir yalıtım malzemesi veya çözümü mevcut değildir. Hangi yalıtım malzemesinin seçileceğini belirlerken farklı özellikler ve uygulamalar için tüm artılarının ve eksilerinin değerlendirilmesi ciddi önem taşımaktadır.

Geleneksel ve alternatif yalıtım malzemeleri delinme, şekillendirilme etkilerine karşı daha dayanıklı ve şantiye ortamına uyumlu malzemelerdir. Bununla birlikte, geleneksel ve alternatif yalıtım malzemeleri gelişmiş yalıtım malzemelerine nispeten yüksek ısı iletim katsayısı değerlerine sahiptirler. Geleneksel ve alternatif yalıtım malzemelerinin ısı iletim katsayıları artan nem içeriği nedeniyle önemli ölçüde artabilmektedir. Gelişmiş yalıtım malzemeleri en düşük ısı iletim katsayılarına sahip olmakla birlikte ağırlıklı olarak maliyetleri ve montaj zorluğu nedeniyle kullanımı çok fazla yaygınlaşmamıştır. Ayrıca gerçek uygulamalarda karşılaşılan nem, difüzyon yoluyla hava girişi ve zaman içinde deforme olmaları ısı iletim katsayılarını arttırmaktadır.

İncelenen yalıtım malzemeleri akustik özellikler açısından değerlendirildiğinde; taş yünü, cam yünü, sesliloz, mantar, mineralize ağaçlifleri hafif genişletilmiş kil agrega, genişletilmiş perlit, kenevir, kenaf, keten, koyun yünü, hindistan cevizi lifi, geri dönüştürülmüş kauçuk, karton esaslı paneller ve bu malzemeleri içeren kompozitler ses yalıtımı amaçlı yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu malzemelerin darbe kaynaklı ses yalıtımı, hava kaynaklı ses yalıtımı ve ses yutum özellikleri öne çıkmaktadır.

Isı ve ses yalıtımında:

- Günümüzün mevcut geleneksel ve son teknoloji ısı-ses yalıtım malzemeleri ve teknolojilerinden en uygun olanının seçimi,
- Günümüzün mevcut geleneksel ve son teknoloji ısı-ses yalıtım malzemeleri ve teknolojilerinin sürekli araştırılması ve geliştirilmesi,

- Günümüzün mevcut malzeme ve teknolojilerinin tamamını aşan özelliklere sahip yeni yüksek performanslı ısı-ses yalıtım malzemeleri ve teknolojilerin geliştirilmesine yönelik araştırmalar önem kazanmıştır.

Bu çerçevede, binalarda sürdürülebilir ve sağlıklı yaşam koşullarını sağlayan enerji verimliliği ve akustik konfor şartlarını sağlayacak, düşük ısı iletim katsayısına sahip olan yenilikçi ve bütüncül (ekonomik ve yerli) anlayış ile tasarlanmış ısı ve ses yalıtımının birlikte istendiği ortamlara yönelik kolay uygulanabilir yalıtım malzemelerine ihtiyaç duyulmaktadır.

Sonuç olarak iyi yalıtım performansı, düşük üretim enerjisi, yeterli ısı-akustik konfor ve sağlıklı yaşam koşullarını sağlayan çevre dostu, yerel ve sürdürülebilir nitelikte yalıtım malzemelerinin üretiminin artırılması ve kullanımının yaygınlaştırılması gerekmektedir.

SİMGE VE KISALTMALAR (NOMENCLATURE)

A	Alan (m ²)
k	Isı iletim katsayısı (W/m.K)
R	Isıl direnç (m ² .K/W)
U	Toplam ısı transfer katsayısı (W/m ² K)
D	Isıl yayılım katsayısı (m ² /s)
f	Frekans, Hz
TL	Ses iletim kaybı, dB
α	Ses yutum katsayısı
GFP	Gas Filled Panels
VIP	Vacuum Insulation Panels
EPS	Expanded Polystyrene
XPS	Extruded Polystyrene
HFC	Hydrofluorocarbon
PUR	Polyurethane
CFC	Chlorofluorocarbon
PIR	Polyisocyanurate
GP	Expanded Perlite
DIN	German Institute for Standardization
EN	European Committee for Standardization
ASTM	American Society for Testing and Materials
ISO	International Organization for Standardization
LEED	Leadership in Energy and Environmental Design
BREEAM	Building Research Establishment Environmental Assessment Method

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Özkan D.B., Onan C., Erdem S., "Yalıtım malzemesi kalınlığının ısı yalıtımına etkisi", *Mühendislik Ve Fen Bilimleri Dergisi*, Sigma 27: 190-196, (2009).

- [2] İzoder., (Isı, su ve Ses İzolasyoncuları Derneği), **T.C. Bayındırlık ve İskan Bakanlığı Yapı Denetim Kuruluşları Yalıtım Semineri**, (2003).
- [3] P. Ricciardi P., Belloni E., Cotana F., “Innovative panels with recycled materials: Thermal and acoustic performance and Life Cycle Assessment”, *Applied Energy*, 134:150–162, (2014).
- [4] Papadopoulos A.M., “State of the art in thermal insulation materials and aims for future developments”, *Energy and Buildings*, 37: 77–86, (2005).
- [5] Jelle B.P., “Traditional, state-of-the-art and future thermal building insulation materials and solutions – Properties, requirements and possibilities”, *Energy and Buildings*, 43: 2549–2563, (2011).
- [6] Shastri D., Kim S.H., “A new consolidation process for expanded perlite particles”, *Construction and Building Materials*, 60: 1–7, (2014).
- [7] Baetens R., Jelle B.P., Gustavsen A., “Aerogel insulation for building applications: a state-of-the-art review”, *Energy Build.*, 43: 761–9, (2011).
- [8] Zukowski M., Haese G., “Experimental and numerical investigation of a hollow brick filled with perlite insulation”, *Energy Build.*, 42:1402–8, (2010).
- [9] Alam M., Singh H., Brunner S., Naziris C., “Experimental characterisation and evaluation of the thermo-physical properties of expanded perlite-Fumed silica composite for effective vacuum insulation panel (VIP) core”, *Energy and Buildings*, 69: 442–450, (2014).
- [10] Pichor W., Janiec A., “Thermal stability of expanded perlite modified by mullite”, *Ceramics International*, 35: 527–530, (2009).
- [11] Lu Z., Xu B., Zhang J., Zhu Y., Sun G., Li Z., “Preparation and characterization of expanded perlite/paraffin composite as form-stable phase change material”, *Solar Energy*, 108: 460–466, (2014)
- [12] Yılmaz S., Özdeniz M.B., “The effect of moisture content on sound absorption of expanded perlite plates”, *Building and Environment*, 40: 311–318, (2005).
- [13] Vaou V., Panias D., “Thermal insulating foamy geopolymers from perlite”, *Minerals Engineering*, 23: 1146–1151, (2010).
- [14] Celik A.G., Depci T., Kılıc A.M., “New lightweight colemanite-added perlite brick and comparison of its physicochemical properties with other commercial lightweight materials”, *Construction and Building Materials*, 62, 59–66, (2014).
- [15] Liu W.V., Apel D.B., Bindiganavile V.S., “Thermal properties of lightweight dry-mix shotcrete containing expanded perlite aggregate”, *Cement & Concrete Composites*, 53: 44–51, (2014).
- [16] Abidi S., Nait-Ali B., Joliff Y., Favotto C., “Impact of perlite, vermiculite and cement on the thermal conductivity of a plaster composite material: Experimental and numerical approaches”, *Composites: Part B*, 68: 392–400, (2015).
- [17] Gao T., Sandberg L.I.C., Jelle B.P., “Nano Insulation Materials: Synthesis and Life Cycle Assessment”, *Procedia CIRP*, 15: 490 – 495, (2014).
- [18] Bajraktari E., Lechleitner J., Mahdavi A., “Estimating the sound insulation of double facades with openings for natural ventilation”, *Energy Procedia*, 78: 140 – 145, (2015).
- [19] Nurzyński J., “Is Thermal Resistance Correlated With Sound Insulation?”, *Energy Procedia*, 78: 152 – 157, (2015).
- [20] Arifuzzaman M., Sung Kim H.S., “Development of New Perlite/Sodium Silicate Composites”, *International Conference on Mechanical, Industrial and Energy Engineering*, Khulna, Bangladesh, 26-27, (2014).
- [21] Arifuzzaman M., Sung Kim H.S., “Novel mechanical behaviour of perlite/sodium silicate composites”, *Construction and Building Materials*, 93: 230–240, (2015).
- [22] Skubic B., Lakner M., Plazl I., “Sintering Behavior of Expanded Perlite Thermal Insulation Board: Modeling and Experiments”, *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 53: 10244–10249, (2013).
- [23] Skubic B., Lakner M., Plazl I., “Microwave Drying of Expanded Perlite Insulation Board”, *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 51: 3314–3321, (2012).
- [24] Bostancıoğlu E., “Mevcut Binalarda Yapılan Ekolojik İyileştirmelerin Enerji Kazancı”, *The Turkish Online Journal of Design Art and Communication*, 2:15-24, (2011).
- [25] Sun D., Wang L., “Utilization of paraffin/expanded perlite materials to improve mechanical and thermal properties of cement mortar”, *Construction and Building Materials*, 101: 791–796, (2015).
- [26] Güner Ç., “Gürültünün Sağlık Üzerine Etkileri”, *Sürekli Tıp Eğitimi Dergisi*, 9: 251–253, (2000).
- [27] Topçu İ.B., Işıklı B., “Effect of expanded perlite aggregate on the properties of lightweight concrete”, *Journal of Materials Processing Technology*, 204: 34–38, (2008).
- [28] Anonim, “Çevresel Gürültünün Değerlendirilmesi ve Yönetimi Yönetmeliği”, 04.06.2010 Tarih ve 27601 Sayılı *Resmî Gazete*, Ankara, (2010).
- [29] Demirkale S.Y., Aşçıgil M., “Sağlıklı kentlerle ve yapılarla ilgili Türkiye’nin gürültü politikası”, VIII. *Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi*, İzmir, 267-285, (2007).
- [30] He Y., “Rapid thermal conductivity measurement with a hot disk sensor Part 1. Theoretical considerations”, *Thermochimica Acta* 436: 122–129, (2005).
- [31] 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: 1105–1111, (2009).
- [32] Schiavoni S., D’Alessandro F., Bianchi F., Asdrubali F., “Insulation materials for the building sector: A review and comparative analysis”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 62: 988–1011, (2016).
- [33] EN 12664, “Thermal performance of building materials and products – determination of thermal resistance by means of guarded hot plate and heat flow meter methods – dry and moist products of medium and low thermal resistance”, *European Committee for Standardization*, (2001).
- [34] EN 12667, “Thermal performance of building materials and products – determination of thermal resistance by

- means of guarded hot plate and heat flow meter methods – products of high and medium thermal resistance”, *European Committee for Standardization*, (2001).
- [35] EN 12939, “Thermal performance of building materials and products – determination of thermal resistance by means of guarded hot plate and heat flow meter methods – thick products of high and medium thermal resistance”, *European Committee for Standardization*, (2000).
- [36] ASTM C518-10, “Standard test method for steady-state thermal transmission properties by means of the heat flow meter apparatus”, *American Society for Testing and Materials*, (2010).
- [37] ASTM C177-13, “Standard test method for steady-state heat flux measurements and thermal transmission properties by means of the guarded-hot-plate apparatus”, *American Society for Testing and Materials*, (2013).
- [38] ISO 8990, “Thermal insulation – determination of steady-state thermal transmission properties – calibrated and guarded hot box”, *International Organization for Standardization*, (2013).
- [39] EN 1602, “Thermal insulating products for building applications. Determination of the apparent density”, *European Committee for Standardization*, (2013).
- [40] ASTM C303-10 “Standard test method for dimensions and density of preformed block and board-type thermal insulation”, *American Society for Testing and Materials*, (2016).
- [41] ISO 11357-4, “Plastics. Differential scanning calorimetry (DSC). Determination of specific heat capacity”, *International Organization for Standardization*, (2014).
- [42] ASTM 1269-11, “Standard test method for determining specific heat capacity by differential scanning calorimetry”, *American Society for Testing and Materials*, (2011).
- [43] ISO 22007-1, “Plastics –determination of thermal conductivity and thermal diffusivity – Part 1: General principles”, *International Organization for Standardization*, (2009).
- [44] ISO 22007-2, “Plastics –determination of thermal conductivity and thermal diffusivity – Part 2: Transient plane heat source (hot disc) method”, *International Organization for Standardization*, (2008).
- [45] ISO 22007-3, “Plastics – determination of thermal conductivity and thermal diffusivity – Part 3: Temperature wave analysis method”, *International Organization for Standardization*, (2008).
- [46] ISO 22007-4, “Plastics – determination of thermal conductivity and thermal diffusivity – Part 4: Laser flash method”, *International Organization for Standardization*, (2008).
- [47] ISO 6946, “Building components and building elements – thermal resistance and thermal transmittance – calculation method”, *International Organization for Standardization*, (2007).
- [48] Toydemir N., Gürdal, E., Tanaçan L., “Yapı Elemanında Malzeme Tasarımı”, *Literatür Yayıncılık*, İstanbul, (2000).
- [49] Ülker S., “Isı Yalıtım Malzemelerinin Özelliklerinin Uygulamaya Etkileri”, *Yüksek Lisans Tezi*, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, (2009).
- [50] Yılmaz H. K., “Binalarda Dış Duvarlarda Kullanılan Isı Yalıtım Kaplamalarının Enerji Korunum Performansları Açısından İncelenmesi”, *Yüksek Lisans Tezi*, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, (2009).
- [51] Al-Homoud M.S., “Performance characteristics and practical applications of common building thermal insulation materials”, *Building and Environment*, 40: 353–366, (2005).
- [52] ISO 717-1, “Acoustics – rating of sound insulation in buildings and of building elements – Part 1: Airborne sound insulation”, *International Organization for Standardization*, (2013).
- [53] ISO 10140, “Acoustics – laboratory measurement of sound insulation of building elements”, *International Organization for Standardization*, (2010).
- [54] EN 12354-1, “Building acoustics – estimation of acoustic performance of buildings from the performance of elements – Part 1: Airborne sound insulation between rooms”, *European Committee for Standardization*, (2000).
- [55] ISO 16283-1, “Acoustics – field measurement of sound insulation in buildings and of building elements – Part 1: Airborne sound insulation”, *International Organization for Standardization*, (2014).
- [56] ISO 717-2, “Acoustics – rating of sound insulation in buildings and of building elements – Part 2: Impact sound insulation”, *International Organization for Standardization*, (2013).
- [57] EN 12354-2, “Building acoustics – estimation of acoustic performance of buildings from the performance of elements – Part 2: Impact sound insulation between rooms”, *European Committee for Standardization*, (2000).
- [58] ISO 16283-2, “Acoustics – field measurement of sound insulation in buildings and of building elements – Part 2: Impact sound insulation”, *International Organization for Standardization*, (2015).
- [59] ISO 9052-1, “Acoustics – determination of dynamic stiffness – Part 1: Materials used under floating floors in dwellings”, *International Organization for Standardization*, (1989).
- [60] ISO 354, “Acoustics – measurement of sound absorption in a reverberation room”, *International Organization for Standardization*, (2003).
- [61] ASTM C423-09a, “Standard test method for sound absorption and sound absorption coefficients by the reverberation room method”, *American Society for Testing and Materials*, (2009).
- [62] ISO 10534-2, “Acoustics – determination of sound absorption coefficient and impedance in impedance tubes – Part 2: Transfer-function method”, *International Organization for Standardization*, (1998).
- [63] Vidinlimen G.T., “Otomotiv Endüstrisinde Kullanılan Gözenekli Malzemelerin Akustik Özellikleri ve Analizi”, *Yüksek Lisans Tezi*, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, (2010).
- [64] Cox, T. J., D’Antonio, P., “Acoustic Absorbers and Diffusers” *Spon Press*, London and New York, (2005).
- [65] Ravindran A., “Investigation of Inverse Acoustical Characterization of Porous Materials Used in aircraft Noise Control Application”, *Master of Science Thesis*, Wichita State University, (2007).

- [66] Skinner, C., Peters, J., and Vandenbroeck, J., Acoustic Absorbers: A third way for the management of sound in automobiles, *International Urethanes Technology Exhibition and Conference UTECH Europe*, Maastricht, Netherlands, 28-30, (2006).
- [67] Fangueiro R. "Fibrous and composite materials for civil engineering applications" *Woodhead Publishing Limited*, Cambridge, (2011).
- [68] Kirbiyik E., "Ses ve Isı Yalıtımlı Ekolojik Yapı Malzemelerinin İncelenmesi ve Trakya Bölgesinde Yetiştirilen Ayçiçeği Bitkisinin Yalıtım Malzemesi Olarak Araştırılması", *Yüksek Lisans Tezi*, Trakya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, (2012).
- [69] Woolley, T., Kimmins, S., Harrison, P., Harrison, R., "Green Building Handbook", *Spon Press*, Manchester, 2005.
- [70] Tatematsu K., Hirota T., Suzuki H., Taniguchi M., Nunoi Y., Uzawa T., "Influence of temperature and moisture on aging of glass wool", *Journal of Environmental Engineering*, 79: 753–62, (2014).
- [71] Lakatos A., Kalmár F., "Analysis of water sorption and thermal conductivity of expanded polystyrene insulation materials", *Building Services Engineering Research and Technology*, 34:407–16, (2013).
- [72] Vo C.V., Bunge F., Duffy J., Hood L., "Advances in thermal insulation of extruded polystyrene foams", *Cellular Polymers*, 30:137–56, (2011).
- [73] Zhao C., Yan Y., Hu Z., Li L., Fan X., "Preparation and characterization of granular silica aerogel/polyisocyanurate rigid foam composites", *Construction and Building Materials*, 93: 309–16, (2015).
- [74] Pescari S., Tudor D., Tölgyi S., Maduta C., "Study concerning the thermal insulation panels with double-side anti-condensation foil on the exterior and polyurethane foam or polyisocyanurate on the interior", *Key Engineering Materials*, 660: 244–8, (2015).
- [75] Hurtado PL., Rouilly A., Vandenbossche V., Raynaud C., "A review on the properties of cellulose fibre insulation", *Building and Environment*, 96: 170–7, (2016).
- [76] Asdrubali F., Schiavoni S., Horoshenkov KV., "Review of sustainable materials for acoustic applications", *Journal of Building Acoustics*, 19: 283–312, (2012).
- [77] Maaloufa Y., Mounir S., Khabbazi A., Kettar J., Khaldoun A., "Thermal characterization of materials based on clay and granular: cork or expanded perlite", *Energy Procedia*, 74: 1150–61, (2015).
- [78] Limam A., Zerizer A., Quenard D., Sallee H., Chenak A., "Experimental thermal characterization of bio-based materials (Aleppo Pine wood, cork and their composites) for building insulation", *Energy and Buildings*, 116: 89–95, (2016).
- [79] Kawasaki T., Zhang M., Kawai S., "Manufacture and properties of ultra-low density fiberboard", *Journal of Wood Science*, 44:354–60, (1998).
- [80] Troppová E., Švehlík M., Tippner J., Wimmer R., "Influence of temperature and moisture content on the thermal conductivity of wood-based fibreboards", *Materials and Structures*, 48: 4077–83, (2015).
- [81] Pargana N., Pinheiro MD., Silvestre JD., De Brito J., "Comparative environmental life cycle assessment of thermal insulation materials of buildings", *Energy and Buildings*, 82: 466–81, (2014).
- [82] Del Coz Díaz J.J., Álvarez Rabanal F.P., García Nieto P.J., Domínguez Hernández J., Rodríguez Soria B., Pérez-Bella J.M., "Hygrothermal properties of lightweight concrete: experiments and numerical fitting study", *Construction and Building Materials*, 40: 543–55, (2013).
- [83] Asdrubali F., Horoshenkov K.V., "The acoustic properties of expanded clay granulates", *Building Acoustics*, 9: 85–98, (2002).
- [84] Sutcu M., "Influence of expanded vermiculite on physical properties and thermal conductivity of clay bricks", *Ceramics International*, 41: 2819–2827, (2015).
- [85] Schackow A., Effting C., Folgueras M.V., Güths S., Mendes G.A., "Mechanical and thermal properties of lightweight concretes with vermiculite and EPS using air-entraining agent", *Construction and Building Materials*, 57: 190–197 (2014).
- [86] Maderuelo-Sanz R., Nadal-Gisbert A.V., Crespo-Amorós J.E., Barrigón Morillas J.M., Parres-García F., Juliá Sanchis E., "Influence of the microstructure in the acoustical performance of consolidated lightweight granular materials", *Acoustics Australia*, 44:149–157, (2016).
- [87] Fassi A., Maina L., "L'isolamento ecoefficiente. Guida all'uso dei materiali naturali" *Edizioni Ambiente*; Milano, (2009).
- [88] ISO/FDIS 10456, "Building materials and products — hygrothermal properties — tabulated design values and procedures for determining declared and design thermal values", *International Organization for Standardization*, (2007).
- [89] Suvorov S.A., Skurikhin V.V., "Vermiculite — a promising material for hightemperature heat insulators", *Refractories and Industrial Ceramics*, 44: 186–93, (2003).
- [90] Maderuelo R., Segura J.G., Nadal A, Julia E, Crespo JE, Gadea JM., "Acoustical properties of porous absorbers made from perlite", *International Conference Sustainable Materials Science and Technology*, Paris, 22-25, (2015).
- [91] Kymäläinen H.R., Sjöberg A.M., "Flax and hemp fibres as raw materials for thermal insulations" *Building and Environment*, 43: 1261–1269, (2008).
- [92] Zach J., Hroudova J., Brožovský J., Krejzad Z., Gailiuse A., "Development of thermal insulating materials on natural base for thermal insulation systems" *Procedia Engineering*, 57:1288–1294, (2013).
- [93] Korjenic A., Petránek V., Zach J., Hroudová J., "Development and performance evaluation of natural thermal-insulation materials composed of renewable resources", *Energy and Buildings*, 43: 2518–2523, (2011).
- [94] Glé P., Gourdon E., Arnaud L., "Acoustical properties of materials made of vegetable particles with several scales of porosity" *Applied Acoustics*, 72: 249–259, (2011).
- [95] Xu J., Sugawara R., Widyorini R., Han G., Kawai S., "Manufacture and properties of low-density binderless particleboard from Kenaf core", *Journal of Wood Science*, 50: 62–7, (2004).

- [96] D'Alessandro F., Pispola G., "Sound absorption properties of sustainable fibrous materials in an enhanced reverberation room", *International Congress on Noise Control Engineering*, Rio de Janeiro, 2359-2368, (2005).
- [97] El Hajja N., Mboumba-Mamoundou B., Dheilly R-M., Aboura Z., Benzeggagh M., Queneudec M., "Development of thermal insulating and sound absorbing agro-sourced materials from auto linked flax-tows", *Industrial Crops and Products*, 34: 921-928, (2011).
- [98] Kauriinvaha E., Viljanen M., Pasila A., Kymäläinen H-R., Pehkonen A., "Bio-fiber from field to insulation of building", Helsinki University of Technology, *Laboratory of Structural Engineering and Building Physics*, Publication 117; (2001).
- [99] Ballagh K.O., "Acoustic properties of wall", *Applied Acoustics*, 48:101-120, (1996).
- [100] Zach J., Korjenic A., Petránek V., Hroudová J., Bednar T., "Performance evaluation and research of alternative thermal insulations based on sheep wool", *Energy and Buildings*, 49: 246-253, (2012).
- [101] Manohar K., Ramlakhan D., Kochar G., Haldar S., "Biodegradable fibrous thermal insulation", *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 28: 45-47, (2015).
- [102] Manohar K., "Experimental investigation of building thermal insulation from agricultural by-products", *British Journal of Applied Science & Technology*, 2:227-39, (2012).
- [103] Panyakaew S., Fotios S., "New thermal insulation boards made from coconut husk and bagasse", *Energy and Buildings*, 43:1732-9, (2011).
- [104] Asdrubali F., Baldinelli G., D'Alessandro F., Schiavoni S., Kenny J.M., Iannoni A., "Manufacturing process optimization of resilient materials made from recycled tyre granules", *16th International Congress on Sound and Vibration, Krakow*, 1985-1992, (2009).
- [105] Asdrubali F., D'Alessandro F., "Impact sound insulation and viscoelastic properties of resilient materials made from recycled tyre granules", *International Journal of Acoustic and Vibration*, 16:119-125, (2011).
- [106] Benkreira H., Khan A., Horoshenkov K.V., "Sustainable acoustic and thermal insulation materials from elastomeric waste residues", *Chemical Engineering Science*, 66:4157-4171, (2011).
- [107] Asdrubali F., D'Alessandro F., Schiavoni S., "Sound absorbing properties of materials made of rubber crumbs", *Acoustics '08*, Paris, (2008).
- [108] Zach J., Hroudova J., "Utilization of technical hemp for thermal insulating materials production", *2nd international conference on suitable construction materials and technologies*, Ancona, (2010).
- [109] Asdrubali F., Pisello AL., D'Alessandro F., Bianchi F., Fabiani C., Cornicchia M., "Experimental and numerical characterization of innovative cardboard based panels: thermal and acoustic performance analysis and life cycle assessment", *Building and Environment*, 95:145-59, (2016).
- [110] Baetens R., Jelle B.P., Thue J.V., Tenpierik M.J., Grynning S., Uvsløkk S., "Vacuum insulation panels for building applications: a review and beyond", *Energy and Buildings*, 42:147-72, (2010).
- [111] Alam M, Singh H, Limbachiya MC. "Vacuum Insulation Panels (VIPs) for building construction industry a review of the contemporary developments and future directions", *Applied Energy*, 88:3592-3602, (2011).
- [112] Baetens R., Jelle B.P., Gustavsen A., Grynning S., "Gas-filled panels for building applications: a state-of-the-art review", *Energy and Buildings*, 42:1969-75, (2010).
- [113] Griffith B., Türler D., Arasteh D., "Optimizing the effective conductivity and cost of gas-filled panel thermal insulations", *22nd International Thermal Conductivity Conference*, Arizona State University, (1993).
- [114] Dorcheh A.S., Abbasi H., "Silica aerogel; synthesis, properties and characterization", *Journal of Materials Processing Technology*, 199: 10-26, (2008).
- [115] Van Bommel M.J., den Engelsen C.W., van Miltenburg J.C., "A thermoporometry study of fumed silica/aerogel composites", *Journal of Porous Materials*, 4:143-150, (1997).
- [116] Baetens R., Jelle B.P., Gustavsen A., "Aerogel insulation for building applications: a state-of-the-art review" *Energy and Buildings*, 43:761-769, (2011).
- [117] Neugebauer A., Chen K., Tang A., Allgeier A., Glicksman L.R., Gibson L.J., "Thermal conductivity and characterization of compacted, granular silica aerogel", *Energy and Buildings*, 79:47-57, (2014).
- [118] Berardi U., "The development of a monolithic aerogel glazed window for an energy retrofitting project", *Applied Energy*, 154:603-615, (2015).
- [119] Ricciardi P., Gibiat V., Hooley A., "Multilayer absorbers of silica aerogel", *In: Proceedings of Forum Acusticum*, Sevilla, Spain, (2002).
- [120] Hayase G., Kanamori K., Abe K., Yano H., Maeno A., Kaji H., "Polymethylsilsesquioxane-cellulose nanofiber biocomposite aerogels with high thermal insulation, bendability, and superhydrophobicity", *Applied Materials & Interfaces*, 6:9466-9471, (2014).