



POLİTEKNİK DERGİSİ

JOURNAL of POLYTECHNIC

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

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



Ortam bağıl nemi ve sıcaklığının taş yünü yalıtım malzemesinin performansı üzerine etkileri

Effects of ambient relative humidity and temperature on the performance of rock wool insulation material

Yazar(lar) (Author(s)): Korhan ÖKTEN ¹, Adem Oğuzhan ÖZDEMİR ², Ertuğrul ÖZTÜRK, ³ Hatice DEMİR, ⁴ Mustafa ÖZDEMİR, ⁵

ORCID¹: 0000-0002-8728-8785

ORCID²: 0000-0001-6733-2796

ORCID³: 0000-0003-1072-8284

ORCID⁴: 0000-0003-2519-1512

ORCID⁵: 0000-0002-1069-3627

Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article): Ökten K., Özdemir A. O. , Öztürk E. , Demir H. ve Özdemir M., “Ortam bağıl nemi ve sıcaklığının taş yünü yalıtım malzemesinin performansı üzerine etkileri”, *Politeknik Dergisi*, 25(2): 723-731, (2022).

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

DOI: 10.2339/politeknik.793362

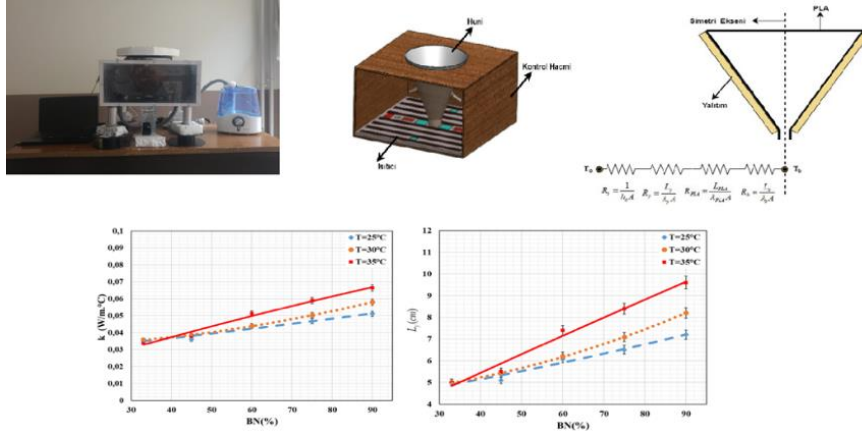
Ortam Bağıl Nemi ve Sıcaklığının Taş Yünü Yalıtım Malzemesinin Performansı Üzerine Etkileri

Effects of Ambient Relative Humidity and Temperature on the Performance of Rock Wool Insulation Material

Önemli noktalar (Highlights)

- ❖ Bağıl nem/Relative humidity
- ❖ Sıcaklık/Temperature
- ❖ Taş yünü/Rock wool
- ❖ Termal iletkenlik/ Thermal conductivity
- ❖ Yalıtım performansı/ Insulation performance

Grafik Özet (Graphical Abstract)



Şekil. Deneysel düzenek ve sonuçlar /Figure. Experimental setup and results

Amaç (Aim)

Farklı bağıl nem ve ortam sıcaklığında bulunan taş yünü malzemesinin performansını incelemek amaçlanmıştır. / It is aimed to examine the performance of rock wool material at different relative humidity and ambient temperature.

Tasarım ve Yöntem (Design & Methodology)

Çalışma için deneysel bir düzenek kurularak sonuçlar elde edilmiştir. / An experimental setup was set up for the study and the results were obtained.

Özgünlük (Originality)

Taş yünü malzemesi termal performansı daha az maliyetli bir deney düzeneği ile saptanmıştır. / The thermal performance of the rock wool material was determined by a less costly test setup.

Bulgular (Findings)

Bağıl nem ve sıcaklığa bağlı olarak yalıtım performansı yaklaşık iki kat azalmıştır. / Insulation performance decreased approximately twice due to relative humidity and temperature.

Sonuç (Conclusion)

Taş yünü malzemesi bağıl nem ve sıcaklıktan olumsuz etkilenmektedir. Rock wool material is adversely affected by relative humidity and temperature.

Etik Standartların Beyanı (Declaration of Ethical Standards)

Bu makalenin yazarları çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler. / The author(s) of this article declare that the materials and methods used in this study do not require ethical committee permission and/or legal-special permission.

Ortam Bağıl Nemi ve Sıcaklığının Taş Yünü Yalıtım Malzemesinin Performansı Üzerine Etkileri

Araştırma Makalesi / Research Article

Korhan ÖKTEN^{1*}, Adem Oğuzhan ÖZDEMİR¹, Ertuğrul ÖZTÜRK¹, Hatice DEMİR¹, Mustafa ÖZDEMİR²

¹Teknoloji Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Amasya Üniversitesi, Türkiye

²Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Sakarya Üniversitesi, Türkiye

(Geliş/Received : 10.09.2020 ; Kabul/Accepted : 27.01.2021 ; Erken Görünüm/Early View : 07.02.2021)

ÖZ

Konutlarda enerji tasarrufu amaçlı yalıtım uygulaması oldukça yaygındır. Taş yünü malzemesi de birçok avantajından dolayı yalıtım uygulamalarında tercih edilen yalıtım malzemelerinden biridir. Bu çalışmada farklı bağıl nem ve sıcaklık değerlerinde tutulan ortam koşullarında taş yünü yalıtım malzemesinin performansı deneysel olarak incelenmiştir. Deneysel düzeneği olarak sabit bağıl nem ve sıcaklıkta tutulan bir kontrol hacmi ve kontrol hacmi içerisinde, içinde buz bulunan huni şeklinde bir depo kullanılmıştır. Böylece huni içerisine geçen ısı ile birlikte buz erimiş, damlama miktarları hassas bir tartı ile ölçülmüş ve değişen parametrelerin ergime miktarını nasıl değiştirdiği saptanmıştır. Ortam koşulları olarak bağıl nem değerleri %33-90 aralığında ve sıcaklık değerleri 25-35 °C aralığında seçilmiştir. Sonuçlar ısı transferi, yalıtım kalınlığı ve ısı iletim katsayısı cinsinden kıyaslanmıştır. Çözümler için tek boyutlu ısı direnç ağları kullanılmıştır. Ayrıca elde edilen ısı iletim katsayıları belirli koşullar altında literatür ile doğrulanmıştır. Sonuçlar incelendiğinde yalıtım malzemesine geçen maksimum ısı transferi miktarı bağıl nem değişimine bağlı olarak %70, sıcaklığa bağlı olarak %34 arttığı, ısı iletim katsayısının ise bağıl nemin artışına bağlı olarak maksimum %90, sıcaklık artışına bağlı olarak %30 arttığı görülmüştür. Son olarak yalıtım kalınlığı incelendiğinde ise bağıl nem ve sıcaklığa bağlı olarak yalıtım kalınlığı yaklaşık 2 katına çıkarıldığında aynı yalıtım performansını verdiği belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Yalıtım, taş yünü, ısı iletim katsayısı, ısı transferi.

Effects of Ambient Relative Humidity and Temperature on the Performance of Rock Wool Insulation Material

ABSTRACT

Insulation is a quite common application used in residential. Also rock wool material is one of the preferred insulation materials in insulation applications due to its many advantages. In this study, the performance of rock wool insulation material has been investigated experimentally under ambient conditions kept at different relative humidity and temperature values. As an experimental setup, a control volume kept at constant relative humidity and temperature and a cone-shaped tank with ice in it were used. Thus, the ice melted together with the heat transferred into the funnel, and drip amounts were measured with a precision weighing. Relative humidity values were selected between 33-90% and temperature values between 25-35 °C as ambient conditions. The results were compared in terms of heat transfer, insulation thickness, and thermal conductivity. When the results are examined, it was seen that the maximum heat transfer amount to the insulation material increased by 70% depending on the relative humidity change, 34% depending on the temperature, and it was seen that the maximum thermal conductivity of the insulation material increased by 90% depending on the relative humidity change, 30% depending on the temperature. Finally, when the insulation thickness was examined, it was determined that when the insulation thickness was doubled depending on the relative humidity and temperature, it gives the same insulation performance.

Keywords: Insulation, rock wool, thermal conductivity, heat transfer.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

İnsanların hem evlerinde hem de ticari binalarda harcadıkları zamanın artışına bağlı olarak konutlarda tüketilen enerji, ulaşım ve sanayide kullanılan enerji tüketimine yaklaşmıştır[1][2]. Konut giderleri arasında ısıtma ve soğutma oldukça büyük öneme sahiptir.

Bu giderleri azaltabilmek için süreç içinde birçok çalışma yapılmıştır. Bu çalışmalar genellikle ya ısıtma soğutma

verimini artırmak ya da mevcut ısının korunmasını sağlamak üzerine gerçekleşmiştir. Konut yalıtımı da son yıllarda yaygın hale gelen hatta yeni yapılarda zorunlu hale getirilen bir uygulamadır. Ancak yalıtım malzemesi cinsi ve uygulaması, kullanım yerine ve kullanıcı isteklerine bağlı olarak çeşitlilik göstermektedir.

Taş yünü malzemesi düşük ısı iletim katsayısı, yüksek sıcaklıklarda kullanılabilirliği, yanmayan bir malzeme olması, ucuz olması ve çevreci bir malzeme olması nedeniyle yaygın olarak kullanılmaktadır [3,4]. Ancak bilindiği üzere yalıtım performansını etkileyen birçok

*Sorumlu yazar (Corresponding Author)
e-posta : korhan.okten@amasya.edu.tr

parametre vardır. Ortam nemliliği ve sıcaklığının da özellikle taş yünü malzemesinin performansını önemli ölçüde etkilediği bilinmektedir [5]. Özellikle taş yünü malzemesi gözenekli bir yapıya sahip olduğundan yüksek bağıl nemli ortamlarda hava boşlukları yerine su buharı yerleşerek yalıtım performansını düşürmektedir [6].

Literatürde yalıtım malzemelerinin ayrı ayrı sıcaklık ve nem kaynaklı ısı iletim katsayılarının değişimine yönelik çalışmalar mevcuttur [7,8,9]. Ancak taş yünü özelinde bakıldığında sıcaklığın ve nemliliğin ısı iletimini inceleyen kısıtlı çalışmalar vardır. En kapsamlı çalışma Karamanos ve ark.[4] tarafından gerçekleştirilen deneysel bir çalışmadır. Deney düzeneği EN12667 standardına göre hazırlanmıştır. Deneylerde taş yünü malzemesinin ısı iletim katsayısını farklı sıcaklık ve nem değerleri için belirlemiştir. Ancak burada belirtilen sıcaklık aralığı daha çok sanayi uygulamalarında görülebilen 300-470 K aralığıdır. Sonuçlar uzun süreli yüksek sıcaklığa ve neme maruz kalan taş yünü yapısının bozulduğunu ve ısı iletim katsayısının arttığını göstermiştir. Benzer şekilde Cabeza ve ark. [10] deneysel düzeneği ile poliüretan, polistiren ve taş yünü malzemesinin performanslarını kıyaslamışlardır. Deney düzeneği olarak bir kontrol odası oluşturmuşlar ve bahsi geçen yalıtım malzemeleri ile kaplanmıştır. Bu kontrol odasının farklı mevsim şartlarındaki sıcaklıkları ve yalıtım malzemesinden geçen ısı akısı miktarları incelenmiştir. Soğuk hava şartlarında oda içerisine sıcaklığı belirli bir seviyede tutmak için radyatör yerleştirilmiştir. Sonuçlar her bir yalıtım malzemesinin değişen mevsim koşullarına bağlı olarak benzer bir davranışta olduğunu göstermiştir. Ayrıca CO₂ emisyonunun ortalama kış şartları için %64, yaz şartları için %37 düştüğü de saptanmıştır. Vrana ve Björk [11] bir deney düzeneği oluşturarak belirli bir sıcaklıkta ve bağıl nemde tutulan bir kontrol hacmi oluşturmuşlardır. Deneyde yalıtım malzemesi olarak mineral yünü kullanılmıştır. Çalışmada bağıl nem %25-75 aralığında, sıcaklık ise 5-30 °C aralığında seçilmiştir. Sonuçlar bağıl nem ve sıcaklık artışına bağlı olarak yalıtım performansının düştüğünü göstermiştir.

Literatürde görülen diğer çalışmalar ise taş yünü malzemesinin nem içeriğinin ısı iletim katsayısına etkisini incelemektedir. Buna bağlı olarak literatürde görülen deney düzeneklerini ve yapılan çalışma sonuçlarına bakılacak olursa; Pavlík ve Cerny [12] taş yünü malzemesinin konut içi yalıtımı olarak kullanılması sırasında higrotermal performansını ölçmek amaçlı deneysel bir çalışma yapmışlardır. Deney düzeneği olarak bir yüzeyi istenilen sıcaklık ve bağıl nemde tutulmuş diğer yüzeyi de atmosfere açık bir sistem kullanılmıştır. Sonuçlar aylara bağlı olarak ve değişen dış ortam sıcaklık ve bağıl nemine bağlı olarak incelenmiş ve taş yünü malzemesinin nem içerikleri paylaşılmıştır. Vrana ve Gudmundson [3] taş yünü malzemesinin nem içeriğini belirlemek için deneysel bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Deneyler için bir kontrol hacmi oluşturmuşlar ve bu kontrol hacmini belirli sıcaklık ve

nem değerinde tutmuşlardır. Kontrol hacmi içerisine tüp içerisine su yerleştirilmiş ve su ağırlığı zamana bağlı olarak hassas tartı ile ölçülmüştür. Ortamdan buharlaşan nem kontrol hacmi üzerine yerleştiren taş yünü malzemesi tarafından emilmiştir. Böylece yalıtımın nem içeriği belirlenebilmiştir. Sonuçlarda yalıtımın nem içeriğinin zamana bağlı artışına bağlı olarak küf ve mantar oluşumunun arttığı ve ısı iletim katsayısının önemli ölçüde olumsuz yönde etkilendiği gözlemlenmiştir. Latif ve diğ. [13] yaptıkları çalışmada taş yünü malzemesinin ortam nemliliğine bağlı ısı iletkenlik katsayısının değişimini incelemiştir. Deney düzeneği olarak bir test odası kurulmuş ve istenilen nem ve sıcaklık değerinde tutulmasını sağlanmıştır. Test odasının dışının tamamı XPS ile kaplanmış olup belirli bir kısmı sadece taş yünü ile kaplanmış ve aylara bağlı ölçümler alınmıştır. Sonuçlar ortamın bağıl neminin taş yünü malzemesinin ısı iletkenliğini oldukça artırdığını göstermiştir. Latif ve diğ. [14] yaptıkları bir diğer çalışmada ise taş yünü malzemesinin nem ve ısı geçişini incelemek için sıcak ve soğuk iklim odaları oluşturmuşlardır. İki odanın birleşme noktasına yalıtım malzemesi yerleştirmişlerdir. Böylece nem içeriklerine bağlı olarak termal iletkenlik katsayıları belirlenmiştir. Sonuçlar taş yünü malzemesinin önemli miktarda nem içeriğini bünyesinde tutabildiğini ve bu durumun ısı iletim katsayısını oldukça etkilediğini göstermiştir. Jerman ve Cerny [15], taş yünü malzemesinden, farklı ortam bağıl nem değerlerinde, ısı ve nem geçişi ve buna bağlı olarak ısı iletim katsayısı değişimini deneysel olarak incelemiştir. Sonuçlar nem içeriği değişimine bağlı olarak yalıtım malzemesi ısı iletkenliğinde hızlı bir artış olduğunu göstermiştir. Nangy ve ark. [16], yaptıkları çalışmada mineral içerikli bir yalıtım malzemesi olan taş yünü malzemesinin nem içeriğine bağlı olarak ısı direnç, ısı iletim katsayısı ve malzeme dayanıklılığı üzerine etkisini deneysel olarak incelemiştir. Sonuçlar değişken koşullara bağlı olarak ısı direncin %40 oranında düştüğünü göstermiştir.

Yukarıda ayrıntıları verilen literatür çalışmaları incelendiğinde hem ortam bağıl nemi hem ortam sıcaklığının yalıtım performansı üzerine birleşik etkisini inceleyen çalışma sayısı oldukça azdır. Bununla beraber yapılan çalışmalarda kurulan deneysel düzenekler oldukça maliyetlidir. Dolayısıyla bu çalışmada kurulan deney düzeneği ile bağıl nemin ve ortam sıcaklığının yalıtım malzemesi performansı üzerine etkileri, daha düşük maliyetle ve daha hızlı bir şekilde elde edilmesi amaçlanmıştır. Özellikle Türkiye gibi yaz mevsiminde, farklı bölgelerde farklı sıcaklık ve nem değerlerine sahip olan ülkelerde yalıtım performansı önem arz etmektedir. Bu çalışmada yalıtım (taş yünü) performansını incelemek amaçlı farklı bağıl nem ve sıcaklık değerleri için ısı iletkenlik, yalıtım malzemesi üzerinden geçen ısı akısı miktarı ve yalıtım kalınlıkları cinsinden kıyaslamalar yapılmıştır. Sıcaklık değerleri olarak 25 °C, 30 °C ve 35 °C ve bağıl nem değerleri olarak %32, %45, %60, %75 ve %90 değerleri seçilmiştir. Seçilen sıcaklık ve bağıl

nem değerlerinin yalıtım performansı üzerine birleşik etkisi kıyaslamalı olarak gösterilmiştir.

2. MATERYAL VE METOD (MATERIAL and METHOD)

Yalıtım malzemelerinin termal iletkenlik katsayısının farklı ortam koşullarında değişimini incelemek için literatürde birçok deney düzeneği modeli oluşturulmuştur. Ancak oluşturulan modellerin maliyetli olduğu bilinmektedir. Bu çalışmada ise önerilen model daha az maliyetli ve daha kolay ölçülebilir.

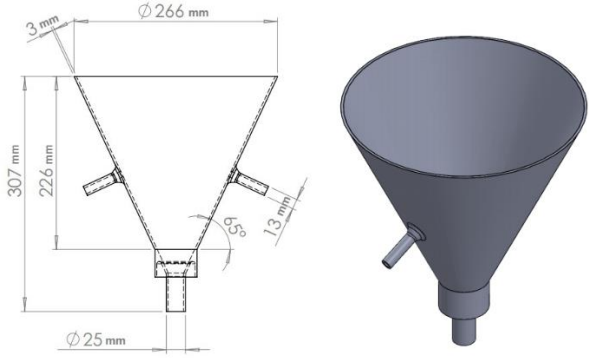
Şekil 1’de görülen deney düzeneğinin temel mantığı istenilen bağıl nem ve sıcaklıkta tutulan bir kontrol hacmi içerisindeki buzun ergimesine bağlı olarak ısı iletim katsayılarını belirlemektir. Deney düzeneği bileşenleri olarak kontrol hacmi, nem kaynağı, içerisinde buz bulunduğu huni şeklinde bir buz deposu, ısıtıcı, sıcaklık ve nem sensörleri, hassas tartı ve verilerin kaydedildiği bir bilgisayar kullanılmıştır.



Şekil 1. Deney düzeneği genel görünümü (Experimental setup general view)

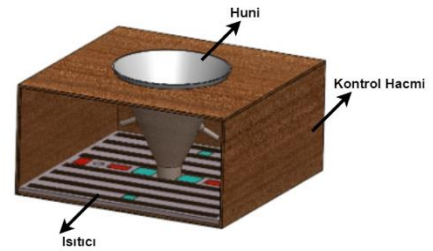
Şekil 2’de içerisinde buz bulunduğu huni şeklinde PLA malzemesinden yapılmış depo ve ölçüleri görülmektedir. Huni, kontrol hacminin ortasında bulunmaktadır. Buzun yüzey sıcaklığının ölçülmesi için huni üzerinde iki adet delik bulunmaktadır. Huninin üst yüzeyi kapak ile tamamen örtülmüş olup, bu kapağın üzerinde buzun orta noktasından ölçüm alabilmek için bir adet delik bulunmaktadır. Huninin dış yüzeyi ise tamamıyla taş yünü yalıtım malzemesiyle kaplıdır ve yalıtım malzemesi direkt olarak kontrol hacmi içerisinde bulunan belirli sıcaklık ve bağıl nemdeki hava ile temas halindedir. Burada kullanılan taş yünü yalıtım malzemesinin kalınlığı 5 cm ve yoğunluğu 50 kg/m^3 tür.

Burada belirtilmesi gereken bir başka husus depo geometrisinin neden huni şeklinde seçildiğidir. Deneyler sırasında buz kütesinin düzensiz erimesi sebebiyle keskin köşeye sahip bir depo geometrisi uygulandığında bu keskin köşelerde, buz ve depo temasının kesildiği görüldü. Bu sebeple düzensiz erime olsa dahi deney boyunca depo ve buz temasının sağlanabilmesi için huni şeklinde bir depo seçilmiştir.



Şekil 2. Huni geometrisi ve ölçüleri (Cone geometry and dimensions)

Şekil 3’te görüldüğü gibi kontrol hacminin tam ortasında içerisinde buz bulunan huni, tabanında şerit şeklinde serilmiş ısıtıcılar bulunmaktadır. Şekil 3’te görülen kontrol hacminin alt yüzeyindeki kırmızı kutucuklar sıcaklık sensörlerini ve mavi kutucuklar nem sensörlerini temsil etmektedir. Bu sensörler aynı şekilde kontrol hacminin üst yüzeyinde de bulunmaktadır. Kontrol hacminin ön yüzeyi ise pleksiglas malzeme ile kapatılmıştır.



Şekil 3. Kontrol hacmi ve deney bileşenleri (Control volume and experiment components)

Deneylerde kullanılan sensörler ve özellikleri Çizelge 1’de verilmiştir.

Deney prosesi başlamadan önce ve deney sırasında kontrol hacmi içerisindeki sıcaklık ve bağıl nem değerlerinin sabit tutulması gerekmektedir. Bu yüzden kontrol hacminin alt ve üst yüzeyinde bulunan sensörler yardımıyla alınan ölçümlerin ortalaması alınarak ortamın sıcaklık ve nem değerleri belirlenmiştir. Hem nem ve sıcaklık değerlerinin sabit tutulması için hem devamlı olarak sıcaklık ve nem ölçülerek kaydedilebilmesi için bir yazılım geliştirilmiştir. Buna göre sıcaklık ve nem sensörlerinin kontrolü için Arduino UNO kontrol kartı kullanılmıştır. Elde edilen veriler C-sharp dili ile oluşturulan arayüz vasıtasıyla ile belirlenen sürelerde bilgisayara kaydedilmiştir.

Deneyler sırasında kontrol hacmi içerisine, dışı tamamıyla taş yünü ile sarılı iç tarafında buz bulunan huni yerleştirilmiştir. Dolayısıyla huni içerisindeki buz kontrol hacminden geçen ısı sebebiyle erimştir. Eriyen buz bir kap içerisinde biriktirilmiş ve belirli aralıklarla hassas tartı vasıtasıyla ölçüm alınmıştır. Huni dışına

Çizelge 1. Deneylerde kullanılan sensörler ve özellikleri(Sensors used in experiments and their properties)

	Sıcaklık sensörü [17]	Nem sensörü [18]	Hassas terazi
Model	DS18B20	DHT22	-
Çalışma aralığı	-55 °C /+125 °C	0/100%	0.5 g /1000 g
Çözünürlük	0.01 °C	0.1%	0.1 g

sarılan taş yünü ısı iletimi, sıcaklık ve nemden etkilendiği için buzun erime miktarları da değişmiştir. Buz içerisine geçen ısı akısı miktarı bahsi geçen damlama miktarları vasıtası ile hesaplanabildiğinden deney düzeneğine ayrıca bir ısı akısı sensörü yerleştirilmesine gerek kalmamıştır. Bu durum, deney düzeneğimizin maliyetinin azalmasını sağlamıştır. Elde edilen erime miktarlarına bağlı olarak aşağıda belirtileceği gibi bir boyutlu ısı direnç ağları kullanılarak modellenmiş ve ısı iletim katsayıları hesaplanmıştır.

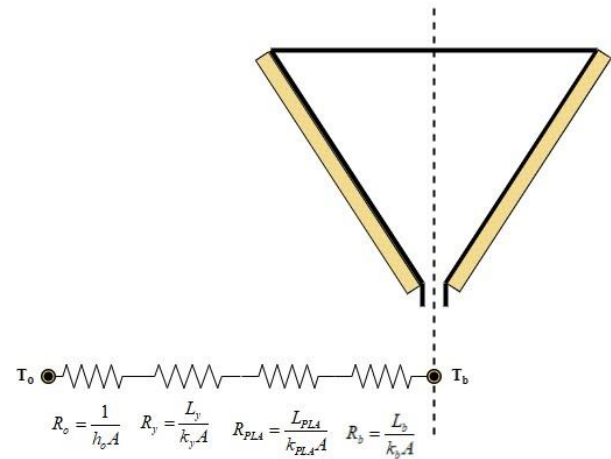
Çizelge 2’de deney grupları görülmektedir. Deney 1 olarak adlandırılan grup 25 °C, Deney 2 olarak adlandırılan grup 30 °C ve Deney 3 olarak adlandırılan grup, 35 °C sıcaklık değerine sahiptir ve her bir grupta %32, %45, %60, %75 ve %90 nem değerleri için deneyler gerçekleştirilmiştir. Deneylerin gerçekleştirildiği şartlar çizelgede görülmektedir.

Çizelge 2. Deney prosesleri sırasındaki ortam şartları (Ambient conditions during experiment processes)

	Sıcaklık (°C)	Bağıl Nem (%)
Deney 1	25.27	32.8
	25.17	46.89
	25.23	60.94
	25.22	75.76
	25.17	90.22
Deney 2	30.1	32.9
	30.02	45.8
	30.05	60.68
	30.07	76.18
	30.14	90.9
Deney 3	35.05	33
	34.9	45.5
	35.03	61.01
	34.99	76.3
	34.92	90.19

Yalıtım malzemesi performansını karakterize eden en önemli parametre ısı iletim katsayısıdır. Dolayısı ile elde edilen erime miktarları ve sıcaklık değerleri ile ısı iletim katsayıları hesaplanmıştır. Hesaplamalar için tek boyutlu ısı direnç ağları kullanılmıştır. Şekil 4’te ısı iletim

katsayılarının hesaplanabilmesi için oluşturulan model ve direnç ağları görülmektedir. Şekilde görülen R_b , R_y , R_{PLA} , R_o ifadeleri ise sırasıyla buzun, yalıtım malzemesinin, PLA ve havanın ısı direncini göstermektedir. h_o havanın taşınım katsayısını, L_y , L_{PLA} , L_b ifadeleri sırasıyla yalıtım, PLA ve buz katman kalınlıklarını ve k_y , k_{PLA} , k_b ifadeleri sırasıyla yalıtım, PLA ve buzun ısı iletim katsayılarını göstermektedir. Huni simetrik olduğundan direnç ağları için de huninin yarısı modellenmiştir.

**Şekil 4.** Isı iletim katsayılarının hesaplanabilmesi için oluşturulan direnç ağları modeli (Resistance network model created to calculate heat conduction coefficients)

Şekil 4’te görülen dirençleri hesaplanabilmesi için gerekli bilgiler Çizelge 3’de verilmiştir.

Şekil 4’te görülen dirençler birbirine seri olarak bağlı olduğundan toplam direnç Denklem 1’de görüldüğü gibi hesaplanır.

$$R_t = R_b + R_y + R_{PLA} + R_o \quad (1)$$

Denklem 1’de görülen R_t , toplam ısı direnci, R_b , R_y , R_{PLA} , R_o ifadeleri ise sırasıyla buzun, yalıtımın, PLA ve havanın ısı direncini göstermektedir. Buza geçen ısı transferi miktarı Denklem 2’deki gibi hesaplanır.

$$\dot{Q}_b = \frac{T_o - T_b}{R_t} \quad (2)$$

Çizelge 3. Direnç ağının çözümü için buz, yalıtım, PLA ve ortama ait özellikler (Ice, insulation, PLA and ambient properties for the solution of the resistance network)

	Buz	Yalıtım	PLA	Ortam
L (m)	0.077	0.05	0.003	-
A (m ²)	0.062	0.15	0.065	-
k (W/mK)	2.2 [19]	-	0.13 [20]	-
h (W/m ² K)	-	-	-	15 [21]
c (J/kgK)	2180 [21]	-	-	-
H_e (J/kg)	335.500 [21]	-	-	-

Denklem 2'de görülen \mathcal{Q}_b ifadesi buz kütlesine birim zamanda geçen ısı miktarını, T_o , çevre sıcaklığını, T_b , buz sıcaklığını göstermektedir. Isı iletim katsayısının hesaplanabilmesi için \mathcal{Q}_b değerinin hesaplanması gerekmektedir. \mathcal{Q}_b değeri buz kütlesine birim zamanda geçen ısı miktarıdır ki bu değer buz kütlesini erime sıcaklığına düşüren ve erimesini sağlayan enerji miktarına eşittir. Dolayısıyla \mathcal{Q}_b değeri Denklem 3'teki gibi hesaplanmıştır.

$$\mathcal{Q}_b = \frac{M_b (H_e + (T - T_e))}{\Delta t} \quad (3)$$

Denklem 3'te görülen M_b , eriyen buz kütlesini, t zamanı göstermektedir. Denklem 3'te Denklem 2'de yerine yazılırsa tek bilinmeyen olan k_y rahatlıkla bulunabilir.

DeneySEL çalışmalarda deneyi gerçekleştiren kişi veya sensör hassasiyetlerinden kaynaklı hatalar oluşabilmektedir. Dolayısıyla belirsizlik analizi yapılması önem arz etmektedir. Denklem 4 yardımı ile belirsizlik analizi gerçekleştirilmiştir [22].

$$w_R^+ = \left[\left(\frac{\partial R^+}{\partial X_1} w_1 \right)^2 + \left(\frac{\partial R^+}{\partial X_2} w_2 \right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial R^+}{\partial X_3} w_3 \right)^2 \right]^{1/2} \quad (4)$$

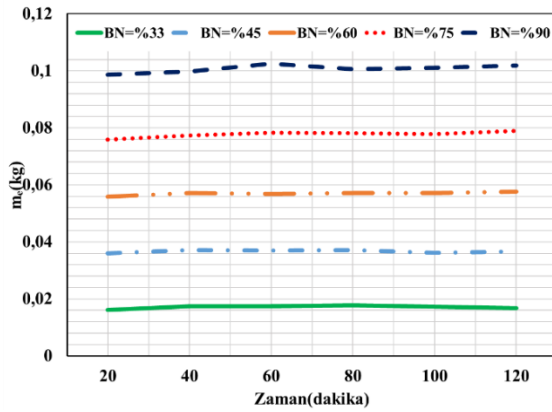
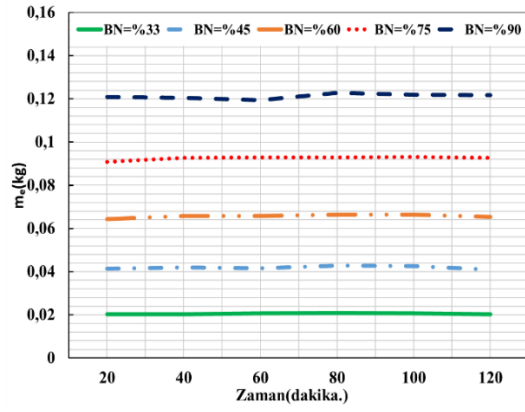
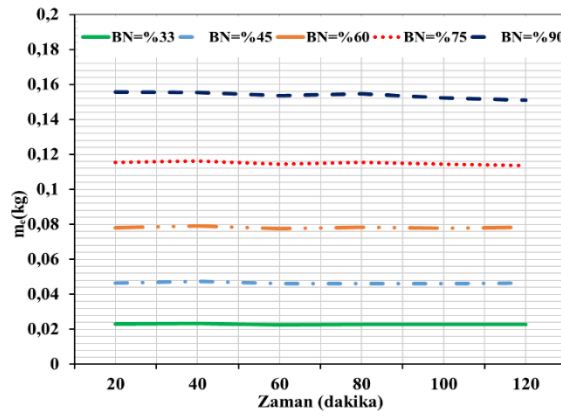
Çizelge 4 incelendiğinde deneyler sırasında kullanılan sensörlerin hassasiyetleri ve buna bağlı olarak hesaplanan parametrelerin belirsizlikleri görülmektedir. En büyük belirsizliğin termal iletkenlikte olduğu ancak bu belirsizliklerin kabul edilebilir oranda olduğu görülmektedir.

Çizelge 4. Sensör hassasiyetleri ve Belirsizlik analizi (Sensor sensitivities and Uncertainty analysis)

Sensör hassasiyetleri	
Sıcaklık sensörü	±0.5 °C
Nem sensörü	%2
Hassas tartı	±0.1
Belirsizlik değerleri	
\mathcal{Q}_b	%1
k_y	%3
L_y	%2.8

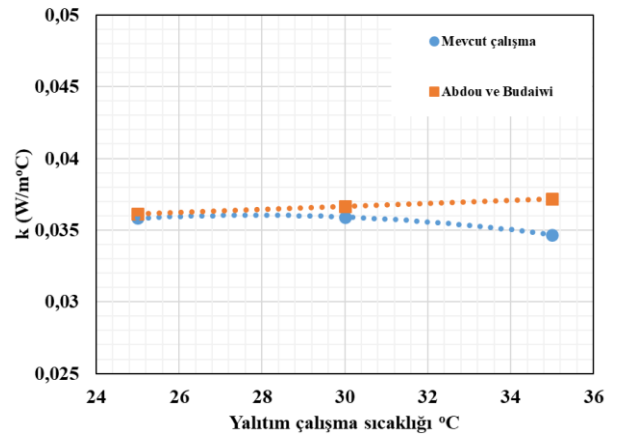
3. SONUÇLAR VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSION)

Şekil 5'te zaman, sıcaklık ve neme bağlı buz erime miktarları görülmektedir. Erime miktarlarının zamana bağlı neredeyse sabit kaldığı görülmektedir. Bununla birlikte sıcaklığa ve bağıl nem değerlerine bağlı olarak erime miktarlarının arttığı görülmüştür. Ayrıca sıcaklık artışına bağlı bağıl nem değişimlerinin erime miktarlarını önemli ölçüde arttırdığı gözlemlenmiştir. Bir başka deyişle 25 °C için bağıl nem değerlerinin artışına bağlı erime miktarı artışı yaklaşık 0.01 kg, 30 °C için bu değer yaklaşık 0.03 kg ve 35 °C için ise yaklaşık 0.005 kg seviyesindedir. Durumun daha iyi anlaşılabilmesi için Şekil 7, Şekil 8 ve Şekil 9'da ısı transferi miktarı, ısı iletim katsayıları ve yalıtım kalınlıkları incelenmiştir.

a) $T_0=25\text{ }^\circ\text{C}$ b) $T_0=30\text{ }^\circ\text{C}$ c) $T_0=35\text{ }^\circ\text{C}$

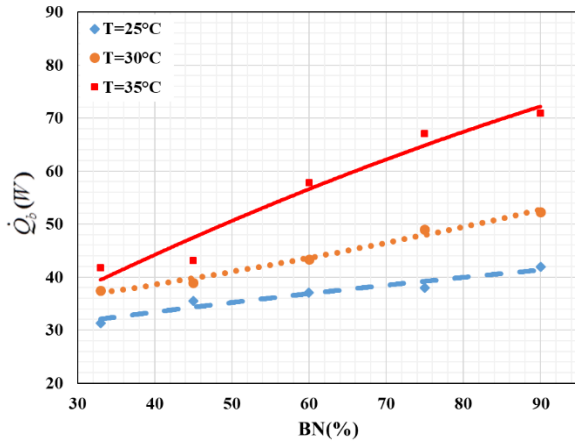
Şekil 5. Ergime oranlarının sıcaklık ve nem değerlerine bağlı değişimi (Change of melting rates depending on temperature and humidity values)

Şekil 5'te verilen erime değerleri ve Denklem 2 vasıtası ile ısı iletim katsayılarının bulunabileceğinden daha önceden bahsetmiştik. Ancak ayrıntılı sonuçlar verilmeden önce oluşturulan deney ve hesaplama modelinin doğrulanması önem arz etmektedir. Doğrulama için Abdou ve Budaiwi'nin [8] yapmış oldukları teorik çalışmadan faydalanılmıştır. Çalışmada taş yününün ısı iletim katsayısının yoğunluk ve sıcaklığa bağlı fonksiyonları verilmiştir. Şekil 6'da oluşturmuş olduğumuz modelden elde edilen ısı iletim katsayıları ile literatür verileri kıyaslanmıştır. Sonuçlar her iki çalışma arasında $25\text{ }^\circ\text{C}$ ve $30\text{ }^\circ\text{C}$ değerleri için fark %1 seviyelerindeyken $35\text{ }^\circ\text{C}$ değeri için %5 fark gözlenmiştir ki bunlar kabul edilebilir farklılıklardır.



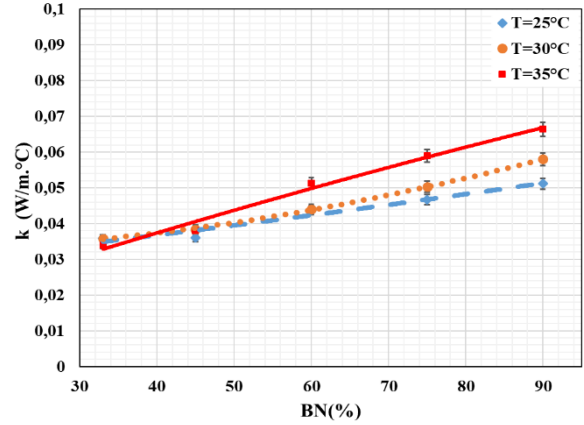
Şekil 6. Oluşturulan deney düzeneği ile elde edilen verilerin doğrulanması (Verification of the data obtained with the experimental setup created)

Öncelikli olarak Şekil 7’de huni içerisine yalıtım malzemesi üzerinden geçen ısı miktarı birim metrekare cinsinden görülmektedir. Burada deney şartlarına paralel yaklaşık 0 °C’de tutulan bir iç ortama dış ortamdan ısı geçtiğini düşünelim. Geçen ısı miktarı kadar ortam soğutulmalıdır ki ortam şartları sabit tutulabilsin. Dolayısıyla deney düzeneğinde görülen buz dolu huni soğutulmak istenen iç ortamı temsil ettiği, deney düzeneğindeki kontrol hacminin ise soğutulmak istenen ortamla temas halinde olan çevreyi temsil ettiği düşünülürse huniye birim metrekareden geçen ısı miktarı da soğutma yükünü temsil etmektedir. Sonuçlar incelendiğinde 25 °C için neme bağlı ısı transferi artışı %33, 30 °C için %40 ve 35 °C ise %70 civarında olduğu gözlenmiştir. Bunun yanında düşük bağıl nemlilik değerlerinde ısı transferi miktarının sıcaklıklara bağlı değişimin düşük olduğu, ancak yüksek bağıl nemliliklerde sıcaklığın ısı transferi miktarını önemli ölçüde artırdığı görülmüştür. Sıcaklığa bağlı maksimum artış %90 bağıl nemde görülmüştür. Buna göre 25 °C ve 30 °C arasında %26 ve 30 °C ve 35 °C değerleri arasında %34 artış meydana gelmiştir.



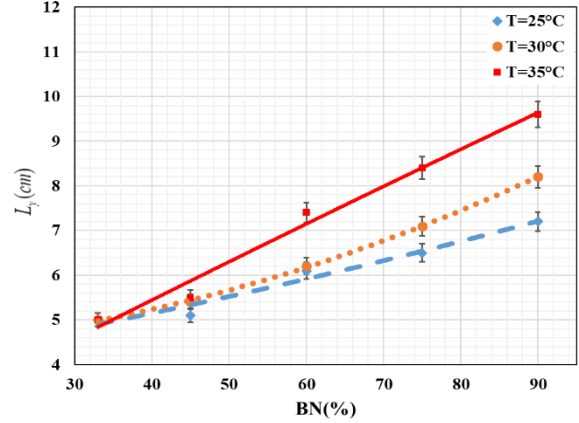
Şekil 7. Birim metrekare için huni içerisindeki buza geçen ısı miktarı (The amount of heat passing to the ice in the funnel per unit square meter)

Şekil 8’de sıcaklık ve neme bağlı ısı iletim katsayıları görülmektedir. Sıcaklık ve neme bağlı ısı iletim katsayıları önemli ölçüde artmaktadır. Düşük bağıl nem değerlerinde sıcaklığın ısı iletim katsayısı üzerine etkisi ihmal edilebilecek kadar küçüktür. Biraz daha ayrıntılı inceleysek, bağıl nemin değişimine bağlı ısı iletim katsayısındaki artış 25 °C için %42, 30 °C için %65 ve 35 °C için %90 seviyesindedir. Sıcaklık değişimine bağlı ısı iletim katsayısı değişimi incelendiğinde ise %45 bağıl nem için %5.5, %60 bağıl nem için %18, %75 bağıl nem için %26 ve %90 bağıl nem için %30 olduğu belirlenmiştir.



Şekil 8. Bağıl nem ve sıcaklığa bağlı termal iletkenlik katsayısı değişimi

%33 bağıl nemlilikte ve 25 °C, 30 °C ve 35 °C sıcaklık değerleri için 5 cm yalıtım kalınlığı yaklaşık ısıl direnç 4.606 K/W’ tır. Şekil 9’da aynı ısıl direncin sağlanabilmesi için farklı bağıl nem ve sıcaklıklarda yalıtım kalınlıkları belirlenmiştir. Sonuçlar bağıl neme ve sıcaklığa bağlı yalıtım kalınlıklarının önemli ölçüde arttığını göstermiştir. Maksimum artış %90 bağıl nem ve 35 °C’ de görülmüştür. Buna göre yalıtım kalınlığı 10 cm seviyelerine çıkmıştır ki bu yalıtım kalınlığını 2 katına çıkması gerektiğini göstermiştir. Bu durum yalıtım kalınlıklarının artışına bağlı olarak yalıtım maliyetlerinde iki katına çıkacağını göstermektedir.



Şekil 9. Sıcaklık ve bağıl neme bağlı yalıtım kalınlıkları (Insulation thickness depending on temperature and relative humidity)

4. SONUÇ (CONCLUSION)

Bu çalışmada ortam bağıl nem ve sıcaklığının taş yünü yalıtım malzemesi üzerine etkileri deneysel olarak incelenmiştir. Deney düzeneği olarak literatürden farklı bir yaklaşımla belirli sıcaklık ve bağıl nemde tutulan kontrol hacmi içerisinde buz bulunan huni şeklinde bir depo kullanılmıştır. Burada kullanılan içerisinde buz bulunan huni, bir nevi ısı akışı sensörü olarak kullanılmıştır. Huni içerisindeki buz yaklaşık -0.5 °C’de olduğu için kontrol hacminden huni içerisine ısı geçişi olmakta ve buz zamana bağlı erimektedir. Eriyen buz

miktarı hassas tartı ile ölçülmüştür. Elde edilen veriler bir boyutlu ısı direnç ağlarıyla çözümlenmiş ve huni içerisine geçen ısı miktarları, ısı iletim katsayıları ve yalıtım kalınlıkları hesaplanmıştır. Ayrıca belirli şartlarda elde edilen ısı iletim katsayıları literatür ile doğrulanmıştır.

Elde edilen sonuçlara göre sıcaklık ve bağıl nemin taş yünü malzemesinin performansını oldukça düşürdüğü gözlemlenmiştir. Biraz daha ayrıntılı incelersek; ısı iletim katsayılarının bağıl neme ve sıcaklığa bağlı maksimum artışı %90 seviyesindedir. Bu durum dolayısıyla buz içerisine geçen ısı miktarını %70 ve yalıtım kalınlığını neredeyse 2 kat seviyelerine kadar çıkarmıştır. Dolayısıyla bahar ve yaz aylarında ülkemiz gibi 25-35 °C ve %45-90 bağıl nem değerlerinde çevre şartlarındaki ülkeler için sıcaklık ve bağıl nemin ya yalıtım performansını düşürdüğü ya da performansın sabit tutulması durumunda ise yalıtım ve iklimlendirme maliyetlerini önemli ölçüde artırdığı saptanmıştır.

SEMBOLLER

A=Alan (m²)

c=Özgül ısı (J/kg °C)

h= Isı transfer katsayısı (W/m²°C)

H_e= Buzun erime entalpi (J/kg)

k=termal iletkenlik(W/mK)

\dot{Q} = Isı transfer (W)

L=Kalınlık(m)

M=Kütle(kg)

R=Termal direnç (°C /W)

T=Sıcaklık (°C)

t=Zaman (dak.)

Kısaltmalar

b=buz

e=erime

o=ortam

t=toplam

y=yalıtım

ETİK STANDARTLARIN BEYANI

(DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)

Bu makalenin yazar(lar)ı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler.

YAZARLARIN KATKILARI (AUTHORS' CONTRIBUTIONS)

Korhan ÖKTEN: Deneysel düzeneğin oluşturulmasında, sonuçların analiz edilip makalenin yazımında görev almıştır.

Adem Oğuzhan ÖZDEMİR: Deneysel düzeneğin oluşturulmasında, deneylerin planlanmasında ve yapılmasında görev almıştır.

Ertuğrul ÖZTÜRK: Deneysel düzeneğin oluşturulmasında, deneylerin planlanmasında ve yapılmasında görev almıştır.

Hatice DEMİR: Elde edilen verilerin analiz edilmesinde, makalenin yazımı ve kontrollerinin yapılmasında görev almıştır.

Mustafa ÖZDEMİR: Fikri ortaya koymuş ve çalışmanın danışmanlığını yürütmüştür.

ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST)

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur. / There is no conflict of interest in this study.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Hoseini A. and Bahrami M., "Effects of humidity on thermal performance of aerogel insulation blankets", *Journal of Building Engineering*, 13:107-115, (2017).
- [2] Pérez-Lombard, L., Ortiz J., and Pout C., "A review on buildings energy consumption information", *Energy and Buildings*, 40(3): 394-398, (2008).
- [3] Vrána T., and Gudmundsson, K., "Comparison of fibrous insulations—Cellulose and stone wool in terms of moisture properties resulting from condensation and ice formation", *Construction and Building Materials*, 24(7): 1151-1157, (2010).
- [4] Karamanos A., Hاديarakou S. and Papadopoulos, A. M., "The impact of temperature and moisture on the thermal performance of stone wool", *Energy and Buildings*, 40(8): 1402-1411, (2008).
- [5] Schiavoni S., Bianchi F. and Asdrubali, F. "Insulation materials for the building sector: A review and comparative analysis", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 62, 988-1011, (2016).
- [6] Danovska M., Pernigotto G., Baratieri M., Baggio P. and Gasparella, A. "Influence of moisture content, temperature and absorbed solar radiation on the thermal performance of a spruce XLAM wall in the Italian climates", *In Journal of Physics: Conference Series*, 1599(1): 12028, (2020).
- [7] Abdou, A. and Budaiwi, I. "The variation of thermal conductivity of fibrous insulation materials under different levels of moisture content", *Construction and Building materials*, 43: 533-544, (2013).
- [8] Abdou, A. A., and Budaiwi, I. M., "Comparison of thermal conductivity measurements of building insulation materials under various operating temperatures", *Journal of building physics*, 29(2): 171-184, (2005).
- [9] Khoukhi, M., Fezzioui, N., Draoui, B. and Salah, L., "The impact of changes in thermal conductivity of polystyrene insulation material under different operating temperatures on the heat transfer through the building envelope", *Applied Thermal Engineering*, 105: 669-674, (2016).
- [10] Cabeza L. F., Castell A., Medrano M., Martorell I., Pérez G. and Fernández I., "Experimental study on the performance of insulation materials in Mediterranean construction", *Energy and Buildings*, 42(5): 630-636, (2010).

- [11] Vrána T. and Björk F. A., "Laboratory equipment for the study of moisture processes in thermal insulation materials when placed in a temperature field", *Construction and Building Materials*, 22(12): 2335-2344, (2008).
- [12] Pavlík Z. and Černý R., "Hygrothermal performance study of an innovative interior thermal insulation system", *Applied Thermal Engineering*, 29(10): 1941-1946, (2009).
- [13] Latif E., Ciupala M. A., and Wijeyesekera D. C. "The comparative in situ hygrothermal performance of Hemp and Stone Wool insulations in vapour open timber frame wall panels", *Construction and Building Materials*, 73: 205-213, (2014).
- [14] Latif E., Tucker S., Ciupala M. A., Wijeyesekera D. C., Newport D. J. and Pruteanu, M., "Quasi steady state and dynamic hygrothermal performance of fibrous Hemp and Stone Wool insulations: Two innovative laboratory based investigations", *Building and Environment*, 95: 391-404, (2016).
- [15] Jerman M., and Černý R., "Effect of moisture content on heat and moisture transport and storage properties of thermal insulation materials", *Energy and Buildings*, 53: 39-46, (2012).
- [16] Nagy B., Simon T. K. and Nemes, R., "Effect of built-in mineral wool insulations durability on its thermal and mechanical performance", *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 139(1): 169-181,(2020).
- [17]<https://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/DS18B20.pdf>, " Sıcaklık sensörü teknik özellikleri"
- [18] Liu T., "Digital-output relative humidity & temperature sensor/module DHT22 (DHT22 also named as AM2302)", **Aosong Electronics.[En línea]. Disponible: <https://www.sparkfun.com/datasheets/Sensors/Temperature/DHT22>**, (2013).
- [19] Bonales L. J., Rodríguez A. C. and Sanz, P. D., "Thermal conductivity of ice prepared under different conditions", *International journal of food properties*, 20(1): 610-619, (2017).
- [20]https://www.sd3d.com/wpcontent/uploads/2017/06/MaterialTDS-PLA_01.pdf ,"Technical Data Sheet".
- [21] Yunus A. Çengel and Ghajar A. J., "*Heat and Mass Transfer: Fundamentals & Applications*", McGraw Hill Education, (2015).
- [22] Moffat, R. J., " Describing the uncertainties in experimental results", *Experimental thermal and fluid science*, 1(1): 3-17, (1988).