



Development of a standard laboratory testing method for thermal diffusivity measurements of building walls: Combined use of Infrared thermography and guarded hot box

Rukiye Koçkar Tuğla^{1*}, Ayşe Tavukçuoğlu², Salih Yazıcıoğlu³

¹Department of Building Structure, Abana Sabahat Mesut Yılmaz Vocational High School, Kastamonu University, 37970, Kastamonu, Türkiye

²Department of Architecture, Faculty of Architecture, Middle East Technical University, 06680, Ankara, Türkiye

³Department of Civil Engineering, Faculty of Technology, Gazi University, 06560, Ankara, Türkiye

Highlights:

- Direct measurement of a wall's thermal diffusion under laboratory conditions with the IRT-GHB experimental setup
- Thermal diffusivity measurement of a heated wall by monitoring the surface temperatures on the cold side
- Development of IRT-GHB setup as a standard in situ non-destructive laboratory testing method of thermal diffusivity

Keywords:

- Thermal diffusivity value
- Lightweight pumice concrete unit
- Infrared thermography
- Guarded hot box

Article Info:

Research Article

Received: 04.06.2023

Accepted: 04.05.2024

DOI:

10.17341/gazimmfd.1296046

Acknowledgement:

This study has been supported by Gazi University Scientific Research Project Coordination Unit by the BAP 07/2018-21 coded research project.

Correspondence:

Author: Rukiye Koçkar

Tuğla

e-mail:

rkoçkar@kastamonu.edu.tr

phone: +90 506 415 4139

Graphical/Tabular Abstract

The newly-introduced experimental setup, IRT-GHB (Figure A), allowing the combined use of InfraRed thermography and guarded hot box methods, was developed to measure the thermal diffusivity value (α , m²/s) of a building wall.

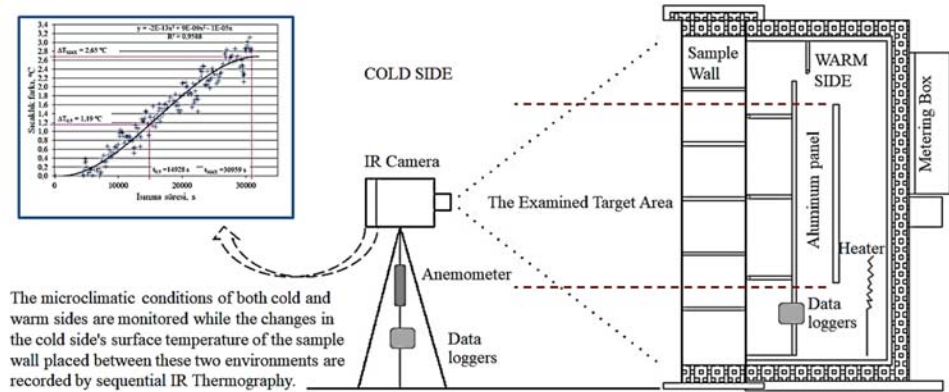


Figure A. The new experimental setup-IRT-GHB

Purpose: The theoretical thermal diffusivity values of building walls calculated by using the data on basic physical and thermal properties of the materials forming the building wall listed in the relevant standards and handbooks can be misleading due to the differences in numerical data given in the lists. No experimental setup exists that directly measures the thermal diffusivity value of a wall in the literature. The study aims to develop an experimental setup that can directly measure the thermal diffusivity (α , m²/s) value of building walls by the combined use of infrared thermography and guarded hot box methods.

Theory and Methods: A 19cm-thick wall sample made of lightweight pumice concrete block and mortar was prepared for the performance analysis of the new experimental setup (IRT-GHB) proposed for thermal diffusivity measurements. The thermal diffusivity value of this sample wall was calculated by using the data showing the surface temperature change on the cold side of the sample wall versus time and the relevant theoretical equation. The thermal diffusivity of the sample wall (α_{IRT}) measured by the IRT-GHB setup was compared to the reference thermal diffusivity value (α_{REF}) of the same wall, calculated by using its thermal properties measured by standard laboratory tests.

Results: The reference thermal diffusivity value (α_{REF}) of the sample wall, calculated by using thermal properties measured by standard laboratory tests, is 3.40×10^{-7} m²/s. The thermal diffusivity (α_{IRT}) of the same wall, measured with the proposed IRT-GHB experimental setup, is 3.38×10^{-7} m²/s. The value measured with that new setup is similar to the reference thermal diffusivity value.

Conclusion: The results show that the new experimental setup can directly measure the thermal diffusivity of a wall. Compared to the existing measurement techniques, which require additional performance tests and their use in relevant equations, the proposed experimental setup presents a measurement technique establishing the foundation of a standard scientific analytical method being more practical, time-saving, and economical.



Yapı duvarlarının ısı yayınlılık ölçümleri için standart bir laboratuvar test yönteminin geliştirilmesi: Kızılötesi ısı görüntüleme ve korumalı sıcak kutunun birlikte kullanımı

Rukiye Koçkar Tuğla^{1*}, Ayşe Tavukçuoğlu², Salih Yazıcıoğlu³

¹Kastamonu Üniversitesi, Abana Sabahat Mesut Yılmaz MYO, İnşaat Bölümü, 37970, Abana, Kastamonu, Türkiye

²Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Mimarlık Fakültesi, Mimarlık Bölümü, 06680, Ankara, Türkiye

³Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 06560, Yenimahalle, Ankara, Türkiye

Ö N E Ç I K A N L A R

- IRT-GHB deney düzeneği ile laboratuvar koşullarında bir duvarın ısı yayınlılığını doğrudan ölçümü
- Isınmakta olan bir duvarın soğuk taraftaki yüzey sıcaklıklarının takibi ile ısı yayınlılık ölçümü
- IRT-GHB düzeneğinin, ısı yayınlılığın yerinde tahribatsız bir standart bir laboratuvar test yöntemi

Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi
Geliş: 04.06.2023
Kabul: 04.05.2024

DOI:

10.17341/gazimmfd.1296046

Anahtar Kelimeler:

Isıl yayınlılık,
pomza agregalı hafif beton
blok,
kızılötesi ısı görüntüleme,
mahfazalı sıcak kutu

ÖZ

Bir yapı duvarının ısı yayınlılık değeri, bu duvarı oluşturan malzemelerin standartlarda ve/veya basılı yayınlarda listelenen termofiziksel özellikleri kullanılarak teorik olarak hesaplanabilmektedir. Bu listelerde, aynı kategoride yer alan yapı malzemeleri, farklı ısı özellikleri ile tanımlanabilmekte; dolayısıyla teorik olarak hesaplanan ısı yayınlılık değerleri, yanıltıcı olabilmektedir. Bu çalışmada, kızılötesi ısı görüntüleme ve mahfazalı sıcak kutu yöntemleri bir arada kullanılarak yapı duvarlarının ısı yayınlılık (α) değerini doğrudan ölçebilen bir deney düzeneği geliştirilmiştir. Pomza agregalı hafif beton blok ve harç ile 19cm kalınlığında bir duvar örneği hazırlanmış; bu duvar iklim koşulları takip edilen korunaklı sıcak ortam ve ardışık ısı görüntüleme ile takip edilen soğuk ortam arasında yerleştirilmiştir. Örnek duvarın ısı yayınlılık değeri, zamana karşı sıcaklık değişimini gösteren veriler esas alınarak doğrudan hesaplanabilmektedir. Bu duvarın standart laboratuvar testleri ile belirlenen ısı özellikleri esas alınarak hesaplanan referans ısı yayınlılık değeri (α_{REF}) $3,4014 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ 'dir. Aynı duvarın, önerilen IRT-GHB deney düzeneği ile ölçülen ısı yayınlılık değeri (α_{IRT}) $3,3813 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ 'dir. Yeni düzeneğe ile ölçülen değer, referans ısı yayınlılık değeri ile benzerdir; sonuçlar, yeni deney düzeneğinin bir duvarın ısı yayınlılık değerini doğrudan ölçebildiğini göstermiştir. Bu düzeneğe, mevcut ölçüm tekniklerine kıyasla zaman kazandıran ve ölçümler için mali yükü azaltan, bilimsel ve pratik bir analiz yönteminin temelini oluşturmaktadır.

Development of a standard laboratory testing method for thermal diffusivity measurements of building walls: Combined use of Infrared thermography and guarded hot box

H I G H L I G H T S

- Direct measurement of a wall's thermal diffusion under laboratory conditions with the IRT-GHB experimental setup
- Thermal diffusivity measurement of a heated wall by monitoring the surface temperatures on the cold side
- A standard in situ non-destructive laboratory test method of the IRT-GHB assembly, thermal diffusivity

Article Info

Research Article
Received: 04.06.2023
Accepted: 04.05.2024

DOI:

10.17341/gazimmfd.1296046

Keywords:

Thermal diffusivity,
Lightweight concrete unit
with pumice aggregate,
infrared thermography,
guarded hot box

ABSTRACT

The thermal diffusivity value of a building wall can be calculated theoretically by using the thermophysical properties of its materials listed in standards and literature. In these lists, building materials in the same category can be defined by different thermal properties; therefore, the theoretically-calculated thermal diffusivity values can be misleading. In this study, an experimental setup was developed that can directly measure the thermal diffusivity (α , m^2/s) value of building walls by the combined use of infrared thermography and guarded hot box methods. A 19cm-thick wall sample made of lightweight concrete block with pumice aggregate and mortar was prepared; this wall is positioned between a controlled warm ambient on its one side and a cold ambient on the other side, where its surfaces were monitored by sequential IR imaging. The thermal diffusivity value of the sample wall was calculated by using the data showing temperature change versus time and the relevant theoretical equation. The reference thermal diffusivity value (α_{REF}) of the sample wall, calculated by using thermal properties measured by standard laboratory tests, is $3.40 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$. The thermal diffusivity (α_{IRT}) of the same wall, measured with the proposed IRT-GHB experimental setup, is $3.38 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$. The value measured with that new setup is similar to the reference thermal diffusivity value. The results show that the new experimental setup can directly measure the thermal diffusivity of a wall. Compared to the existing ones, the proposed experimental setup presents a measurement technique that saves time and sets the basis of a scientific, practical, and more economical analytical method.

*Sorumlu Yazar/Yazarlar / Corresponding Author/Authors : *rkoçkar@kastamonu.edu.tr, aysetavukcuoglu@yahoo.com, syazıcıoğlu@gazi.edu.tr / Tel: +90 506 415 4139

1. Giriş (Introduction)

Enerji verimliliği yüksek yapılar oluşturmamızın yollarından biri, ısı geçirimsizlik özellikleri iyileştirilmiş duvar dolgu malzemeleri kullanmaktır. Bu amaçla, inşaat sektöründe yaygın kullanılan gazbeton ve bimsblok (ponza agregalı çimento bağlayıcılı kagir duvar bloğu) gibi hafif ve gözenekli yapı malzemeleri üretilmektedir. Bu tür hafif beton kagir yapı malzemelerinin ısı geçirimsizlik özellikleri özgül ısı (c , J/kgK), ısı iletkenlik hesap değeri (λ , W/mK) ve ısı geçirgenlik değeri (U-değeri, W/m²K) gibi bazı temel ısı parametreleri ile belirlenmektedir. Isı yayınlık değeri (α , m²/s) malzemenin ısı iletkenlik hesap değeri, birim hacim ağırlığı (ρ , kg/m³) ve özgül ısısına bağlı olan, ısınma veya soğuma koşulları altındaki malzeme içerisinde sıcaktan soğuğa ısı akışının ne kadar hızlı ilerlediğini gösteren; kısaca malzemenin ısı geçirimsizliği hakkında bilgi veren temel ısı parametrelerden bir tanesidir [1-4].

Çok katmanlı malzemelerden oluşan, bu sebeple homojen olmayan yapı duvarlarının ısı yayınlık değerini doğrudan ölçen bir yöntem veya cihaz bulunmamaktadır. Ancak, bir yapı duvarının ısı yayınlık değeri dolaylı yoldan belirlenebilmektedir; daha açık anlatımla, yapı duvarını oluşturan malzemelerinin birim hacim kütle (ρ , kg/m³), özgül ısı (c , J/kgK) ve ısı iletkenlik hesap değeri (λ , W/mK) belirlendikten sonra, Eş. 1 kullanılarak teorik olarak hesaplanabilmektedir [1, 3]. Bu üç ısı özelliklerinden, özellikle malzemelerin ısı iletkenlik hesap değeri (λ), pahalı deney düzenekleri ile ölçülebilmektedir. Ayrıca tüm bu ısı özelliklerin deneyler ile belirlenebilmesi için belirli boyutlarda numunelerin hazırlanması ve gelişmiş laboratuvar olanaklarına erişimin olması gerekmektedir. Tüm bu aşamalar ciddi vakit kaybına sebep olmakta, maddi açıdan da ciddi bir yük oluşturmaktadır. Bu nedenle bir duvarın α değeri, duvarı oluşturan malzemelerin genel tanımları üzerinden standartlarda ve/veya basılı yayınlarda listelenen termodinamik özellikleri kullanılarak hesaplanmaktadır. Ancak, teorik hesaplamalar ile belirlenen ısı yayınlık değerleri, her zaman gerçek durumu da yansıtmamaktadır. Kısaca, bir duvarın ısı yayınlık değerini henüz doğrudan ölçülebilen bir yöntem bulunmamaktadır. Literatürdeki çalışmalar, cisimlerden yayılan infrared ısınımına hassas olan kızılötesi ısı görüntüleme (InfRared termografi - IRT) yönteminin, malzemelerin ısı yayınlık değerini ölçmek konusunda yararlı olabileceğini göstermektedir.

$$\alpha = \frac{\lambda}{\rho \cdot c} \quad (1)$$

Yapı denetimi, sorun tespiti ve takibinde kızılötesi ısı görüntüleme yaygın kullanılmaktadır [5-8]. Örneğin, nem, ısı köprüsü ve malzeme bozulmaları gibi sorunların tespitinde kızılötesi ısı görüntülemenin oldukça başarılı bir tarama yöntemi olduğu kabul edilmiştir [9-12]. Bu yöntem ile gözün görmediği ancak ısıya karşı duyarlı termal kameralarda görünür olan anomaliler tespit edilmekte, elde edilen yüzey sıcaklık verileri, nitel ve nicel analiz yöntemleri ile değerlendirilmektedir. Duvarlarda çatlak, malzeme kaybı ve kabarma, kalkma gibi ayrılma bölgelerinin tespitinde, yapı malzemelerin ısınma ve soğuma hızları gibi ısı eylemsizlik özelliklerinin esas alındığı nicel analizler yapılmaktadır [6, 13]. Son dönem çalışmaları, IRT ile yapı duvarlarının ısı geçirgenlik değerinin (U-değeri, W/m²K) belirlenmesine yönelik [14-17] ve ısı köprülerinin sıcaklık indeksi (TI, birimsiz) gibi ölçülebilir parametreler ile tayinine yönelik [18, 19] pratik ölçüm ve hesaplamaların geliştirilmesini konu eden araştırmaları ele almaktadır. Isı geçirimsizlik özelliklerinden biri olan ısı yayınlık değerinin IRT yöntemlerinden faydalanılarak ölçülebilmesi meselesi, literatürde süregelen zorlu bir araştırma konusu olmuştur [20].

IRT ile ısı yayınlık analizleri kapsamında pratik ölçüm tekniklerinin geliştirilmesi için konunun teorisi üzerine çok çalışılmış ve birçok deneysel ön çalışma yapılmıştır. W.J. Parker [21] vd. tarafından bir malzemenin ısı yayınlık değerinin ölçülebilen bir yöntem geliştirilmiştir. Flaş yöntemi (Flash method) diye adlandırılan bu yöntem, 1992 yılında ASTM tarafından standart bir ölçüm tekniği olarak kabul edilmiştir [22]. Bu yöntem ile bir tarafından ısıtılan malzeme örneğinin diğer tarafındaki yüzey sıcaklık değişimi hassas ve sık aralıklı veri toplayabilen çeşitli ısıölçerler ile ölçülmekte, elde edilen yüzey sıcaklık verileri grafiğe dökülmekte (Şekil 1) ve Eş. 2'den yararlanılarak malzemenin ısı yayınlık değeri belirlenmektedir [21-24]. Bu ölçüm tekniğinde ısı üreten elektrikli aydınlatma elemanları veya kısa süreli ama kuvvetli enerji üretebilecek herhangi bir cihaz, ısı kaynağı olarak kullanılmaktadır. Örneğin, lazer ışınımı, flaş lambalar veya kısa süreli kuvvetli ısı yayabilecek lambalar deney düzeneklerinde ısı kaynağı olarak kullanılabilir [25].

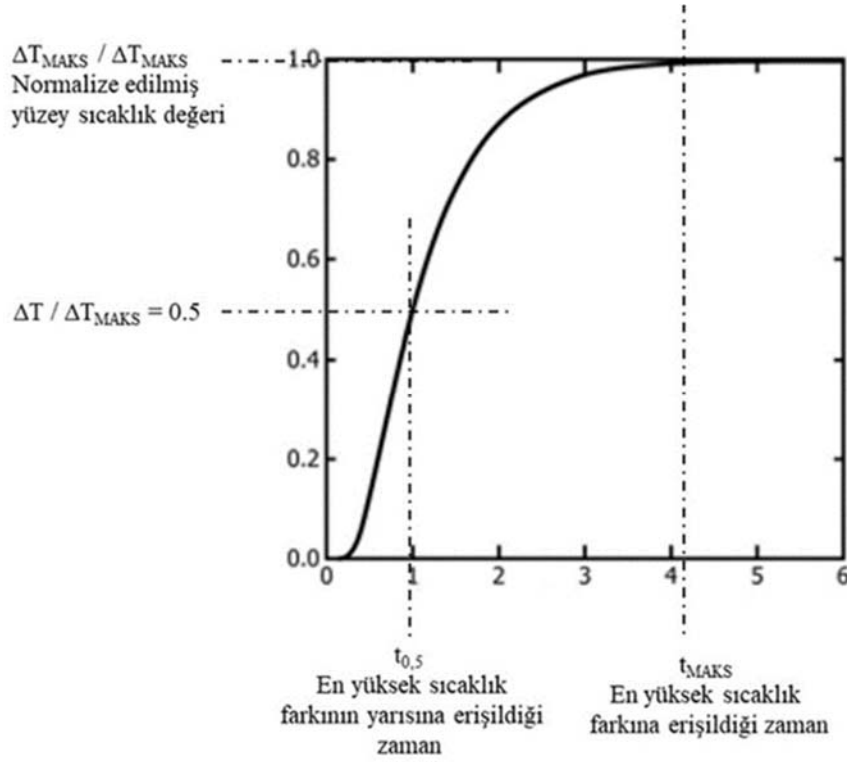
$$\alpha = 0,1388 \frac{L^2}{t_{0,5}} \quad (2)$$

Burada, L malzemenin kalınlığını (m) ve $t_{0,5}$ ise en yüksek sıcaklık farkının yarısına erişildiği zamanı (s) ifade etmektedir.

Lazer ısı kaynağının kullanıldığı “Lazer flaş yöntemi”, malzemelerin ısı yayınlığının belirlenmesinde kullanılan standartlaşmış en yaygın ölçüm tekniğidir [26-29]. 2000’li yılların başında bu düzeneğe infrared kameralar eklenmiştir [20, 30, 31]. Yüzey sıcaklığındaki değişimi diğer ısıölçerlere kıyasla daha anlık ve hassas ölçülebilen bu cihazlar ile ölçüm düzeneği daha pratik ve güvenilir hale gelmiştir [20, 31-33]. Bazı standartlar, bu yöntemin, özellikle homojen, yoğun (birim hacim ağırlığı yüksek), ısı yayınlığı 10^{-3} - 10^{-7} m²/s aralığında ve ince kalınlıklarda (en uygun boyut olduğu söylenen 1-6 mm kalınlık ve 10-12.5mm çap aralığında) hazırlanmış malzeme örnekleri için standart bir ısı yayınlık ölçme tekniği olarak kullanılabilirliğini belirtmektedir [21, 22, 25]. Ancak bu yöntemin daha farklı kalınlıklarda ve heterojen malzemeler için de kullanılabilirliğinden ve bunun için yöntemin geliştirilmesi gerektiğinden bahsedilen birçok yayın da bulunmaktadır [23, 27, 32-36]. Şu an için lazer flaş yöntemi ile ısı yayınlık standart ölçümleri, ancak iklim koşullarının kontrol edilebildiği ve hassas aletlerin kullanıldığı laboratuvar ortamlarında, küçük boyutlu ve ince numuneler üzerinde yapılabilmektedir.

Yapı duvarları gibi kalın ve büyük boyutlu yapı elemanlarının ısı geçirgenlik değeri (U-değeri, W/m²K) ve ısı iletkenlik hesap değerini (λ , W/mK) belirlemek için tek boyutlu ısı transferi teorisinden faydalandığı kalibreli ve mahfazalı olmak üzere iki farklı standart sıcak kutu (hot box) ölçüm düzeneği kullanılmaktadır [37]. Sıcak ve soğuk olmak üzere yalıtımlı iki farklı kabinde oluşan “sıcak kutu” deney düzeneğinde, duvar numunesi, sıcaklık farkı olan bu iki ayrı ortam arasına yerleştirilmekte; bu duvarın sıcak ve soğuk yüzey ve ortam sıcaklıkları kaydedilerek tek boyutlu ısı akışının otomatik takibi yapılmakta ve duvarın ısı geçirgenlik değeri temel ısı transferi formüllerinin sayısal çözümlenmesi ile hesaplanmaktadır [37]. Duvar numunelerinin ısı yayınlık değerlerini ölçülebilmek için sıcak kutu standart deney düzeneğindeki sıcak kabininin ısı kaynağı olarak kullanılması mümkündür.

Bu çalışma, ana hedefi mevcut yapı duvarlarının ısı yayınlık değerini sadece yüzey sıcaklık verileriyle yapının bulunduğu yerde tahribatsız olarak belirleyebilen standart bir ölçüm düzeneği geliştirmek olan araştırma konusunun öncü aşamasıdır. Bu ana hedef doğrultusunda bir dizi ön çalışma yapılmıştır. Bu ön çalışmalar kapsamındaki önemli araştırma sorularından biri şudur: Tek boyutlu ısı transferi prensibinden ve ısı görüntüleme yönteminden



Şekil 1. Bir tarafından ısıtılan örneğin diğer tarafta zamana göre değişen yüzey sıcaklığındaki artışı gösteren grafik [21, 22]
(The graph showing the increase in the sample's surface temperature o versus time, when it is heated from the other side)

yararlanarak heterojen ya da çok katmanlı olan dış duvarların ısı yalıtım değeri ölçülmesinde işe yarar pratik bir yöntem geliştirilebilir mi? Önceki paragraflarda, ısı yalıtım belirlenmesinde kullanılan ölçüm tekniklerinin ilerleyen yönlerini ortaya çıkarmak amacıyla özetlenen literatür değerlendirmesi, kızıl ötesi ısı görüntülemenin bu sahada etkin kullanılabileceğinin mümkün olduğunu göstermektedir.

Bu araştırma kapsamında, bir yapı duvarının ısı yalıtım değerini laboratuvar ortamında doğrudan ölçülebilen, kızıl ötesi ısı görüntüleme (InfRared termografi - IRT) ve mahfazalı sıcak kutu (Guarded Hot Box - GHB) deney düzeneklerinin bir arada kullanıldığı yeni bir standart laboratuvar düzeneği (IRT-GHB) geliştirilmiştir. Bu düzeneğe ile pomza agregadan üretilmiş hafif beton blok ile örülen bir örnek duvarın ısı yalıtım değeri ölçümleri yapılmış; bu düzeneğin ölçüm prensibi ve işe yararlığı elde edilen veriler ve referans veriler bir arada değerlendirilerek tartışılmıştır.

2. Malzeme ve Yöntem (Material and Method)

Bu çalışmada literatürden edinilen birikim ile yeni bir deney düzeneği oluşturulmuştur. Yeni düzeneğe ile pomza agregalı hafif beton bloklardan üretilmiş bir örnek duvarın ısı yalıtım değeri (α_{IRT} , m^2/s) ölçülmüştür. Aynı örnek duvarın ısı özellikleri, standart ölçüm teknikleri ile belirlenmiş ve bu verilerden hesaplanan ısı yalıtım değeri referans veri (α_{REF} , m^2/s) olarak kabul edilmiştir. Yeni düzeneğin güvenilir veri üretip üretmediği, α_{IRT} değeri ile α_{REF} değeri kıyaslanarak teyit edilmiştir. Bir yapı malzemesi ya da duvarının ısı yalıtım değeri, halihazırda, standartlarda, basılı kaynaklarda ya da üretici firmanın teknik dokümanlarında verilmiş olan ısı özelliklerinin Eş. 1'e aktarılması ile hesaplanır. Elde edilen bu veri, teorik ısı yalıtım değeri ($\alpha_{TEORİK}$, m^2/s) olarak tanımlanır. Bu çalışmada, örnek duvarın $\alpha_{TEORİK}$ değeri de hesaplanmış ve deney sonuçlarından elde edilen

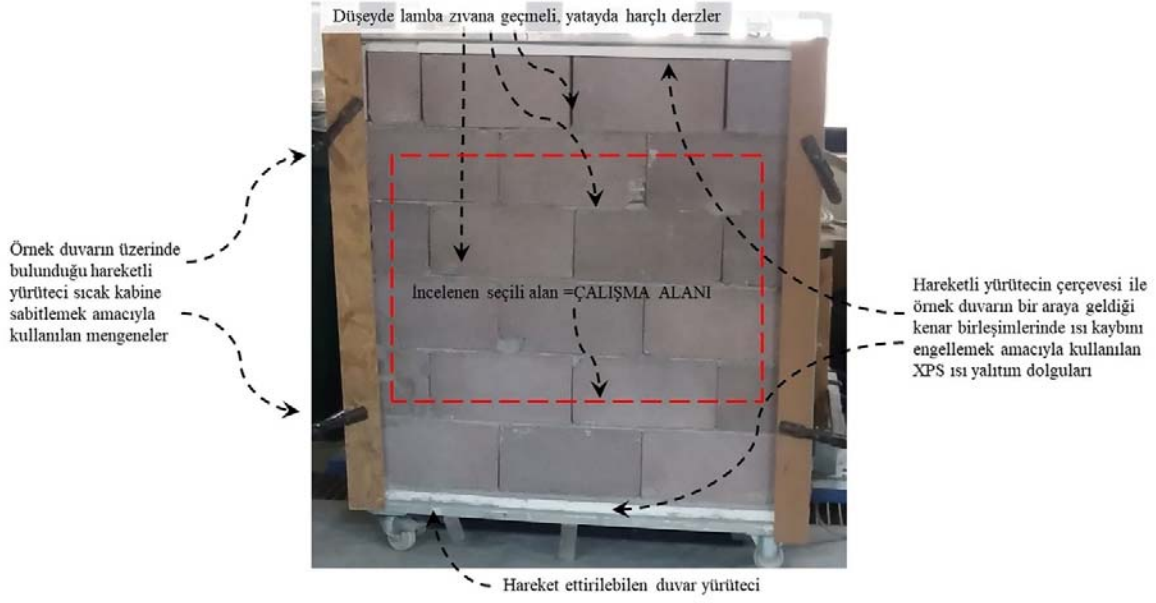
diğer ısı yalıtım verileri ile kıyaslanarak geçerliliği tartışılmıştır. Yeni düzeneğin sınıandığı örnek duvar, 39cm x 19cm x 18,5cm (uzunluk x genişlik x yükseklik) boyutlarında ve düşeyde lamba zıvana geçme ile birleşen pomza agregadan üretilen hafif beton (bims) bloklar ile hazırlanmış; yatay derzlerde 1/3 oranında kireç-çimento bağlayıcı harc kullanılmıştır. Hareketli duvar yürütücü üzerine hazırlanan duvar örneği 105cm x 19cm x 105cm (uzunluk x genişlik x yükseklik) boyutlarındadır ve yaklaşık 1m² alana sahiptir (Şekil 2). Örnek duvar örülürken kullanılan pomza agregadan üretilmiş hafif beton bloğun ve kireç-çimento bağlayıcı harcın, teorik ısı yalıtım değerlerinin hesaplanabilmesi için esas alınan temel fiziksel ve ısı özellikleri Tablo 1'de özetlenmiştir. Pomza agregalı hafif beton blok malzemenin teorik ısı yalıtım değeri $3,23 \times 10^{-7} m^2/s - 4,21 \times 10^{-7} m^2/s$ aralığında ve yatay derz harcının teorik ısı yalıtım değeri $5,56 \times 10^{-7} m^2/s - 6,61 \times 10^{-7} m^2/s$ aralığında bulunmuştur.

Hafif beton duvar örneğine ait ısı yalıtım değerinin teorik olarak hesaplanması, önerilen yeni düzeneğe ile elde edilen verinin doğruluğunu kontrol etmek amacıyla referans alınacak olan referans ısı yalıtım değerinin belirlenmesi ve önerilen yeni düzeneğe ile duvarın ısı yalıtım değerinin saptanması, ilgili alt başlıklar altında açıklanmıştır.

2.1. Örnek Duvarın Isı Yalıtım Değerinin Teorik Olarak Hesaplanması

(Theoretical Calculation of Sample Wall's Thermal Diffusivity Value)

Örnek duvarın teorik ısı yalıtım değeri ($\alpha_{TEORİK}$, m^2/s), bu duvarı oluşturan pomza agregalı hafif beton blok malzemenin ve harcın ilgili standart ve el kitaplarında tanımlanmış olan ısı iletkenlik hesap değeri ($\lambda_{TEORİK}$, W/mK), birim hacim ağırlığı ($\rho_{TEORİK}$, kg/m^3) ve özgül ısı ($c_{TEORİK}$, J/kgK) verileri Eş. 1'e yerleştirilerek belirlenmiştir (Tablo 1) [38, 40-43]. Eş. 1'e yerleştirilen veriler, seçili çalışma



Şekil 2. Pomza agregalı hafif beton bloklar ve kireç-çimento bağlayıcılı harç ile üretilen duvar örneği
(The wall sample produced by lightweight pumice concrete units and lime-cement based mortar)

Tablo 1. Duvar örneğinde kullanılan pomza agregadan üretilmiş hafif beton bloğun ve kireç-çimento bağlayıcılı harcın, standartlarda ve basılı kaynaklarda tanımlanmış olan temel fiziksel ve ısıl özellikleri
(Basic physical and thermal properties of pumice block and mortar used in the wall sample, as defined in the standards and published documents)

Malzeme ve Tanımı	Kalınlık	Birim hacim	Özgül ısı	Isıl iletkenlik	Su buharı	Isıl yayınlık
	d cm	$\rho_{\text{TEORİK}}$ kg/m ³	$C_{\text{TEORİK}}$ J/kgK	$\lambda_{\text{TEORİK}}$ W/mK	hesap değeri μ birimsiz	diffüzyonuna direnç katsayısı α m ² /s
Pomza agregadan üretilmiş hafif beton blok Düseyde lamba zıvana geçmeli, 38,5cm x 18,5cm x 19cm boyutlarında (uzunluk x genişlik x yükseklik) delikli blok	19	650 ^[38,40-44]	840 ^[40-43] - 1000 ^[39]	0,21 ^[44] -0,23 ^[38]	5 – 10 ^[38]	3,23x10 ⁻⁷ - 4,21x10 ⁻⁷
Harç (Kireç - Çimento harcı, K:Ç oranı 1:3)	19	1800 ^[38]	840 ^[40-43] - 1000 ^[39]	1,00 ^[38]	15 – 35 ^[38]	5,56x10 ⁻⁷ - 6,61x10 ⁻⁷

alanındaki blok ve harç yüzey alanları dikkate alınarak hesaplanmıştır. Kısaca, duvarın λ -TEORİK, ρ -TEORİK ve C -TEORİK verileri, blok ve harç malzemelere ait temel fiziksel ve ısıl özelliklerinin ağırlıklı ortalamasıdır. Örnek duvara ait α -TEORİK değerinin hesaplanmasında kullanılan temel fiziksel ve ısıl özellikler, Tablo 1'de özetlenmiştir.

2.2. Örnek Duvarın Referans Isıl Yayınlık Değerinin Tayini (Reference Thermal Diffusivity Value Assessment of the Sample Wall)

Pomza agregalı hafif beton blok ve harç ile örülen örnek duvarın birim hacim ağırlığı (ρ , kg/m³) ve özgül ısısı (c , J/kgK) standart laboratuvar deneyler ile belirlenmiş [45, 46]; duvarın ısıl geçirgenlik değeri (U -değeri, W/m²K) ve ısıl iletkenlik hesap değeri (λ , W/mK) standart sıcak kutu düzeneği ile ölçülmüştür [37]. Elde edilen veriler Eş. 1'e yerleştirilerek örnek duvarın referans ısıl yayınlık değeri (α_{REF}) belirlenmiştir. Kontrol verisi olarak kullanılacak olan bu α_{REF} değeri, duvarın mevcut test yöntemleri ile ölçülebilen gerçek ısıl yayınlık

değerini temsil etmektedir. Bu değer, önerilen yeni düzeneğin performansını değerlendirmek bakımından önemlidir.

2.3. Önerilen Yeni Düzenek ile Duvarın Isıl Yayınlık Değerinin Saptanması (Assessing Thermal Diffusivity Value of the Sample Wall by the proposed New Experimental Setup)

Bu çalışmada önerilen yeni düzenek, örnek olarak hazırlanmış bir duvar kesitinin ısıl yayınlık değerini, teorik hesaplamalarda kullanılan termofiziksel özelliklere (ρ , λ ve c) ihtiyaç duymadan, hızlı, kolay, pratik ve tahribatsız bir şekilde belirlemek amacıyla geliştirilmiştir. Bu amaçla, flaş (parlama) yöntemi ile ısıl yayınlığın ölçümü [25] ve mahfazalı sıcak kutu ile kararlı durum ısıl iletim özelliklerinin tayini [37] için standartlarda tanımlanmış olan iki deney yöntemi, laboratuvar ortamında bir araya getirilmiştir. Düzeneğin soğuk tarafındaki yüzey sıcaklık ölçümleri, ardışık ısıl görüntüleme tekniği ile kaydedilmiştir [11]. Metin içerisinde yeni deney düzeneği,

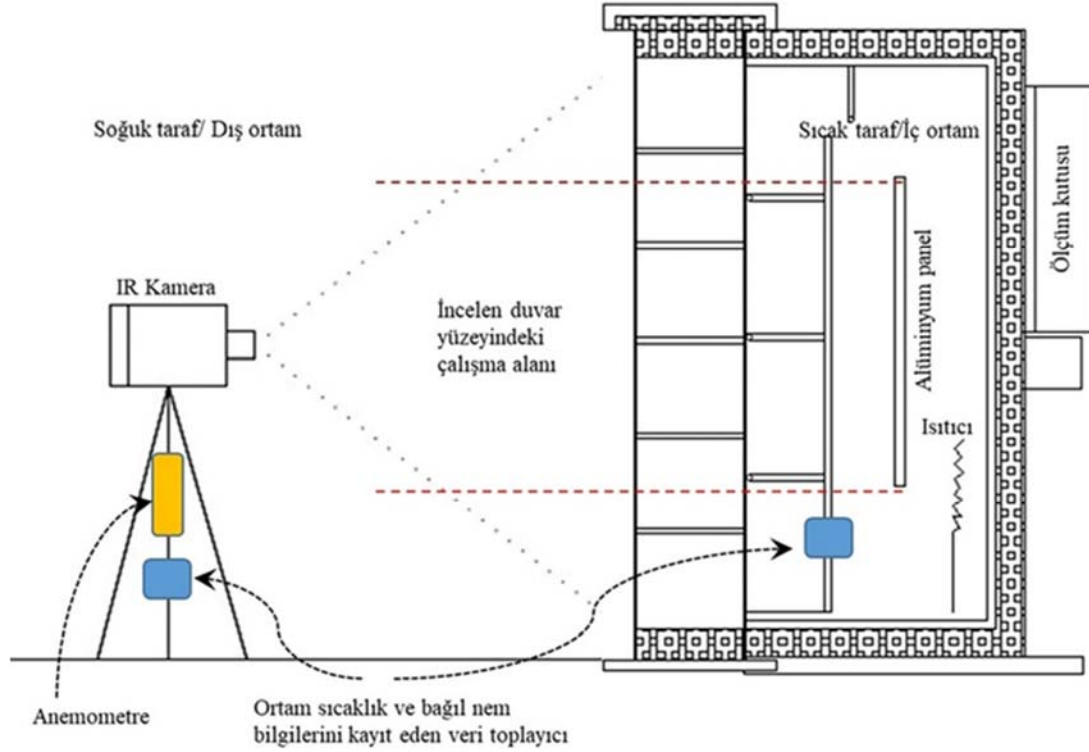
“IRT-GHB” kısa adıyla ifade edilmiştir. IRT-GHB deney düzeneğinin, örnek duvarın ısı iletim özelliklerini, özellikle ısı geçirgenlik (U-değeri, W/m^2K) ve ısı iletkenlik (λ , W/mK) değerlerini belirlemek üzere güvenilir veri üretebildiğini teyit etmek amacıyla TS EN ISO 8990 (2002) [37] standardında tarif edilen ölçüm yapılmıştır. Aynı standart ölçüm, Türk Akreditasyon Kurumundan (TÜRK-AK) onaylı olan Yapı Araştırma-Geliştirme laboratuvarının mahfazalı sıcak kutu/ısı kabini (hot box) kullanılarak tekrarlanmıştır. Akredite olan standart ölçüm düzeneği ile örnek duvarın U_{REF} değerinin $0,839 W/m^2K$ olduğu belirlenmiş; bu çalışma kapsamında geliştirilmiş olan IRT-GHB deney düzeneği ile örnek duvarın U değeri $0,848 W/m^2K$ olarak ölçülmüştür. Kısaca, referans alınan U_{REF} değeri ile yeni düzenek ile ölçülen U değeri birbirine denktir, IRT-GHB düzeneği ile bir duvarın ısı iletim özelliklerinin güvenilir veriler olarak ölçülebileceği teyit edilmiştir.

IRT-GHB deney düzeneğinin temel prensibi, iklim koşulları takip edilen sıcak ve soğuk iki farklı ortam oluşturmak ve bu ortamlar arasına yerleştirilen duvar kesitindeki ısı akışını takip edebilmektir (Şekil 3, Şekil 4). Mahfazalı sıcak kutu standart deney düzeneğindeki kabinlerden soğuk oda olarak kullanılan kabin düzenekten sökülüp, sıcak kabin ise yeni deney düzeneğinde ısı kaynağı olarak kullanılmıştır. Yeni düzenekte, örnek duvar arka yüzeyinden sıcak kabin ile çevrelenmiştir. Arka yüzeyinden ısıtılan duvar örneğinin ön tarafındaki (soğuk tarafındaki) yüzey sıcaklık değişimleri termal kamera ile kayıt altına alınmıştır.

Sıcak ve soğuk tarafın ortam sıcaklığı ve bağıl nemi HOBO LCD veri toplayıcılar ile kaydedilmiştir; soğuk tarafın ortam koşullarına ait veriler, KESTREL 4500NV anemometre ile kaydedilen verilerle teyit edilmiştir. Örnek duvarın sıcak tarafındaki yüzey sıcaklıkları HOBO LCD yüzey sıcaklık algılayıcılar ile ölçülmüş; yüzey sıcaklık verileri,

incelenen seçili alana denk düşen beton bloklardan ve yatay ve dikey derzlerinden toplanmıştır. Örnek duvarın soğuk tarafındaki yüzey sıcaklıkları, FLIR ThermoE45 termal kamera ile ölçülmüştür. İki dakika aralıklarla peş peşe ısı görüntüleri alınmıştır. Ardışık ısı görüntüleme ile elde edilen yüzey sıcaklık ve zaman verileri ile zaman içerisindeki yüzey sıcaklık değişimi analiz edilmiştir. ısı görüntülerden elde edilen yüzey sıcaklık verileri, seçili çalışma alanında her piksele denk düşen yüzey sıcaklık verisinin ortalamasıdır. Bu alan, sıcak tarafta ısıtıcının ürettiği ısıyı eşit dağıtan alüminyum panelin izdüşümüne denk gelen alandır (Şekil 3, Şekil 4). Örnek duvarın ısı yayımlılık değeri, zamana karşı yüzey sıcaklık değişimini gösteren bir grafik üretilerek analiz edilmiş, bu grafikten elde edilen “en yüksek sıcaklık farkının yarısına erişildiği zaman verisinin ($t_{0,5}$, s)” Eş. 2’ye aktarılması ile hesaplanmıştır. Bu analize ek olarak, ısınma başlamadan önce alınan ilk yüzey sıcaklıkları ile ısınma sürecindeki yüzey sıcaklıkları arasındaki sayısal farkı gösteren, diğer bir deyişle ısınma süresince yüzeyde oluşan sıcaklık değişimini gösteren “diferansiyel ısı görüntüleri (differential IR images)” üretilmiş, incelenen seçili alandaki yüzey sıcaklık dağılımı ve ısınma hızı verileri (R_w , $^{\circ}C/s^{1/2}$), ısı yayımlılık değerinin belirlenmesi için kullanılan grafik verileri ile birlikte değerlendirilmiştir.

Deney düzeneğinde kullanılan HOBO LCD veri toplayıcılar, $\pm 0,35^{\circ}C$ hassasiyetle $-20^{\circ}C$ - $+70^{\circ}C$ sıcaklık aralığında, $\pm 2,5\%$ hassasiyetle $5\%-95\%$ bağıl nem aralığında ölçüm yapabilmektedir. KESTREL 4500NV anemometre ile $\pm 1,0^{\circ}C$ hassasiyetle $-45^{\circ}C$ - $+125^{\circ}C$ sıcaklık aralığında $\pm 3\%$ hassasiyetle $0\%-100\%$ bağıl nem aralığında ölçüm yapılabilmektedir. FLIR ThermoE45 termal kamera $7,5-13 \mu m$ spektrum aralığında infrared ışınımına hassas, $0,07^{\circ}C$ ’den küçük termal duyarlılıkla $-20^{\circ}C$ - $+650^{\circ}C$ yüzey sıcaklık aralığında ısı görüntüleri kaydedebilmektedir.



Şekil 3. İklim koşulları kaydedilen sıcak ve soğuk iki farklı ortamın oluşturulduğu ve bu ortamlar arasına yerleştirilen duvar kesitindeki ısı akışının takip edildiği IRT-GHB deney düzeneği

(IRT-GHB experimental setup where two different ambients, hot and cold, whose climatic conditions are recorded, is established, and the heat flow through the wall cross-section positioned between these ambients)

3. Sonuçlar ve Tartışmalar (Results and Discussions)

Pomza agregalı hafif beton blok ve harç ile örülen örnek duvara ait hesaplamalar ve ölçümler sonrasında $\alpha_{\text{TEORİK}}$, α_{REF} ve α_{IRT} ısı yayınlık değerleri belirlenmiş, ilgili alt başlıklar altında elde edilen veriler bir arada değerlendirilmiş ve IRT-GHB deney düzeneğinin performansı tartışılmıştır.

3.1. Örnek Duvarın Teorik Hesaplanan ve Referans Alınan Isıl Yayınlık Değerleri (Theoretically-Calculated and Reference Thermal Diffusivity Values of the Sample Wall)

Örnek duvarın $\lambda_{\text{TEORİK}}$, $\rho_{\text{TEORİK}}$ ve $c_{\text{TEORİK}}$ verileri, duvar yapımında kullanılan pomza agregalı hafif beton blok ve harç malzemelere ait temel fiziksel ve ısıl özelliklerinin ağırlıklı ortalaması alınarak belirlenmiş; örnek duvarın teorik ısıl yayınlık değeri, bu veriler esas alınarak hesaplanmıştır. Örnek duvardaki pomza agregalı hafif beton blok malzemenin ve harç malzemenin yüzey alanları, sırasıyla, toplam duvar yüzey alanının %97,6'sı ve %2,4'ünü kapsamaktadır (Tablo 2).

Örnek duvarın ısıl yayınlık değeri hesabı için bu ağırlıklı kullanım dikkate alınmıştır. Hafif beton blok ve harçtan oluşan örnek duvarın teorik birim hacim ağırlığı ($\rho_{\text{TEORİK}}$) 677 kg/m³, teorik ısıl iletkenlik hesap değeri ($\lambda_{\text{TEORİK}}$) 0,23 W/mK – 0,25 W/mK aralığında ve teorik özgül ısı değeri ($c_{\text{TEORİK}}$) 840 J/kgK – 1000 J/kgK aralığında olduğu hesaplanmıştır (Tablo 2). Literatür verilerinden elde edilen bu ağırlıklı ortalamalar ile örnek duvar için hesaplanan teorik ısıl yayınlık değeri ($\alpha_{\text{TEORİK}}$) $3,38 \times 10^{-7}$ m²/s – $4,36 \times 10^{-7}$ m²/s aralığındadır ve $3,87 \times 10^{-7} \pm 0,69 \times 10^{-7}$ m²/s ortalama değerine sahiptir (Tablo 2).

IRT-GHB düzeneği ile ölçülen ısıl yayınlık değerini kıyaslamak ve yeni düzeneği kullanarak güvenilir veriler elde edilebildiğini doğrulamak amacıyla örnek duvarın referans ısıl yayınlık değeri belirlenmiştir. Pomza agregalı hafif beton blok ve harç ile örülmüş 19cm kalınlığındaki örnek duvarın RILEM (1980) [45] ve TS 4048 (2013) [46] standartlarına göre ölçülen referans birim hacim ağırlığı (ρ_{REF}) 700 kg/m³, özgül ısı (c_{REF}) 798 J/kgK'dir (Tablo 2). Örnek duvarın TS EN ISO 8990 (2002) [37] standardına göre mahfazalı sıcak kutu yöntemi ölçülen ısıl geçirgenlik değeri (U değeri), 0,834 W/m²K, ısıl direnç değeri (R değeri) 1,029 m²K/W ve ısıl iletkenlik



Şekil 4. IRT-GHB deney düzeneğinin laboratuvar ortamındaki farklı açılardan görüntüsünü gösteren fotoğrafları
(Photographs showing images of the IRT-GHB experimental setup from different perspectives in the laboratory environment)

Tablo 2. Pomza agregalı hafif beton blok ve çimento-kireç harcı ile örülmüş 19cm kalınlığındaki örnek duvarın $\alpha_{\text{TEORİK}}$, α_{REF} , ve α_{IRT} ısıl yayınlık değerleri, fiziksel ve ısıl özellikleri
(The $\alpha_{\text{TEORİK}}$, α_{REF} , ve α_{IRT} thermal diffusivity values, physical and thermal properties of the 19cm-thick sample wall made of lightweight concrete units with pumice aggregate and cement-lime mortar)

Pomza agregalı hafif beton blok ile örülmüş örnek duvar 94cm x 97,6cm x 19cm (Uzunluk x Genişlik x Yükseklik)								
Fiziksel Özellikler				Isıl Özellikler				
Ağırlık	Alan	Hacim	Blok Alan	Harç Alan	Birim hacim kütle	Özgül ısı	Isıl iletkenlik	Isıl yayınlık
kg	m ²	m ³	%	%	ρ	c	λ	α
122,80	0,917	0,174	97,6	2,4	kg/m ³	J/kg °C	W/mK	m ² /s
Teorik hesaplar					677	840- 1000	0,23- 0,25	$3,38 \times 10^{-7}$ - $4,36 \times 10^{-7}$
Laboratuvar ölçümleri (Referans alınan veriler)					700	798	0,19	$3,40 \times 10^{-7}$
IRT-GHB düzeneği ölçümleri					-	-	-	$3,38 \times 10^{-7}$

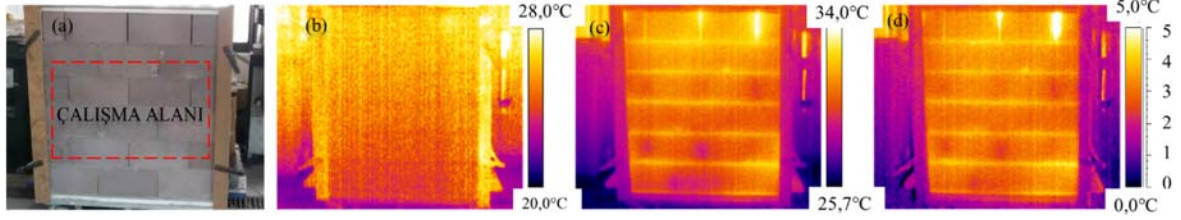
hesap değeri (λ) 0,185 W/mK'dir (Tablo 2). Örnek duvarın, doğrudan ölçülerek belirlenmiş olan ısıl özellik verileri ile hesaplanan referans ısı yayınlık değeri (α_{REF}) $3,4014 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ 'dir (Tablo 2). Referans alınan ısıl yayınlık değeri verilerine (α_{REF}) kıyasla $\alpha_{TEORİK}$ verileri %0,6 - %22 aralığında farklı bulunmuştur. Kısaca, teorik olarak hesaplanan ısıl yayınlık verileri, malzemenin gerçek ısıl yayınlık özelliğini gösteren referans verilerine kıyasla ortalama %14 kadar daha yüksek hesaplanabilmektedir.

3.2. Örnek Duvarın IRT-GHB Deney Düzenegi ile Ölçülen Isıl Yayınlık Değeri (Thermal Diffusivity Value of the Sample Wall Measured with the IRT-GHB Experimental Setup)

Arkasından ısınmakta olan örnek duvarın ön tarafındaki yüzey sıcaklığındaki artış ardışık ısıl görüntüleme ile kaydedilmiş; ısınma başlamadan önce örnek duvarın soğuk taraf yüzeyinden alınan ilk yüzey sıcaklıkları ile ısınma sürecindeki yüzey sıcaklıkları arasındaki sayısal farkı gösteren, diğer bir deyişle ısınma süresince yüzeyde oluşan sıcaklık değişimini gösteren "diferansiyel ısıl görüntüler

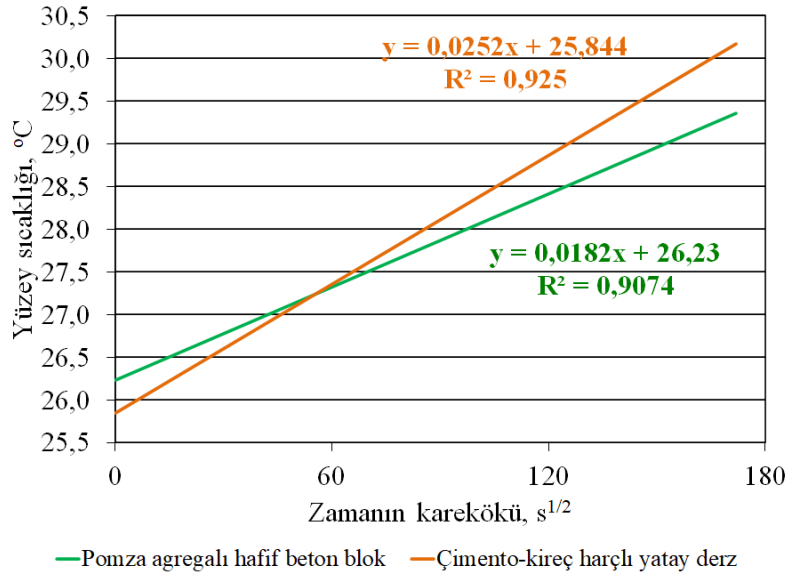
(differential IR images)" üretilmiştir (Şekil 5). Seçili çalışma alanındaki sıcaklık dağılımı, pomza agregalı hafif beton blok kesitinde ısı geçirimsizliğinin daha az, çimento-kireç bağlayıcılı yatay harç kesitinde ise daha fazla olduğunu göstermektedir. Kısaca, ısı kaybı derzlerde daha fazladır. Duvar arka tarafından ısıtılırken, yatay derzlerin soğuk tarafındaki yüzey sıcaklıkları, hafif beton blokların yüzey sıcaklıklarından 1,3 katı kadar daha hızlı ısınmış, yatay derzler ile hafif beton bloklar arasındaki yüzey sıcaklık farkı, kararlı durumda yaklaşık 0,8°C kadar daha yüksek olduğu tespit edilmiştir (Şekil 5 ve Şekil 6). Diferansiyel ısıl görüntülerde tespit edilen bu farklı ısıl performans, hafif betonun harca kıyasla daha yavaş ısıl yayınlık özelliğine sahip olduğunu gösteren teorik ısıl yayınlık değerleri (Tablo 1 ve Şekil 6) ile de uyumluluk göstermektedir.

Seçili çalışma alanının ardışık ısıl görüntüleme ile için elde edilen yüzey sıcaklık verileri, zamana karşı yüzey sıcaklık değişimini gösteren bir grafik üretilerek analiz edilmiştir (Şekil 7). Bu grafik ile, ısınma süreci sonrasında seçili çalışma alanında en yüksek yüzey sıcaklığına erişinceye kadar geçen süre (t_{MAKS}) 30959 s'dir. Bu süre



Şekil 5. (a) Pomza agregalı hafif beton bloktan üretilen örnek duvarın soğuk taraftaki görünüşü, (b) Aynı duvar yüzeyinin, ısıtılma başlamadan önce çekilen ilk IR görüntüsü, (c) 30959 saniye sürecince arka tarafından ısıtılan duvarın soğuk tarafından alınan son IR görüntüsü (kararlı durumdaki sıcak taraf ortam sıcaklığı 45,7°C ile bağıl nemi %25,3'dir, soğuk taraf ortam sıcaklığı 27,1°C ile bağıl nemi %44,4'dür), (d) ısınma sürecinde alınan son IR görüntüsü ile ısınma başlamadan önce alınan ilk IR görüntüleri arasındaki yüzey sıcaklıklarındaki sayısal farkı gösteren diferansiyel ısıl görüntüsü

(a) The cold side view of the sample wall made of lightweight concrete block with pumice aggregate, (b) The first IR image of the same wall surface before the heating period starts, (c) The last IR image of the wall's cold side, corresponding to the moment that its rear side is heated for a period of 30959 seconds (at steady state, the hot box has an ambient temperature of 45.7°C, and relative humidity of 25.3%, the cold side has an ambient temperature of 27.1°C and relative humidity of 44.4%), (d) the differential IR image showing the numerical difference in surface temperatures between the last IR image taken at the end of the heating period and the first IR image taken before the heating process starts.)



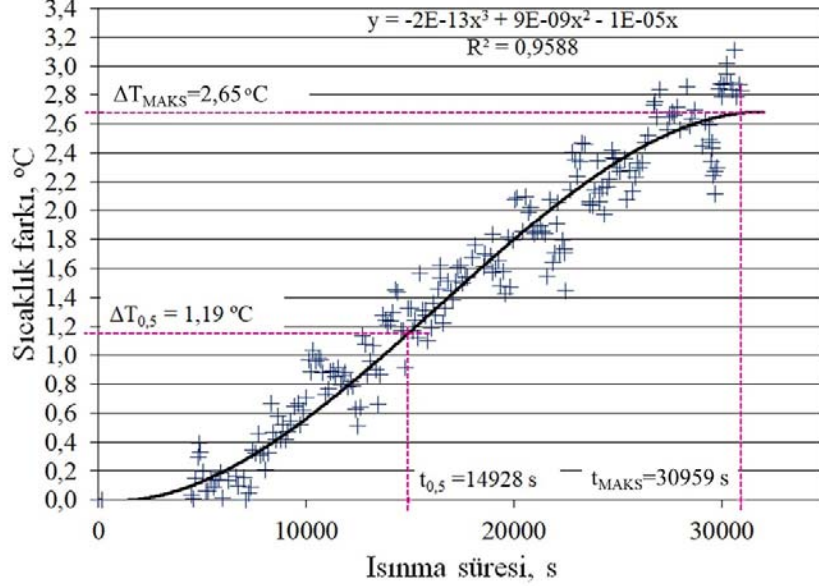
Şekil 6. Seçili çalışma alanında, pomza agregalı hafif beton blok ve çimento-kireç harçlı yatay derzlerdeki zamanın kareköküne karşı yüzey sıcaklıklarındaki artışı gösteren grafikler
(Graph showing the increase in surface temperatures versus the square root of time on lightweight concrete block with pumice aggregate and cement-lime-horizontal joint surfaces in the selected target area)

içinde seçili çalışma alanının yüzey sıcaklığındaki artış (ΔT_{MAKS} , erişilen en yüksek yüzey sıcaklığı ile ısınma öncesi ölçülen ilk yüzey sıcaklığı arasındaki fark) $2,65^{\circ}\text{C}$ 'dir. En yüksek sıcaklık farkının yarısına ulaşıldığı süre ($t_{0,5}$) 14928 s'dir. Şekil 7'den elde edilen $t_{0,5}$ verisinin Denklem 2'ye aktarılması ile pomza agregalı hafif beton blok duvarın ısı yayınımlı değeri (α_{IRT}) $3,3813 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ olduğu belirlenmiştir (Tablo 2).

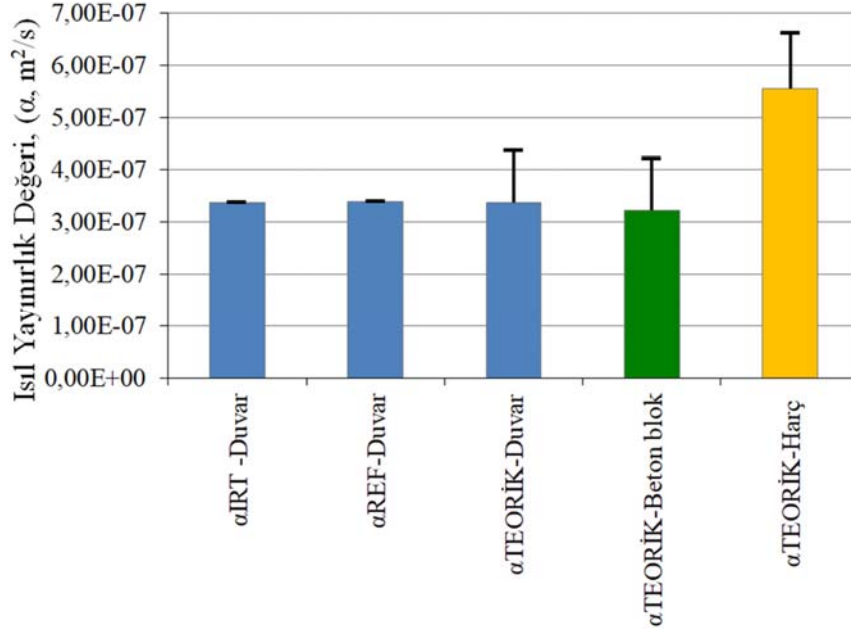
3.3. Önerilen IRT-GHB Deney Düzeninin Performans Değerlendirmesi

(Performance Evaluation of the Proposed IRT-GHB Experimental Setup)

Pomza agregalı hafif beton blok ve kireç-çimento bağlayıcılı harç ile üretilen örnek duvarın α_{REF} , α_{IRT} ve $\alpha_{\text{TEORİK}}$ ısı yayınımlı değerleri Şekil 8'de özetlenmiştir. Örnek duvarın üç farklı yöntem ile belirlenen ısı yayınımlı verileri, pomza agregalı hafif beton blok ve kireç-



Şekil 7. Pomza agregalı hafif beton bloktan üretilen örnek duvarda, seçili çalışma alanının zamana karşı soğuk tarafındaki yüzey sıcaklık değişimini gösteren grafik (Graph showing the surface temperature change on the cold side of the selected target area versus time on the sample wall made of lightweight concrete block with pumice aggregate)



Şekil 8. Örnek duvarın α_{REF} , α_{IRT} ve $\alpha_{\text{TEORİK}}$ ısı yayınımlı değerlerini, pomza agregalı hafif beton blok ve kireç-çimento bağlayıcılı harçın teorik ısı yayınımlı değerleri ile birlikte gösteren grafik (Graph showing the α_{REF} , α_{IRT} ve $\alpha_{\text{TEORİK}}$ thermal diffusivity values of the sample wall together with the theoretically-calculated thermal diffusivity values of lightweight concrete block with pumice aggregate, and lime cement mortar)

çimento bağlayıcı harcın teorik ısı yayınlık değerleri ile birlikte değerlendirilmiştir.

Örnek duvarın IRT-GHB düzeneği ile ölçülen ısı yayınlık değeri ($\alpha_{IRT} = 3,38 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$), aynı örnek duvarın standart laboratuvar testleriyle ölçülerek gerçek ısı yayınlık değerini temsil eden referans ısı yayınlık değeri ($\alpha_{REF} = 3,40 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$) ile benzerdir. Bu veriler, önerilen yeni düzeneğin güvenilir ve ümit vadeci bir ölçüm yöntemi olduğunun göstergesidir (Tablo 2, Şekil 8).

Örnek duvarın, teorik bu duvarı oluşturan pomza agregalı hafif beton blok malzemenin ve harcın ilgili standartlarda ve/veya el kitaplarında yer alan listelerde tanımlanmış temel fiziksel ve ısı özellikleri kullanılarak hesaplanan ısı yayınlık değerinin ($\alpha_{TEORİK} = 3,38 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s} - 4,36 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$) geniş bir aralıkta olması, dikkat çekicidir. Buna sebep olan etken, yayınlanmış listelerde aynı kategoride yer alan yapı malzemesinin farklı ısı hesap değerleri ile tanımlanmasıdır. Örneğin, pomza agregalı hafif beton blok tanımına denk düşen ürünler için farklı basılı kaynaklarda farklı ısı iletkenlik hesap değeri (λ -TEORİK, W/mK) ve farklı özgül ısı (c -TEORİK, J/kgK) verileri yer almaktadır (Tablo 1). Bu durum, yapı malzemelerinin ısı özelliklerini listeleyen basılı kaynaklardan yararlanarak yapılan teorik hesaplar ile elde edilecek verilerin yanıltıcı olabileceğinin göstergesidir. Kısaca, duvarın ya da duvarı oluşturan yapı malzemelerinin gerçek ısı performanslarını belirlemek ya da teyit edebilmek için laboratuvar testlerinden elde edilen verilere ihtiyaç vardır.

Duvarın ve duvarı oluşturan yapı malzemelerinin ısı yayınlık özelliklerinin tayini için gerekli olan birim hacim kütle, özgül ısı ve özellikle de ısı iletkenlik hesap değerlerinin ölçümü için çok pahalı ölçüm teknikleri kullanılmaktadır. Ayrıca tüm bu ısı özelliklerin deneyler ile belirlenebilmesi için belirli boyutlarda numunelerin hazırlanması ve bu numunelerin tek tek ısı özelliklerinin ölçülmesi gerekmektedir. Tüm bu aşamalar ciddi vakit kaybına sebep olmakta, maddi açıdan da ciddi bir yük oluşturmaktadır. Bu araştırma ile, bir yapı duvarının gerçek ısı performansını temsil eden ısı yayınlık değerinin, bu duvarı oluşturan yapı malzemelerine ait ısı özelliklerin tek tek belirlenmesine gerek kalmadan doğrudan ölçülebileceği anlaşılmış; IRT-GHB deney düzeneğinin, bir duvarın ısı yayınlık performansının tespitinde ümit vadeci bir standart ölçüm yöntemi olabileceği ortaya konmuştur.

4. Sonuçlar (Conclusions)

Bir yapı duvarının ısı yayınlık değeri, mevcut durumda, yapı duvarını oluşturan malzemelerinin birim hacim kütle (ρ , kg/m³), özgül ısı (c , J/kgK) ve ısı iletkenlik hesap değeri (λ , W/mK) gibi temel ısı özellikleri belirlendikten sonra, teorik olarak hesaplanabilmektedir. Bir yapı malzemesinin özellikle ısı iletkenlik hesap değerinin belirlenebilmesi, gelişmiş laboratuvar olanaklarına erişim zorluğu nedeniyle, dolayısıyla maddi açıdan da zorlayıcı şartları beraberinde getirmektedir. Bu sebeple, incelenen duvarın ısı yayınlık değeri, duvarı oluşturan her bir yapı malzemesinin standartlarda ve/veya basılı yayınlarda listelenen ısı özelliklerini kullanılarak dolaylı yoldan hesaplanmaktadır. Kısaca, ısı yayınlık tayininde, her bir malzemenin tek tek ısı özelliklerinin laboratuvar koşullarında standart ölçümü yerine her bir malzemenin genel tanımı üzerinden hazırlanmış listelerde yer alan ısı özelliklerinin kullanımı tercih edilmektedir. Yapılan bu çalışma, teorik olarak bu şekilde hesaplanan ısı yayınlık değerlerinin yanıltıcı olabileceğini göstermiş, bir yapı duvarın ısı yayınlık değerini laboratuvar ortamında doğrudan ölçülebilen pratik ve standart bir ölçüm yönteminin geliştirilmesini hedeflenmiştir.

Bu araştırma kapsamında, kızıl ötesi ısı görüntüleme (InfRared termografi - IRT) ve mahfazalı sıcak kutu (Guarded Hot Box - GHB)

deney düzeneklerinin bir arada kullanıldığı yeni bir standart laboratuvar düzeneği (IRT-GHB) geliştirilmiştir. Bu yeni düzenek ile pomza agregalı hafif beton bloklar ve harç ile örülen örnek duvarın ısı yayınlık değeri (α_{IRT}) ölçülmüş; IRT-GHB ölçüm yöntemi ile elde edilen veriler, laboratuvar deneyleri ile tayin edilen referans ısı yayınlık değerleri (α_{REF}) ile karşılaştırılmıştır.

Sonuçlar, IRT-GHB deney düzeneğinin duvarın ısı yayınlık değerini doğrudan ölçebildiğini göstermiştir. Bu araştırma ile, yapı duvarını oluşturan malzemelerin ρ , c ve λ değerleri gibi temel ısı özelliklerini önceden ölçmeye gerek kalmadan, sadece yüzey sıcaklık verilerinden yararlanarak ısı yayınlık ölçümü yapılabilen bir düzenek geliştirilmiştir. Bu düzenek, mevcut ölçüm tekniklerine kıyasla zaman kazandıran ve ölçümler için mali yükü azaltan, bilimsel ve pratik bir analiz yönteminin temelini oluşturmaktadır. Bu araştırma, birden fazla malzemeden oluşan veya çok katmanlı bir dolu duvarın (duvar katmanları arasında herhangi bir havalandırma ya da havalandırmasız boşluk katmanının yer almadığı duvar kesitlerinin) ısı yayınlık değerlerini ölçmeyi mümkün kılan IRT-GHB düzeneğinin geliştirilmesi, standart bir deney düzeneği olarak ilgili sahalarda kabul görmesi için yapılacak ileri çalışmalara yol gösterici niteliktedir.

IRT-GHB deney düzeneğinin geliştirilmesi ve yaygın kullanımının sağlanması amacıyla araştırmalara devam edilmelidir. Bu kapsamda, arazi ortamına bu düzeneğin uyarlanması amacıyla çalışmalara başlanmış; standart, pratik ve tahribatsız bir analiz yöntemi olarak yapılarda yaygın kullanımı için hazırlanan bir prototipin Türk Patent ve Marka Kurumu (TURKPATENT)'na 2020/14020 patent başvuru numarası ile başvurusu yapılmıştır. Başvurusu yapılan patent TURKPATENT tarafından ulusal patent olarak 23.10.2023 tarihinde tescillenmiştir.

Teşekkür (Acknowledgement)

Bu çalışma, Gazi Üniversitesi BAP 07/2018-21 kodlu "Yapı duvarlarının ısı yayınlık (termal difüzyon) değerinin belirlenmesi için kızılötesi ısı görüntülemenin kullanıldığı standart ölçüm yöntemlerinin geliştirilmesi" başlıklı proje ile desteklenmiştir.

Kaynaklar (References)

1. Carslaw, H. S., Jaeger, J. C., Conduction of Heat in Solids, 2nd edition, Oxford University Press, London, 1959.
2. Bird, B. R., Stewart, W. E., Lightfoot, E. N., Transport Phenomena Second Edition, John Wiley and Sons, A.B.D., 2002.
3. Çengel, Y., Isı ve kütle transferi pratik bir yaklaşım (3. Baskı), Güven Kitabevi, İzmir, 1-70, 2011.
4. Poirier, D.R., Geiger, G.H., Transport Phenomena in Materials Processing, The Minerals, Metals & Materials Society, Springer International Publishers, Switzerland, 2016.
5. Masri, E. Y., Rakha, T., A scoping review of non-destructive testing (NDT) techniques in building performance diagnostic inspections, Construction and Building Materials, 265 (2020), 120542, 2020.
6. Tavukçuoğlu, A., Non-destructive testing for building diagnostics and monitoring: experience achieved with case studies, MATEC Web of Conferences 149, 01015, 2018.
7. Balaras, C. A., Argiriou, A. A., Infrared thermography for building diagnostics. Energy and Buildings, 34, 171-183. 2002.
8. Kyliki, A., Fokaidis, A.P., Christou, P., Kalogirou, A.S., Infrared thermography (IRT) applications for building diagnostics: A review, Applied Energy, 134 (2014) 531-549, 2014.
9. Titman, D. J., Applications of thermography in non-destructive testing of structures, NDT & E International, 34, 149-154, 2001.
10. Grinzato, E., Vavilov, V., Kauppinen, T., Quantitative infrared thermography in buildings, Energy and Building, 29, 1-9, 1998.
11. Tavukçuoğlu, A., Caner-Saltuk E. N., Quantitative infrared thermography and ultrasonic testing for in-situ assessment of Nemrut Dag stone statues, Cultural Heritage, 2014.

12. Tavukçuoğlu, A., Çiçek, Pınar., Grinzato, E., Thermal analysis of an historical Turkish bath by quantitative IR thermography, *Quantitative InfraRed Thermography Journal*, 5 (2), 151-173, 2008.
13. Tavukçuoğlu, A., Akevren, S., Grinzato, E., In-situ examination of structural cracks at historic masonry structures by quantitative infrared thermography and ultrasonic testing, *Journal of Modern Optics*, 57(18), 1779-1789, 2010.
14. Danielski, I., Froling, M., Diagnosis of buildings thermal performance-a quantitative method using thermography under non-steady state heat flow. *Energy Procedia*, 83, 2015.
15. François, A., Ibos, L., Feuillet, V., Meulemans, J., In situ measurement method for the quantification of the thermal transmittance of a non-homogeneous wall or a thermal bridge using an inverse technique and active infrared thermography, *Energy & Buildings*, 233, 2021.
16. Albatici, R., Tonelli, A. M., Chiogna, M., A., Comprehensive experimental approach for the validation of quantitative infrared thermography in the evaluation of building thermal transmittance, *Applied Energy*, 141, 218-228, 2015.
17. Fokaides, P.A., Kalogirou, S.A., Application of infrared thermography for the determination of the overall heat transfer coefficient (U-Value) in building envelopes, *Applied Energy*, 88, 4358-43, 2011.
18. Tuğla, R., Tavukçuoğlu, A., Arslan, M., Examination of thermal properties and failures of brick walls by the use of infrared thermography and hot box method, *International Conference & Exhibition on Application of efficient & renewable energy technologies in low-cost buildings and construction, Ankara, Türkiye*, 180-199, 2013.
19. Sayın, M., Tavukçuoğlu, A., Quantitative assessment of thermal transmittance in building walls by in-situ Infrared Thermography, In A. Tavitil and O.C. Celik (Eds.), *Interdisciplinary Perspectives for Future Building Envelopes - ICBEST 2017 International Conference on Building Envelope Systems and Technologies*, İstanbul Technical University, İstanbul, Türkiye, 202-215, 15-18 May, 2017.
20. Bison, P. G., Marinetti, S., Mazzoldi, A., Grinzato, E., Bressan, C., Cross-comparison of thermal diffusivity measurements by thermal methods. *Infrared Phys Technol*, 43, 127-32, 2002.
21. Parker, W. J., Jenkins, R. J., Butler, C. P., Abbott, G. L., Flash method of determining thermal diffusivity, heat capacity, and thermal conductivity, *Journal of Applied Physics*, 32 (9), 1679-1684, 1961.
22. ASTM E1461-13, Standard test method for thermal diffusivity by the flash method 1. American Society for Testing and Materials, USA, 2013.
23. Maglic, K.D., Taylor, R.E., The apparatus for thermal diffusivity measurement by the laser pulse method, *compendium of thermophysical property measurement methods*, Springer Science+Business Media, New York, 1992.
24. ASTM C714-17, Standard test method for thermal diffusivity of carbon and graphite by a thermal pulse method. American Society for Testing and Materials, USA, 2017.
25. ASTM E2585-09, Standard Practice for Thermal Diffusivity by the Flash Method, American Society for Testing and Materials, USA, 2015.
26. Corbin, S.F., Turriff, D.M., Thermal Diffusivity by the Laser Flash Method. In *Characterization of Materials*, Kaufmann, E.N., Editör: John Wiley and Sons, Inc. New York, NY, USA, 1-10, 2012.
27. Santos, W. N., Mummery, P., Wallwork A., Thermal diffusivity of polymers by the laser flash technique, *Polymer Testing*, 24, 628-634, 2005.
28. Cernuschi, F., Bison P., Moscatelli, A., Microstructural characterization of porous thermal barrier coatings by laser flash technique, *Acta Materialia*, 57, 3460-3471, 2009.
29. Cernuschi, F., Bison, P. G., Figari, A., Marinetti, S., Grinzato, E., Thermal diffusivity measurements by photothermal and thermographic techniques, *International Journal of Thermophysics*, 25 (2), 2004.
30. ASTM E2582-21, Standard Practice for Infrared Flash Thermography of Composite Panels and Repair Patches Used in Aerospace Applications 1. American Society for Testing and Materials, USA, 2021.
31. Grinzato, E., Bison, P.G., Marinetti, S., Monitoring of the ancient buildings by the thermal method, *Journal of Cultural Heritage*, 3, 21-29, 2002.
32. Salazar, A., Colom, M., Mendioroz, A., Laser-spot step-heating thermography to measure the thermal diffusivity of solids, *International Journal of Thermal Sciences* 170, 107124, 2021.
33. Martin, C.S., Torres, C., Esparza, D., Bonilla, D., Thermal diffusivity measurements of spherical samples using active infrared thermography, *Infrared Physics & Technology*, 55, 469-474, 2012.
34. Vozar, L., Hohenauer, W., Flash method of measuring the thermal diffusivity A review, *High Temperatures- High Pressures*, 2003/2004, 35/36, 253- 264, 2004.
35. Taylor, R. E., Kelsic, B. H., Parameters governing thermal diffusivity measurements of unidirectional fiber-reinforced composites, *ASME J Heat Transfer*, 108, 161-165, 1986.
36. Balageas, D. L., Luc, A. M., Transient thermal behavior of directional reinforced composites-applicability limits of homogeneous property model. *AIAA journal*, 24 (1), 109-114, 1986.
37. TS EN ISO 8990, Thermal insulation-Determination of steady-State thermal transmission properties-Calibrated and guarded hot box, Turkish Standards Institution (TSE), Ankara, Türkiye, 2002.
38. TS 825, Thermal insulation requirements for buildings, Turkish Standards Institution, Ankara, Türkiye, 1-80, 2013.
39. TS EN 1745, Masonry and masonry products - Methods for determining design thermal values, Turkish Standards Institution, Ankara, Türkiye, 1-47, 2020.
40. Horak, H. L., York, D. A., Hunn, B. D., Peterson, J. L., Roschke, M. A., Tucker, E. F., DOE-2 Reference Manual, 2, Los Alamos Scientific Laboratory, 1979.
41. Clarke, J. A., Yaneske, P. P., Pinney, A. A., *The Harmonisation of Thermal Properties of Building Materials*, Watford, UK: Building Research Establishment, 1991.
42. Clarke, J. A., *Energy Simulation in Building Design*, Routledge, 2007.
43. Integrated Environmental Solutions Limited (IESVE). Specific Heat Capacity. https://help.iesve.com/ve2018/table_6_thermal_conductivity_specific_heat_capacity_and_density.htm?ms=IQAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAIAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAEAI%3D&st=MA%3D%3D&sct=NDgz&mw=MjQw, Yayın Erişim Tarihi: 17.02.2023.
44. Netbims Ürün Kataloğu. <http://netbims.com/katalogw/mobile/index.html#p=5>, Erişim Tarihi: 17.02.2023.
45. RILEM, Tentative Recommendations, Commissio -25-Pem, Recommended Test to Measure the Deterioration of Stone and to Assess the Effectiveness of Treatment Methods, *Materials and Structures*, 13 (73), 173-25, 1980.
46. TS 4048, Determination of Specific Heat of Thermal Insulating Materials, Turkish Standards Institution, Ankara, Türkiye, 1-11, 2013.

