



**YAPI DUVARLARININ ISIL YAYINIRLIK DEĞERİNİN NİCEL
KIZILÖTESİ ISIL GÖRÜNTÜLEME İLE BELİRLENMESİ**

Rukiye KOÇKAR TUĞLA

**DOKTORA TEZİ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

EKİM 2019

Rukiye KOÇKAR TUĞLA tarafından hazırlanan “YAPI DUVARLARININ ISIL YAYINIRLIK DEĞERİNİN NİCEL KIZILÖTESİ ISIL GÖRÜNTÜLEME İLE BELİRLENMESİ ” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ ile Gazi Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalında DOKTORA TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Prof. Dr. Salih YAZICIOĞLU

İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum.

İkinci Danışman: Doç. Dr. Ayşe TAVUKÇUOĞLU

Mimarlık Ana Bilim Dalı, Orta Doğu Teknik Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum.

Başkan: Prof. Dr. İsmail Özgür YAMAN

İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Orta Doğu Teknik Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum.

Üye: Prof. Dr. Hüseyin Yılmaz ARUNTAŞ

İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum.

Üye: Prof. Dr. İlhami DEMİR

İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Kırıkkale Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum.

Üye: Doç. Dr. Arzuhan Burcu GÜLTEKİN

Gayrimenkul Geliştirme ve Yönetimi Ana Bilim Dalı, Ankara Üniversite

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum.

Üye: Doç. Dr. Osman ŞİMŞEK

İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum.

Tez Savunma Tarihi: 24/10/2019

Jüri tarafından kabul edilen bu çalışmanın Doktora Tezi olması için gerekli şartları yerine getirdiğini onaylıyorum

Prof. Dr. Sena YAŞYERLİ

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Rukiye KOÇKAR TUĞLA
24/10/2019

YAPI DUVARLARININ ISIL YAYINIRLIK DEĞERİNİN NİCEL KIZILÖTESİ ISIL GÖRÜNTÜLEME İLE BELİRLENMESİ

(Doktora Tezi)

Rukiye KOÇKAR TUĞLA

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Ekim 2019

ÖZET

Bu araştırmanın ana hedefi, bir yapı duvarının ısı yayınlılık değeri (α , m^2/s)’nin nicel kızılötesi ısı görüntüleme yöntemiyle (IRT) yerinde ölçülebilmesini sağlayan tahribatsız bir deney düzeneğinin geliştirilmesidir. Bu amaçla izo tuğla, bims blok ve gaz beton ile laboratuvar ortamında üretilmiş olan üç farklı duvarın ısı geçirimsizlik özellikleri, ardışık ısı görüntüleme ile elde edilen yüzey sıcaklık verilerinin nicel analizlerle incelenmiştir. Aynı duvarlarda ısı köprülerine sebep olan sorunlu bölgeler, “ısınma hızı (R_w)” ve “sıcaklık indeksi (TI)” parametreleri ile tanımlanmıştır. Örnek duvarların α -değerini belirlemek üzere IRT ve sıcak kutu (HB) yöntemlerinin bir arada kullanıldığı bir deney düzeneği (IRT-HB) geliştirilmiştir. Elde edilen veriler, teorik olarak hesaplanan ve referans alınan duvarların ölçülmüş α -değerleri ile karşılaştırılmıştır. Referans α -değerleri, sıcak kutu yöntemiyle ölçülmüş olan duvarların gerçek ısı iletkenlik hesap değerleri ve standart laboratuvar deneyleriyle ölçülmüş olan malzemelerin gerçek birim hacim ağırlıkları ve özgül ısıları kullanılarak elde edilmiştir. Laboratuvar ortamında geliştirilen düzenek, mevcut bir dış duvarın α -değerini ölçebilecek şekilde arazi ortamına uyarlanmıştır. Laboratuvar ortamında elde edilen α -değerleri ile referans alınan ve teorik hesaplanan α -değerleri benzerdir. Arazi ortamına uyarlanan IRT-HB ölçüm tekniği ile ölçülen ve teorik olarak hesaplanan α -değerleri de birbirlerine benzerdir. Bu durum, IRT-HB kullanılarak geliştirilen ölçüm tekniği ve analiz yönteminin, mevcut duvarların ısı yayınlılık özelliklerinin belirlenmesinde başarılı olduğunu göstermiştir. Elde edilen veriler, mevcut bir dış duvarın iki tarafında sıcaklık farkının olduğu ortamlarda soğuk tarafta ardışık ısı görüntülemenin yapıldığı durumda, bu duvarın ısı geçirimsizlik özelliklerinin ve ısı sorunları olan bölgelerinin ölçülebilir parametreler ile belirlenebildiğini ve duvarın gerçek α -değerinin yerinde tespitinin mümkün olduğu göstermiştir.

Bilim Kodu	: 91127
Anahtar Kelimeler	: Nicel kızıl ötesi ısı görüntüleme, sıcak kutu, ısı yayınlılık değeri, yapı duvarları, termofiziksel özellikler, ardışık ısı görüntüleme
Sayfa Adedi	: 147
Danışman	: Prof. Dr. Salih YAZICIOĞLU
2. Danışman	: Doç. Dr. Ayşe TAVUKÇUOĞLU

DETERMINATION OF THERMAL DIFFUSIVITY VALUE OF BUILDING WALLS
BY QUANTATIVE INFRARED THERMOGRAPHY

(Ph. D. Thesis)

Rukiye KOÇKAR TUĞLA

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

October 2019

ABSTRACT

The main target of the research is to develop a non-destructive testing method which measures the thermal diffusivity (α value, m^2/s) of a building wall on situ by using Quantitative Infrared Thermography (QIRT). For that purpose, thermal transmittance properties of three different sample walls made of insulated bricks, pumice and aerated concrete masonry units were investigated by quantitative analysis of surface temperature data obtained by sequential IR imaging. The problem areas which cause thermal bridges observed in those sample walls are identified in terms of thermal parameters, “heating rate (R_w)” and “temperature index (TI). The experimental setup was developed by the combined use of QIRT and calibrated hot box methods for the determination of α -value of the sample walls. The α -values measured with the combined method were compared with the reference α -values measured by standard tests and the theoretically calculated α -values. The reference α -values of the wall samples were calculated by using their real thermal conductivities measured by the standard calibrated hot box method and bulk density and specific heat values of masonry materials measured by standard laboratory tests. The experimental set-up developed in the laboratory was adapted to the field environment to measure the α -value of an existing exterior wall. The α -values obtained by the experimental set-up developed in the laboratory are similar with the reference α -values and the theoretically calculated ones. The α -values obtained by QIRT method adapted to the field environment and theoretically-calculated values are also similar. Those signal that the QIRT testing method developed in the study is promising for thermal diffusivity assessment of the existing walls. In case that a certain temperature difference is provided on both sides of an existing external wall and sequential IR imaging is conducted on the cold side of the same wall, it is possible to identify the thermal transmittance properties of an exterior wall and thermal failure zones in terms of measurable parameters as well as to determine its actual α -value on site.

Science Code : 91127

Key Words : Quantitative Infrared Thermography, hot box, thermal difusivity, building walls, thermophysical properties, sequential thermal imaging

Page Number : 147

Supervisor : Prof. Dr. Salih YAZICIOĞLU

Co Supervisor : Assoc. Prof. Dr. Ayşe TAVUKÇUOĞLU

TEŞEKKÜR

Bu çalışma boyunca bilgi, tecrübe ve desteklerini benden esirgemeyen, akademik anlamda bana vizyon kazandıran kıymetli danışman hocalarım Prof. Dr. Salih YAZICIOĞLU'na ve Doç. Dr. Ayşe TAVUKÇUOĞLU'na çok teşekkür ederim. Tez izleme komitesinde yer alarak önemli katkılarıyla tezimi şekillendiren hocalarım Prof. Dr. H. Yılmaz ARUNTAŞ'a ve Doç. Dr. A. Burcu GÜLTEKİN'e; bir takım deneysel çalışmalarım için ODTÜ Malzeme Koruma Laboratuvarı'nın imkanlarını sunan ODTÜ Malzeme Koruma Laboratuvar Başkanı Prof. Dr. Emine N. Caner-Saltık'a; çalışmama zaman zaman kıymetli görüşleri ile katkıda bulunan hocam Doç. Dr. Osman Şimşek'e; yine bu süreçte Ankara'da bana kapılarını açan ALKIŞ Ailesine, yardımlarını esirgemeyen Arş. Gör. Rüya KILIÇ DEMİRCAN'a, Dr. Öğr. Üyesi Kenan TOKLU'ya, Yapı AR-GE müdürü Çetin ÇELİK'e ve Fatıma EROL'a, teşekkürü bir borç bilirim. Bu tez çalışmasını finansal olarak destekleyen Gazi Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP) Birimi'ne ve tez çalışmam esnasında gerekli kolaylığı sağlayan Kastamonu Üniversitesi Abana Sebahat-Mesut Yılmaz MYO yöneticilerine teşekkür ederim. Son olarak; üç kız çocuğunun eğitimi için tek başına mücadele eden, nihayetinde bu satırları yazmama vesile olan azim kaynağım, her şeyimi borçlu olduğum ve kendisiyle onur duyduğum canım annem Gülten ÖRGÜÇ'e; yine üzerimde sayısız emekleri olan canım babaanneme ve canım kardeşlerime; bu tez çalışması boyunca her daim yanımda yer alarak en büyük destekçim olan, beni en çok teşvik eden, yardımını ve ilgisini eksik etmeden sabırla bu süreci yöneten ve hayatta ki en büyük şansım olan sevgili eşim Ramazan TUĞLA'ya, onunla geçirmem gereken vakti tezimle paylaşmama izin vererek bu süreçte ki en büyük fedakarlığı yapan biricik kızım Zeynep Gül'e ve öğretim hayatım boyunca desteğini esirgemeyen, ismini yazamadığım tüm dostlara en kalbi teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	x
ŞEKİLLERİN LİSTESİ	xii
RESİMLERİN LİSTESİ	xv
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xvii
1. GİRİŞ.....	1
2. KURAMSAL TEMELLER VE KAYNAK ARAŞTIRMASI.....	5
2.1. Kâgir Duvar Dolgu Malzemeleri: Tuğla ve Hafif Beton Kagir Çeşitleri.....	5
2.1.1 Tuğla	5
2.1.2. Bims blok	9
2.1.3. Gaz beton	12
2.2. Tuğla ve Hafif Beton Kagirlerin Termofiziksel Özellikleri.....	14
2.3. Isıl Yayınlılık (Termal Difüzivite) Özelliği	25
2.4. Isı Transferi Kavramları	30
2.5. Kızılötesi Isıl Görüntüleme Yöntemi	33
2.6. Kızılötesi Isıl Görüntüleme ile Ölçüm Teknikleri	37
2.7. Kızılötesi Isıl Görüntüleme ile Yapı Duvarlarının Isıl Performansının İncelenmesi	39
2.8. Sıcak Kutu Deney Yöntemi ile Duvarların Isıl Direnç Performanslarının İncelenmesi	44

	Sayfa
3. MALZEME VE YÖNTEM	49
3.1. Kagir Duvar Malzemeleri ve İncelenen Duvar Örnekleri.....	49
3.2. Duvar Malzemelerin Termofiziksel Özelliklerinin Belirlenmesi	55
3.3. Duvar Malzemelerin Isıl Yayınlılık Değerlerinin Belirlenmesi: Teorik Veriler ve Laboratuvar Verileri Kullanılarak Yapılan Hesaplamalar.....	66
3.4. Kızılötesi Isıl Görüntüleme (IRT) ve Sıcak Kutu (HB) Yöntemlerinin Birleşik Kullanıldığı Deney Düzeneği (IRT-HB Düzeneği): Duvar Örneklerinin Isıl Geçirimsilik Özelliklerin Belirlenmesi	68
3.5. IRT-HB Düzeneği ile Duvarların Isıl Yayınlılık Değerinin Belirlenmesi.....	77
3.6. Kızılötesi Isıl Görüntüleme ile Mevcut Duvarın Yerinde Isıl Yayınlılık Değerinin Belirlenmesi (Pilot Ölçüm).....	78
3.7. Sorunlu ve Sorunsuz Bölgelerin Isınma Hızı ve Sıcaklık İndeksi Ölçütleri ile Tanımlanması	82
4. BULGULAR	85
4.1. Duvar Malzemelerin Termofiziksel Özellikleri	85
4.2. Duvar Örneklerinin Isıl Geçirimsilik Özellikleri: Isıl Geçirgenlik Katsayısı (U), Isıl Direnç Değeri (R) Isıl İletkenlik Hesap Değeri (λ) ve Isı Akış Yoğunluğu (q).....	87
4.3. Duvarların IRT-HB Düzeneği ile Elde Edilen Isıl Yayınlılık Değeri.....	95
4.4. Kızılötesi Isıl Görüntüleme ile Mevcut Duvarın Yerinde Belirlenen Isıl Yayınlılık Değeri (Pilot Çalışma).....	99
4.5. Duvarların Sorunlu - Sorunsuz Bölgelerine Ait Isınma Hızı ve Sıcaklık İndeksi Verileri	105
5. TARTIŞMA	117
5.1. İncelenen Yapı Duvarlarının Isıl Geçirimsilik Özellikleri Bakımından Değerlendirilmesi	117
5.2. Laboratuvar Ortamında ve Yerinde Duvarların Isıl Yayınlılık Değerini Ölçen IRT-HB Deney Düzeneğinin Değerlendirmesi	119

Sayfa

5.3. IRT-HB Deney Düzenekinin Enerji Verimliliği ile İlgili Çalışmalarda Yararlı Olabildiği Sahalar	122
6. SONUÇ VE ÖNERİLER	127
KAYNAKLAR	129
EKLER.....	139
EK-1. FLIR ThermaCam E45 Termal Kamera.....	140
EK-2. HOBO WarePro Nem/Sıcaklık/2 Dış Giriş Kaydedici	142
EK-3. Kestrel 4000NV Ekran Aydınlatmalı, Veri kayıtlı, Sıcaklık, Nem, Basınç, Yükseklik Ölçümleri (Altimetre) ve Rüzgar Hızı Ölçüm Cihazı (Anemometre) .	143
ÖZGEÇMİŞ	145

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 2.1. Tuğlaların termofiziksel özellikleri	8
Çizelge 2.2. Türkiye 'de kullanılan pomza kayaçların termofiziksel özellikleri	9
Çizelge 2.3. Bims blok malzemeye ait termofiziksel özellikler	11
Çizelge 2.4. Gaz betona ait termofiziksel özellikler	14
Çizelge 2.5. Bazı yapı malzemelerine ait ısı iletkenlik hesap değerleri	16
Çizelge 2.6. Yapı malzemelerine ait 24 °C ortalama sıcaklıkta verilen özgül ısı değerleri	17
Çizelge 2.7. TS 825 standartında verilen yüzeysel ısı iletim (taşıma) direnç değerleri	20
Çizelge 2.8. Yapı malzemelerine ait termofiziksel özellikler: yoğunluk, ısı iletkenlik hesap değeri ve özgül ısı verileri	24
Çizelge 2.9. Bazı malzemelere ait literatürde verilen ısı yayınlılık değerleri	25
Çizelge 2.10. Literatüre göre yapı duvarlarına ve duvar dolgu malzemeleri ait ısı yayınlılık değerleri	29
Çizelge 2.11. Malzemelerin ısı yayıcılık (emisivite) değerleri	33
Çizelge 3.1. Çalışma duvarlarında kullanılan kagir malzemelerin termofiziksel özellikleri	49
Çizelge 4.1. Çalışmada kullanılan kagir malzemelerin deneysel olarak elde edilen ve literatürden alınan birim hacim ağırlık, özgül ısı ve ısı yayınlılık değerleri	87
Çizelge 4.2. Örnek duvarların referans ısı geçirimsizlik özellikleri	88
Çizelge 4.3. Örnek duvarların IRT-HB ile ölçülmüş ve yanal ısı akışları ile kalibre edilmiş U değerleri ve referans U değerleri	88
Çizelge 4.4. Çalışılan duvarlara ait referans ve teorik ısı geçirimsizlik özellikleri	94
Çizelge 4.5. Duvarların referans ve teorik ısı yayınlılık değerleri, bu değerlerin hesaplanmasında kullanılan kagir malzemenin termofiziksel özellikleri ve duvarların IRT-HB yöntemi ile ölçülmüş ısı yayınlılık değerleri	99
Çizelge 4.6. Mevcut tuğla duvar için standartlarda listelenen veriler kullanılarak	

Çizelge	Sayfa
hesaplanan ısıl geçirimsizlik özellikleri.....	102
Çizelge 4.7. Mevcut tuğla duvarın IRT-HB ile ölçülen ($\alpha_{MTD,IRT-HB}$), standartlarda yer alan ısı verileri ile teorik olarak hesaplanan ($\alpha_{MTD,Teorik}$) ve literatürde tuğla malzeme için verilmiş olan ($\alpha_{T,Literatür}$) ısı yayımlılık değerleri.....	104
Çizelge 4.8. İD kodlu izo tuğla duvarın ısınma hızı karakteristikleri: ısınma süreci boyunca yüzey sıcaklığındaki artış ($\Delta T = T_{SON} - T_{ILK}$), çalışılan alanların ısınma hızları (R_{W-ALAN}) ve referans alınan sorunsuz alana göre oranları ($R_{W-SORUN}/R_{W-REF}$)	108
Çizelge 4.9. BD kodlu bims blokduvarın ısınma hızı karakteristikleri: ısınma süreci boyunca yüzey sıcaklığındaki artış ($\Delta T = T_{SON} - T_{ILK}$), çalışılan alanların ısınma hızları (R_{W-ALAN}) ve referans alınan sorunsuz alana göre oranları ($R_{W-SORUN}/R_{W-REF}$)	109
Çizelge 4.10. GD kodlu gaz beton duvarın ısınma hızı karakteristikleri: ısınma süreci boyunca yüzey sıcaklığındaki artış ($\Delta T = T_{SON} - T_{ILK}$), çalışılan alanların ısınma hızları (R_{W-ALAN}) ve referans alınan sorunsuz alana göre oranları ($R_{W-SORUN}/R_{W-REF}$)	111
Çizelge 4.11. İD kodlu izo tuğla duvarın analizi – Soğuk taraf yüzey sıcaklıkları (T_{so}), sıcaklık indeksleri (TI) ve çalışılan alan ile referans alan arasındaki sıcaklık farkı (ΔT_{SORUN}).....	113
Çizelge 4.12. BD kodlu bims blokduvarın analizi – Soğuk taraf yüzey sıcaklıkları (T_{so}), sıcaklık indeksleri (TI) ve çalışılan alan ile referans alan arasındaki sıcaklık farkı (ΔT_{SORUN}).....	114
Çizelge 4.13. GD kodlu gaz beton duvarın analizi – Soğuk taraf yüzey sıcaklıkları (T_{so}), sıcaklık indeksleri (TI) ve çalışılan alan ile referans alan arasındaki sıcaklık farkı (ΔT_{SORUN}).....	116

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. TS EN 771-1 standartında yer alan kagir tuğla türleri.....	6
Şekil 2.2. Zamana karşı sıcaklık değişimi grafiği (Parker, 1961; ASTM E1461-13).....	28
Şekil 2.3. Eletromanyetik spekturumda verilen ışık tayfı (Wikipedia, 2019)	34
Şekil 2.4. Termal kamera tarafından ışıının görüntülenmesi (Ocana ve diğerleri, 2004).....	34
Şekil 2.5. İnfrared termografinin ölçüm tekniklerini gösteren şematik çizim	37
Şekil 2.6. Sıcak kutu deney düzeneğini: a) mahfazalı sıcak kutu deney düzeneği b) kalibreli sıcak kutu deney düzeneği ve düzenekte oluşan ısı akışının şematik görüntüsü: (1) sıcak taraf ölçüm kabini ; (2) mahfaza alanı; (3) soğuk taraf ölçüm kabini ; (4) çalışma duvarı; (5) kuşatma/sarma paneli (TS EN ISO 8990, 2002; BS EN ISO 8990, 1996)	46
Şekil 3.1. Çalışma duvarında kullanılan petek delikli ve düşeyde lamba-zıvana geçme birleşimli izo tuğlanın şematik detay çizimi	50
Şekil 3.2. Çalışma duvarında kullanılan düşeyde delikli ve lamba-zıvana geçmeli bims blok duvar dolgu malzemesinin şematik detay çizimi.....	50
Şekil 3.3. Çalışma duvarında kullanılan gaz beton duvar dolgu malzemesine ait şematik detay çizimi	51
Şekil 3.4. IRT ve sıcak kutu deney yönteminin birleşik kullanımı ile incelenen İD kodlu izo tuğla duvarın (solda) ve BD kodlu bims blokduvarların (sağda) şematik çizimi.....	53
Şekil 3.5. IRT ve sıcak kutu deney yönteminin birleşik kullanımı ile incelenen GD kodlu gaz beton duvarın şematik çizimi.....	54
Şekil 3.6. IRT-HB deney düzeneğinin şematik çizimi (Koçkar, 2012).	71
Şekil 3.7. Isı kabini sıcak taraf deney düzeneğinin şematik çizimi (Koçkar, 2012).....	74
Şekil 3.8. Yüzey sıcaklık verileri ile elde edilen zamana karşı sıcaklık değişimini gösteren grafik	77
Şekil 3.9. Yapılarda yerinde ısı yayını değerin belirlenmesi amacıyla yapılan pilot uygulamada kullanılan Abana MYO mevcut yapı duvarının planı ve deney düzeneğinin şematik gösterimi: a) Deney düzeneğinin IR ile	

Şekil	Sayfa
görüntü alınan soğuk tarafı, b) Radyatörle ısıtılan duvar yüzeyinin sıcak tarafı.....	79
Şekil 3.10. Mevcut yapı duvarının yerinde IRT-HB yöntemiyle incelendiği deney düzeneğinin şematik çizimi	82
Şekil 4.1. İD kodlu izo tuğla duvarın deney süresince zamana karşı duvarın sıcak ve soğuk tarafındaki ortam ve yüzey sıcaklığındaki değişimi gösteren grafik. ..	89
Şekil 4.2. BD kodlu bims blokduvarın deney süresince zamana karşı duvarın sıcak ve soğuk tarafındaki ortam ve yüzey sıcaklığındaki değişimi gösteren grafik. ..	90
Şekil 4.3. GD kodlu gaz beton duvarın deney süresince zamana karşı duvarın sıcak ve soğuk tarafındaki ortam ve yüzey sıcaklığındaki değişimi gösteren grafik.	90
Şekil 4.4. % 45 bağıl nem (RH) ortamında ölçülmüş olan referans ısıl geçirgenlik katsayısı ($U_{Referans}$) ile % 80 bağıl nem ortamına göre hesaplanmış olan teorik ısıl geçirgenlik katsayısı (U_{Teorik}) değerlerini kıyaslayan grafik.	95
Şekil 4.5. İD kodlu izo tuğla duvarın zamana karşı soğuk tarafındaki yüzey sıcaklık değişimini gösteren grafik	96
Şekil 4.6. BD kodlu bims blokduvarın zamana karşı soğuk tarafındaki yüzey sıcaklık değişimini gösteren grafik	97
Şekil 4.7. GD kodlu gaz beton duvarın zamana karşı soğuk tarafındaki yüzey sıcaklık değişimini gösteren grafik	98
Şekil 4.8. Mevcut yapı duvarının deney süresince zamana karşı duvarın sıcak ve soğuk tarafındaki ortam ve yüzey sıcaklığındaki değişimi gösteren grafik. ..	100
Şekil 4.9. Mevcut çalışma duvarının zamana karşı soğuk tarafındaki yüzey sıcaklık değişimini gösteren grafik	103
Şekil 4.10. İD kodlu izo tuğla duvardaki derzli (sorunlu) - kagir birim (sorunsuz) bölgeler ve bu bölgelerin yüzey sıcaklıklarındaki artışı gösteren ısı görüntü.....	106
Şekil 4.11. BD kodlu bims blokduvardaki derzli (sorunlu)-kagir birim (sorunsuz) bölgeler ve bu bölgelerin yüzey sıcaklıklarındaki artışı gösteren ısı görüntü.	106
Şekil 4.12. GD kodlu gaz beton duvardaki derzli (sorunlu)-kagir birim (sorunsuz) bölgeler ve bu bölgelerin yüzey sıcaklıklarındaki artışı gösteren ısı görüntü.	107

Şekil	Sayfa
Şekil 4.13. İD kodlu duvarın derzler ile tuğla yüzeylerde, zamana karşı ısınmadaki artışı gösteren grafikleri	108
Şekil 4.14. BD kodlu duvarın derzler ile kagir bims blokyüzeylerde, zamana karşı ısınmadaki artışı gösteren grafikleri.....	109
Şekil 4.15. GD kodlu duvarın derzler ile gaz beton yüzeylerde, zamana karşı ısınmadaki artışı gösteren grafikleri.....	110
Şekil 4.16. İD kodlu duvarın sağlam/sorunsuz bölgede bulunan derzler ile tuğla yüzeylerde sıcaklık indeksini gösteren grafikler.....	112
Şekil 4.17. BD kodlu duvarın sağlam/sorunsuz bölgede bulunan derzler ile bims blokyüzeylerde sıcaklık indeksini gösteren grafikler.....	114
Şekil 4.18. GD kodlu duvarın sağlam/sorunsuz bölgede bulunan derzler ile gaz beton yüzeylerde sıcaklık indeksini gösteren grafikler.....	115
Şekil 5.1. İzo tuğla, bims blok ve gaz beton duvarların üç farklı yöntem ile belirlenmiş ısı yayınlılık değerleri	120

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 2.1. Kalınlıkları sırasıyla 20 cm ve 25 cm olan düşeyde lamba zıvana geçme derzli petek izo tuğla resmi (Kudret tuğla, 2019)	7
Resim 2.2. Düşeyde boşluklar arasında şaşırtmalı olarak yalıtım malzemesi kullanılan termal tuğla resmi (Kudret tuğla, 2019).....	8
Resim 2.3. Boşluklu bims kagir ürünlerden örnek görüntüler (Bims Raporu, 2006).....	11
Resim 2.4. Farklı kalınlıklara sahip gaz beton düz duvar kagirlarının görüntüsü (AKG, 2019)	13
Resim 2.5. Farklı kalınlıklara sahip gaz beton geçmeli duvar kagirlarının görüntüsü (AKG, 2019)	13
Resim 3.1. İzo tuğla duvarın ön görünüşü: a) IRT- HB için hazırlanan duvar, b) Muhfazalı sıcak kutu deney düzeneği için hazırlanan duvar.	52
Resim 3.2. Bims blok duvarın ön görünüşü: a) IRT -HB için hazırlanan duvar, b) Sıcak kutu deney düzeneği için hazırlanan duvar.	52
Resim 3.3. Gaz beton duvarın ön görünüşü: a) IRT-HB için hazırlanan duvar, b) Sıcak kutu deney düzeneği için hazırlanan duvar.	53
Resim 3.4. Duvar dolgu malzemelerinin özgül ısılarının belirlenmesinde kullanılan deney düzeneğinin görünüşü ve şematik çizimi.	57
Resim 3.5. Özgül ısı deneyi için hazırlanan numune örnekleri	57
Resim 3.6. Özgül ısı deneyinde ölçüm yapıldığı süreci gösteren resim	58
Resim 3.7. Isı iletkenlik hesap değerinin belirlendiği, sıcak- soğuk kabinler ve bu kabinler arasına yerleştirilen çalışma duvarından oluşan sıcak kutu deney düzeneği (Yapı ARGE, 2019).....	59
Resim 3.8. Sıcak kutu deneyine tabi tutulacak çalışma duvarlarının deneye uygun hale getirilme aşamaları: duvarın örülmesi (sol üst), duvar-yürüteç birleşim noktalarında kalan boşlukların poliüretan ile kapatılması (sağ üst), çerçeve kenarının yalıtım malzemesi ile kapatılması (sol alt), şartlandırma koşullarını korumak için duvar yüzeyine jelatin çekilmesi (sağ alt).....	60
Resim 3.9. Duvarın soğuk taraf görünüşü (sol taraf), mahfazalı sıcak kutu deney düzeneği (sağ taraf).....	61

Resim	Sayfa
Resim 3.10. Arka tarafı sıcak kutu ile ısıtılan duvar kesitindeki ısı akışı soğuk tarafta duvar yüzeyinden 2 dk aralıklarla peş peşe alınan kızılötesi ısı görüntüler ile takip edildiği deney düzeneği.....	69
Resim 3.11. Örnek duvarın ısıl geçirimsizlik özelliklerinin belirlendiği deney düzeneğinin önden (ısı kabininin soğuk tarafı) ve arkadan (ısı kabininin sıcak tarafı) görünüşü.....	70
Resim 3.12. Mevut duvarın sıcak tarafında bulunan radyatörün ısısının muhafaza etmek için oluşturulan yalıtkan odacık ($U=0,37 \text{ W/m}^2\text{K}$ ve $R=2,67 \text{ m}^2\text{K/W}$)	80
Resim 3.13. Mevcut yapı duvarının ısı yayınlılık değerinin belirlendiği IRT-HB yöntemi ile oluşturulan deney düzeneğinin; (a) önden (IR kamera ile ısı takibin yapıldığı soğuk tarafı) ve (b) diğerleriadan (yalıtkan odacıkla kapatılmış radyatörle ısıtılan sıcak tarafı) görünüşü.	81
Resim 4.1. İD kodlu izo tuğla duvara ait ısı görüntüler: duvarın görünüşü (sol üstte), sıcak kutu tarafından ısıtılmaya başlanan duvardan alınan ilk IR görüntü (sol altta), zaman periyodu 29145s (7 saat) ısıtma sürecindeki son IR görüntü (sağ altta), sıcak kutunun ortam sıcaklığı $45,4 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ile bağlı nemi % 20 ve soğuk tarafın ortam sıcaklığı $22,6 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ile bağlı nemi % 33, ilk IR görüntü ile son IR görüntü arasındaki fark (sağ üstte).....	91
Resim 4.2. BD kodlu bims blokduvara ait ısı görüntüler: duvarın görünüşü (sol üstte), sıcak kutu tarafından ısıtılmaya başlanan duvardan alınan ilk IR görüntü (sol altta), zaman periyodu 30959 s (8,5 saat) ısıtma sürecindeki son IR görüntü (sağ altta), sıcak kutunun ortam sıcaklığı $45,7 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ile bağlı nemi % 25,3 ve soğuk tarafın ortam sıcaklığı $27,1 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ile bağlı nemi % 44,4, ilk IR görüntü ile son IR görüntü arasındaki fark (sağ üstte).	92
Resim 4.3. GD kodlu gaz beton duvara ait ısı görüntüler: duvarın görünüşü (sol üstte), sıcak kutu tarafından ısıtılmaya başlanan duvardan alınan ilk IR görüntü (sol altta), zaman periyodu 83255 s ısıtma sürecindeki son IR görüntü (sağ altta), sıcak kutunun ortam sıcaklığı $45,7 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ile bağlı nemi % 25 ve soğuk tarafın ortam sıcaklığı $26,7 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ile bağlı nemi % 43, ilk IR görüntü ile son IR görüntü arasındaki fark (sağ üstte).....	93
Resim 4.4. Mevcut yapı duvarına ait ısı görüntüler: duvarın çalışma kapsamında incelenen alanının görünüşü (sol üstte), radyatör ile ark taraftan ısıtılmaya başlanan mevcut duvardan alınan ilk IR görüntü (sol altta), zaman periyodu 19178 s (yaklaşık 5,3 saat) ısıtma sürecindeki son IR görüntü (sağ altta), sıcak tarafın ortam sıcaklığı $43,6 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ile bağlı nemi % 14,24 ve soğuk tarafın ortam sıcaklığı $17,69 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ile bağlı nemi % 46 ilk IR görüntü ile son IR görüntü arasındaki fark (sağ üstte).....	101

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklamalar
A	Alan (m^2)
A_B	Isı kabini duvarının alanı (m^2)
c	Özgül ısı (J/kgK)
d	Yapı bileşeni kalınlığı (m)
d_{INS}	Isı yalıtım katmanının kalınlığı (m)
d_{ST}	Çelik tabakanın kalınlığı (m)
E	Isıl yayılım faktörü
h_r	Radyasyon kat sayısı (W/m^2K)
m	Kütle (kg)
R	Isıl geçirgenlik direnci (m^2K/W)
Re	Dış yüzey ısı iletim direnci (m^2K/W)
R_{INS}	Alüminyum folyolu camyünün ısı direnci (m^2K/W)
Ri	İç yüzey ısı iletim direnci (m^2K/W)
R_{SI}	Sıcak taraf yüzey ısı direnci (m^2K/W)
R_{SO}	Soğuk taraf yüzey ısı direnci (m^2K/W)
R_{ST}	Çelik tabakanın ısı iletim direnci (m^2K/W)
R_T	Toplam ısı geçirgenlik direnci (m^2K/W)
R_w	Duvarın ısı iletim direnci (m^2K/W)
R_{Teorik}	Teorik hesaplanan ısı geçirgenlik direnci (m^2K/W)
R_{Ref}	Sıcak kutu ile ölçülen ısı geçirgenlik direnci (m^2K/W)
R_{IRT-HB}	IRT-HB ile belirlenen ısı geçirgenlik direnci (m^2K/W)
R_w	Isınma hızı ($^{\circ}C/s^{1/2}$)
T_A	Ortam sıcaklığı ($^{\circ}C$)
T_{AI}	Sıcak taraf ortam sıcaklığı ($^{\circ}C$)
T_{AO}	Soğuk taraf ortam sıcaklığı ($^{\circ}C$)
T_m	Ortamala radyant mutlak sıcaklık ($^{\circ}C$)
T_n	Çevre sıcaklığı ($^{\circ}C$)

Simgeler**Açıklamalar**

T_r	Alüminyum panelin ortalama sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$)
T_s	Deney numunesinin yüzey sıcaklığı, ($^{\circ}\text{C}$)
T_{SI}	Sıcak taraf yüzey sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$)
T_{SO}	Soğuk taraf yüzey sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$)
TI	Sıcaklık indeksi, (birimsiz)
U	Isıl geçirgenlik katsayısı ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$)
U_B	Isı kabini duvarının ısıl geçirgenlik katsayısı (Wm^2/K)
U_{Teorik}	Duvarın teorik ısıl geçirgenlik katsayısı (Wm^2/K)
U_{Ref}	Sıcak kutu ile ölçülen ısıl geçirgenlik katsayısı (Wm^2/K)
$U_{\text{IRT-HB}}$	IRT-HB ile belirlenen ısıl geçirgenlik katsayısı (Wm^2/K)
V	Hacim (m^3)
q	Isı akış yoğunluğu (W/m^2)
q_{Ref}	Sıcak kutu ile ölçülen ısı akış yoğunluğu (W/m^2)
$q_{\text{IRT-HB}}$	IRT-HB ile belirlenen ısı akış yoğunluğu (W/m^2)
λ	Isı iletkenlik hesap değeri (W/mK)
λ_{INS}	Camyünün ısı iletkenlik hesap değeri (W/mK)
λ_{ST}	Çelik tabakanın ısı iletkenlik hesap değeri (W/mK)
λ_{Teorik}	Teorik ısı iletkenlik hesap değeri (W/mK)
λ_{Ref}	Referans ısı iletkenlik hesap değeri (W/mK)
$\lambda_{\text{IRT-HB}}$	IRT-HB ile belirlenen ısı iletkenlik hesap değeri (W/mK)
Φ_B	Isı kabini duvarlarındaki ısı akışı (W)
Φ_P	Toplam güç girdisi (W)
Φ_W	Örnek duvardaki ısı akışı (W)
Φ_Y	Yanal ısı akışını (W)
ΔT	Sıcaklık farkı ($^{\circ}\text{C}$)
α	Isıl yayınlılık değeri (m^2/s)
α_{Teorik}	Duvarın teorik hesaplanan ısıl yayınlılık değeri (m^2/s)
α_{Ref}	Duvarın referans ısıl yayınlılık değeri (m^2/s)
$\alpha_{\text{IRT-HB}}$	Duvarın IRT-HB ile ölçülen ısıl yayınlılık değeri (m^2/s)
$\alpha_{\text{MTD.IRT-HB}}$	Mevcut tuğla duvarın IRT-HB ile ölçülen ısıl yayınlılık değeri
$\alpha_{\text{Literatür}}$	Literatürden alınan ısıl yayınlılık değeri (m^2/s)
σ	Stefan Boltzman sabiti (5.67×10^{-8}) ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}^4$)

Simgeler**Açıklamalar** μ

Su buhar difüzyon direç katsayısı (birimsiz)

 ρ Birim hacim ağırlık (kg/m^3)**Kısaltmalar****Açıklamalar****AB**

Avrupa Birliği

AR

Alan

ASHRAE

Amerikan Isıtma-Soğutma ve İklimlendirme Standartı

ASTM

Amerikan Standartı

BS

İngiliz Standartı

BD

Bims blok duvar

EKB

Enerji Kimlik Belgesi

EN

Avrupa Normu

EPBD

Avrupa Bina Enerji Performans Yönetmeliği

EPS

Yalıtım malzemesi (genleştirilmiş polistren köpük)

GD

Gaz beton duvar

HFM

Isı akış ölçer

IR

İnfrared (kızılötesi)

IRT

İnfrared termografi –Kızılötesi ısı görüntüleme

ISO

Uluslararası Standartlaştırma Organizasyonu

İD

İzo tuğla duvar

IRT-HB

İnfrared termografi (IRT) ve sıcak kutu (HB) birleşik düzeneği

MTD

Mevcut tuğla duvar

MTD.1-2-3

Isı iletkenlik hesap değeri farklı mevcut tuğla duvar

MTD.1a-2a-3a

Özgül ısı değeri 900 J/kgK alınan mevcut tuğla duvar

MTD.1b-2b-3b

Özgül ısı değeri 1000 J/kgK alınan mevcut tuğla duvar

NZEB

Neredeyse sıfıra yakın enerji harcayan bina

TS

Türk Standartı

T

Tuğla

1. GİRİŞ

Enerji verimliliği, enerji korunumu, enerji tüketimi gibi kavramlar son zamanlarda dünya üzerinde birçok çalışmaya konu olmuştur. Avrupa vatandaşlarının ve hükümetlerinin en büyük endişelerinden biri enerji tüketimidir. Binalar enerji tüketiminde sanayi sektöründen sonra ikinci sırada yerini almaktadır. Tüm dünya ülkelerinde olduğu gibi Avrupa’da da binalar toplam enerjinin % 40 kullanmaktadır (Barreira, Almeida ve Moreira, 2017). Bu nedenle dünya ülkeleri enerji dostu yeni yapılar tasarlama, yapılarda enerji verimliliğini artırma (Barreira, 2017) ve mevcut yapıların enerji tüketimini azaltmaya yönelik çalışmalar hız kazanmıştır. Bu nedenle Avrupa da “Neredeyse Sıfır Enerjili Binalar (Nearly Zero-Energy Building, NZEB)” bilgilendirme belgesi yayınlanmıştır. Bu bilgilendirme belgesinde Avrupa Birliğine (AB) üye ülkelerin eski ve yeni binalar için uygulama farklarına dikkat çekilerek sıfır enerji harcayan yapı örneği oluşturulması amaçlanmıştır. Avrupa Birliğinin enerji bağımsızlığına katkıda bulunmak, sera gazı emisyonlarını ve enerji kullanımını azaltmak amacıyla binalarda enerji performansı için inovasyonu teşvik etmenin ve bu alanda önemli bir başarı elde etmenin etkili bir yolu olarak görülen “Binaların Enerji Performansı Yönetmeliği (EPBD, 2010/31 / EC) yayınlanmıştır. Bu belgeye göre Avrupa da Aralık 2020 tüm yeni binalar NZEB’e uygun neredeyse sıfır enerjili binalar olacaktır. Kamu binaları için ise bu tarih 31 Aralık 2018 olarak ilan edilmiştir (Binaların Enerji Performansı Yönetmeliği [EPBD], 2010/ 3 / EC).

Küreselleşen dünya üzerinde yaşanan gelişmelere paralel olarak Türkiye’de de enerji verimliliğini sağlamaya yönelik çalışmalara hız kazanmıştır. Öyle ki bu çalışmaları artırmak enerji verimli yapı tasarlamak ve mevcut yapıların enerji performansını artırmak amacıyla Avrupa da çıkarılan yönetmeliğe benzer bir yönetmelik çıkarılmıştır. 2008 tarihinde yayınlanan “Binalarda Enerji Performansı Yönetmeliği” (Resmi Gazete, Sayı 27075) gereğince binalarda harcanan enerjinin belgelenmesi amaçlanmış; bu kapsamda her bir yeni yapının Enerji Kimlik Belgesi (EKB) alması zorunlu kılınmıştır. Mevcut binaların enerji kimlik belgesi alması zorunluluğu ise 2020 tarihine kadar ertelenmiştir.

EKB, binanın enerji ihtiyacı, enerji tüketim sınıfı, sera gazı salımı seviyesi, yalıtım özellikleri ve ısıtma ve/veya soğutma sistemlerinin verimi ile ilgili bilgileri içeren bir belgedir. Mevcut uygulamada EKB hazırlanırken proje verileri göz önünde

bulundurulmakta; yapı bileşenlerinin ısı direnç nitelikleri ve yapının enerji ihtiyacı kullanılan malzemelerin termofiziksel özellikleri doğrultusunda hesaplanmaktadır. Bu hesaplamalarda yapı malzemelerine ait ısı iletkenlik hesap değeri (λ , W/mK), ısı geçirgenlik direnci (R , m²K/W), ısı geçirgenlik katsayısı (U , W/ m²K) ve ısı yayınlılık değeri (thermal diffusivity, α , m²/s) gibi ısı özelliklere ihtiyaç duyulmaktadır. Bu veriler malzeme özellikleri bilinen yapılar için dolaylı yoldan hesaplanabileceği gibi sürekli rejim (ASTM, 2000a ve 2000b), geçici rejim ve lazer flaş/çakma yöntemleri gibi ısı akış ölçme teknikleri ile de doğrudan ölçülebilmektedir. Ancak bu ölçüm teknikleri için gerekli olan deney düzeneklerine ve deney cihazlarına erişim her zaman mümkün olmamakla birlikte bu yöntemlerin ekonomik olmadığı ve çok zaman alıcı olduğu bilinmektedir. Ayrıca yapıların mevcut durumlarındaki ısı performanslarının tahmin edilebilmesi için yapıdan malzeme örneklerinin alınması ve bu malzemelerin termofiziksel özelliklerinin tayin edilmesi yapıya zarar veren (tahripkar) bir uygulamadır.

Duvar yapımında kullanılan yapı malzemelerinin ısı özelliklerinin iyi tanımlanması yapı duvarlarından beklenen ısı performansın tahmin edilebilmesinde önemli rol oynamaktadır. Literatürde yapı dış çevresinin ısı transferini inceleyen mevcut yöntemlerin olduğu bilinmektedir (Carslaw, 1959; EN ISO 13786:2007). Ancak bu yöntemler içi boş malzemeler örneğin tuğla, bims vb. için uygun olmayıp sadece homojen tabakalara uygulanmaktadır (Habib, Cianfrini ve De Lieto Vollaro, 2017). Bu nedenle yapı duvarlarının ısı geçirimlilik özelliklerini ve enerji performanslarının malzeme kesitinden ve detayından bağımsız olarak belirlenebileceği yeni yöntemlere ihtiyaç vardır. Mevcut yapıların ve yeni yapıların ısı performansları yapı projeleri üzerinden belirlenmektedir. Ancak yapı projeleri üzerinden yapılan ısı geçirimlilik hesaplamaları sonucu elde edilen veriler her zaman gerçek durumu yansıtmamaktadır. Yapı duvarlarında yer alan/alabilecek ısı sorunları/ısı problemleri yapı projelerinden tespit edilemediği gibi çoğu zaman gözle de görülmemektedir. Bu gibi durumlarda varsa yapı bünyesindeki ısı sorunlarında tespitinin yapılması yapının toplam ısı performansına etkisi belirlenmelidir. Bu işlemi yaparken de yapıya zarar vermeden, yapının kullanım kalitesini düşürmeden, doğru, pratik ve hızlı bir yöntemle yapılmasına ve yapının gerçek ısı performansını ölçülebilir nicel parametrelerle belirlenmesine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu ihtiyaç doğrultusunda tahribatsız bir muayene yöntemi olan kızılötesi ısı görüntüleme yönteminin yapılarda yerinde alınacak ölçümlerle yapının gerçek ısı performansının belirlenmesinde kullanılabileceği düşünülmektedir. Kızılötesi ısı görüntüleme, yapı malzemeleri ve bileşenlerinin ısı geçirimlilik niteliklerinin

ölçülmesinde yararlı olabilecek bir tahribatsız inceleme yöntemidir (Koçkar, 2012). Yapı malzemesinden bağımsız olarak sadece yapı yüzey sıcaklık bilgileri ile yapıdaki ısı sorunlarının yerinde ve yapıya zarar vermeden incelenmesini mümkün kılmaktadır (Koçkar, 2012).

Literatürde yaşanan son gelişmeler, kızılıötesi ısı görüntüleme yöntemi ile laboratuvar koşullarında (Koçkar, 2012) nicel analizlerle belirlenen yapı bileşenlerinin ısı geçirgenlik değeri (U değeri, W/m^2K) arazi ortamında yani yapının bulunduğu yerde de belirlenebildiğini göstermiştir (Sayın ve Tavukçuoğlu, 2015; 2016). Bu gelişme EKB verilerine doğrudan gerçek durumu yansıtan ısı verilerin girmesi bakımından oldukça önemlidir. Ancak bu durum tek başına yeterli değildir. Yapı duvarlarına ait ısı performansı gösteren, ısı direnç değeri hakkında doğrudan bilgi veren farklı ısı parametrelerine de ihtiyaç duyulmaktadır. Bu parametrelerden bir tanesi ısı yayınlılık (α , m^2/s) değeridir. ısı yayınlılık değeri malzemenin ısı geçirimsizlik özelliği hakkında bilgi veren önemli bir parametredir. Ancak günümüzde yapı malzemelerinin ısı yayınlılık değerinin doğrudan belirlenmesine yönelik çalışmalar literatürde yok denecek kadar azdır. Var olan çalışmalarda ise malzeme özelliklerinin belirlenmesi ve/veya matematiksel modelleme/çözümleme yoluyla ısı yayınlılık değerinin belirlendiği görülmektedir (Bonacina, 2011; Habib, 2017; Toure ve diğerleri, 2017; Mounir, 2015; Li ve diğerleri, 2018). Malzeme termofiziksel özellikleri tespiti yoluyla ısı yayınlılık değerini belirlemek her zaman kolay değildir. Mevcut yapıların ısı özelliklerini tespit etmek için numune örneğine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu numune örneği de yapıya zarara veren tahripkar bir şekilde elde edilebilir. Similasyon ya da matematiksel çözümleme yoluyla elde edilen verilerde malzemenin hali hazırdaki gerçek durumuna ait ısı özelliğini yansıtmamaktadır. Bu nedenler doğrultusunda yapı malzemelerinin ısı özelliklerini tarifleyen parametrelerin (ısı yayınlılık değeri vb) tahribatsız, kolay ve pratik bir yöntemle doğrudan belirlenmesine ihtiyaç duyulmaktadır.

Bu nedenle yapılan bu tez çalışması ile literatürde ki son gelişmeler ve eksikliği tespit edilen alanlar göz önünde bulundurularak yapı duvarlarının/ duvarları oluşturan yapı malzemelerinin özellikle ısı yayınlılık (α , m^2/s) değerini ve diğer termofiziksel özelliklerini tahribatsız, pratik, hızlı ve kolay bir şekilde belirlenmesi ve böylece literatüre standart bir ölçüm yöntemi kazandırılması planlanmıştır. Bu çalışma ile:-

- duvarların ısıl yayınlılık değerinin (α) kızılötesi ısıl görüntüleme ve sıcak kutu deney yönteminin birleşik kullanımı (KÖİG) ile tahribatsız bir şekilde tespit edilmesi;
- bu kapsamda laboratuvar ortamında yapılan deneylerin arazi ortamına adapte edilmesiyle yapıların yerinde ısıl yayınlılık (α) değerin belirlenmesi için tahribatsız bir analiz yöntemi geliştirilmesi
- farklı kagir dolgu malzemeleri ile inşa edilen duvarların ısıl geçirimlilik özelliklerinin belirlenmesi;
- duvarların sağlam ve ısıl sorunlu bölgelerini tanımlayan yüzey sıcaklık karakteristiklerinin ortaya çıkarılması amaçlanmıştır.

Bu amaçlar doğrultusunda yapılan bu tez çalışması bilim dünyasına yeni bir yöntem kazandırması ve yapıların enerji performans tespitinin nicel, ölçülebilir parametrelerle yapılmasının yolunu açması bakımından oldukça önemlidir. Ayrıca bu çalışmada oluşan alt yapı ve elde edilen bilgiler, enerji verimli yapıların tespiti ve onların denetimi için pratik, yerinde ölçüme imkân veren taşınabilir bir cihazın üretimi ve sonuçların analizi için bir yazılım geliştirilmesine imkan vermektedir.

2. KURAMSAL TEMELLER VE KAYNAK ARAŞTIRMASI

Çalışmanın bu bölümünde deney çalışmasında kullanılan kagir duvar malzemeleri ve bu malzemelerin termofiziksel özelliklerini içeren kuramsal temeller kısaca açıklanmış, çalışmanın asıl amacı olan ısı yayınlılık değeri ve bu değerin belirlenmesinde kullanılan kızılötesi ısı görüntüleme ve sıcak kutu deney yöntemi hakkında bilgi verilmiştir. Bu alanda yapılan çalışmalar incelenmiş ve incelenen çalışmaların bir kısmı bu bölümde özetlenmiştir.

2.1. Kâgir Duvar Dolgu Malzemeleri: Tuğla ve Hafif Beton Kagir Çeşitleri

Günümüzde yapı duvarlarının inşasında kullanılan malzemeler oldukça fazladır. Bunlar arasında en yaygın kullanılan duvar dolgu malzemeleri tuğla, gaz beton ve bims bloktur. Gelişen teknoloji ve çağın ihtiyaçları göz önünde bulundurularak bu duvar dolgu malzemelerinde kendi sınıflarında oldukça fazla türe sahip oldukları görülmektedir. TS EN 771 (2005) standartına göre kagir duvar dolgu malzemeleri 6 başlık altında sınıflandırmıştır:

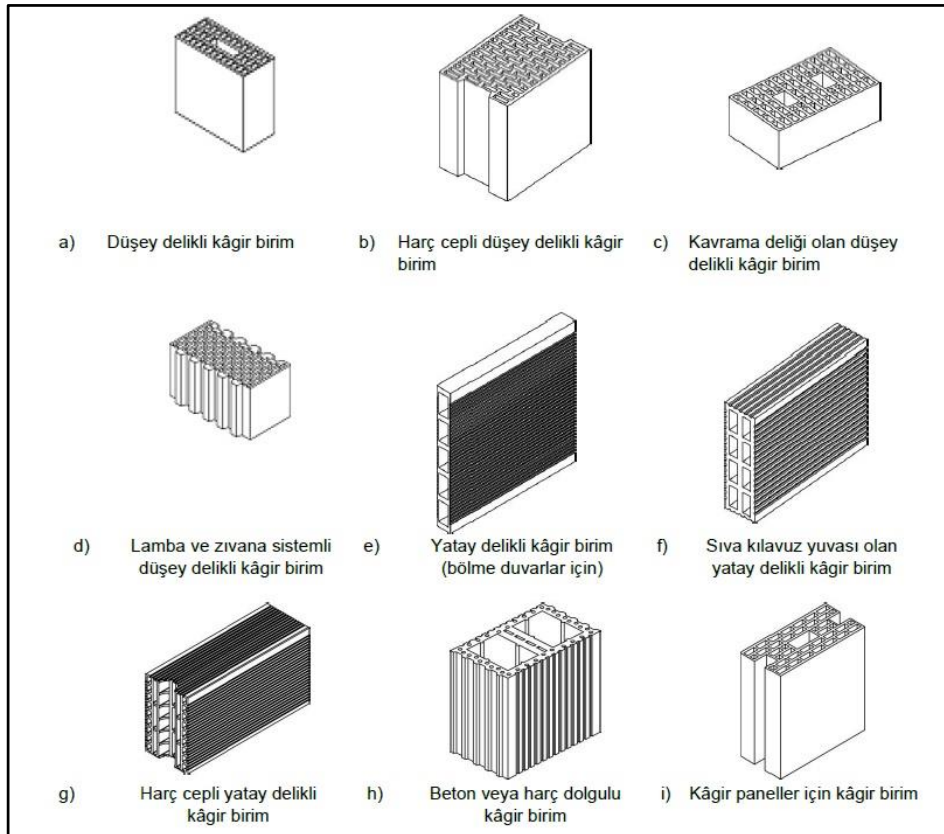
1. Kil kagir birimler
2. Kireç kumtaşı kagir birimler
3. Beton kâgir birimler (yoğun ve hafif agregalı)
4. Gaz beton kagir birimler
5. Yapay taş kagir birimler
6. Doğal taş kagir birimler

2.1.1 Tuğla

Tuğla, kil kagir malzeme grubunda yer alan ve üretim tarihi çok eskiye dayanan bir yapı malzemesidir. Ayrıca literatürde tuğla, kil ve/veya killi topraklardan elde edilen gerektiğinde katkı olarak kum ve/veya başka mineral katkı malzemesi ve su ilave edilerek karıştırılıp kalıplarda şekillendirildikten sonra yüksek sıcaklık altında pişirilerek elde edilen kagir yapı malzemesi olarak ifade edilmektedir (Arslan, 2008; TS EN 771-1-A1,2015; Taymaz, 1992). Tuğlalar üretim sürecinde bir takım işlemlere maruz kalırlar. Öncelikle tuğla üretiminde kullanılan kil su ile karıştırılır. Karışım bir müddet dinlendirildikten sonra karıştırıcılarla

çamur haline getirilir. Elde edilen çamur bilyeli silindirler ile sıkıştırılarak içerisinde bulunan topraklanmalar çözülür. Daha sonra şekil almak üzere kalıplanır ve bir müddet açık havada bekletilerek şekil alması sağlanır. Dinlenen yarı mamul halindeki tuğla fırınlanarak pişirilir. Pişirilme işleminde sonra tuğlalar depolanarak kullanıma hazır hale gelmiş olur (Şimşek, 2007:102-114).

Üretilen tuğlalara ait boyut, şekil ve teknik özellikler TS EN 771-1-A1 standartında belirtildiği şekilde olmalıdır. Günümüzde tuğla sektörü daha fazla ihtiyaca cevap vermek maksadıyla özellikle ısı özellikleri iyileştirilmiş tuğlalar geliştirmiştir (Şekil 2.1). Geliştirilen bu tuğlalarda boyutta, delik yönlerinde, delik şekillerinde ve derz boşluklarının oluşum şeklinde farklılıklar olduğu görülmektedir. Özellikle ısı performans açısından lamba zıvana geçme derzli kagir birimlerin harçlı derzli kagir birimlere göre daha iyi sonuç verdiği bilinmektedir (Koçkar, 2012).

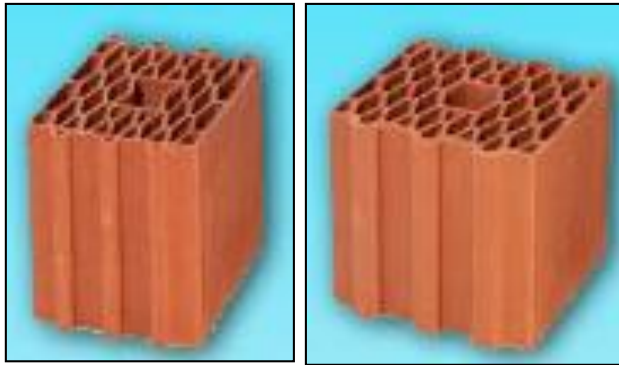


Şekil 2.1. TS EN 771-1 standartında yer alan kagir tuğla türleri

Duvar dolgu malzemesi olarak tuğlanın kullanımı oldukça eskilere dayanmaktadır. M.Ö.3800-4000 yılları arasında Mezopotamya da tuğla kullanıldığı araştırmacılar tarafından

söylenmektedir (E. Çiçek, 2002). Ayrıca günümüze kadar gelen Selçuklu, Bizans ve Osmanlı yapıları gibi birçok tarihi yapıda da tuğla kullanıldığı görülmektedir. Günümüzde de hala tuğlalar duvar dolgu elemanı olarak en çok tercih edilen yapı malzemelerinin başında gelmektedir. Genel olarak tuğlalar kullanıldıkları duvarda işlevlerine göre bölme ve taşıyıcı olmak üzere iki sınıfa ayrılır. Bölme duvarlar mekanları birbirinden ayırmak için kullanılırken, taşıyıcı duvarlar mekanları birbirinden ayırmanın yanında esas olarak yapının yükünü taşımak için kullanılırlar. Tuğlalar genel olarak dolu tuğlalar, düşey delikli tuğlalar, yatay delikli tuğlalar, cephe tuğlası, ateş tuğlası, baca tuğlası ve dekoratif tuğla olarak gruplara ayrılır (Şimşek, 2007:109-112; E. Çiçek, 2002).

Tuğla yapıya zarar vermeyen yapı duvarlarına nefes aldırın özelliğe sahiptir. Buna ilaveten ısı performansları artırmak amacıyla da günümüzde bir takım yenilikçi tuğlalar üretilmektedir. Bunlar üretildikleri firmaların isimleri ile anılan izo tuğla, petekli izo tuğla, lamba zıvana geçmeli izo tuğla, termal tuğla, eko maksı tuğla vb.dir (Kudret tuğla, 2019). Bu tuğlalardan izo tuğla diye adlandırılan tuğlalar yatayda harçlı derz, düşeyde ise lamba zıvana geçme derz kullanılması ile birbirine bağlanmaktadır (Resim 2.1). Düşeyde lamba zıvana geçme derz ile üretilen duvarlar, düşey harçlı derz kullanılarak üretilen duvarlara göre daha iyi ısı performans gösterdiği bilinmektedir (Koçkar, 2012).



Resim 2.1. Kalınlıkları sırasıyla 20 cm ve 25 cm olan düşeyde lamba zıvana geçme derzli petek izo tuğla resmi (Kudret tuğla, 2019)

Yenilikçi tuğlalar grubuna giren bir diğer tuğla ise termal tuğla olarak adlandırılan üzerindeki boşluklar şaşırtmalı olarak bir doğrultu boyunca yalıtım levhaları ile doldurulan tuğlalardır (Resim 2.2). Termal tuğlalar da izo tuğlalar gibi geleneksel düşey delikli tuğlalara göre daha iyi ısı performans göstermektedir (Koçkar, 2012) .



Resim 2.2. Düşeyde boşluklar arasında şaşırtmalı olarak yalıtım malzemesi kullanılan termal tuğla resmi (Kudret tuğla, 2019)

Geleneksel ve yenilikçi tuğlalara ait malzeme termofiziksel özellikleri Çizelge 2.1' de verilmiştir.

Çizelge 2.1. Tuğlaların termofiziksel özellikleri

Malzeme	Tanım	Birim hacim ağırlığı	Isıl iletkenlik değeri	Özgül ısı	Su buhar difüzyon katsayısı
		ρ Kg/m ³	λ W/mK	c kJ/kgK	μ Birimsiz
Düşey delikli tuğla	Normal harç kullanılarak AB sınıfı tuğlarla yapılan duvarlar	550	0,32	1,0	5/10
		600	0,33	1,0	5/10
		650	0,35	1,0	5/10
		700	0,36	1,0	5/10
		750	0,38	1,0	5/10
		800	0,39	1,0	5/10
		850	0,41	1,0	5/10
		900	0,42	1,0	5/10
		950	0,44	1,0	5/10
Düşey delikli tuğlalarla duvarlar	Normal harç kullanılarak W sınıfı tuğlalarla yapılan duvalar	1000	0,45	1,0	5/10
		550	0,22	1,0	5/10
		600-650	0,23	1,0	5/10
		700	0,24	1,0	5/10
		750	0,25	1,0	5/10
		800-850	0,26	1,0	5/10
		900	0,27	1,0	5/10
		950	0,28	1,0	5/10
		1000	0,29	1,0	5/10
Yatay delikli tuğlalarla duvarlar	TS EN 771-1 e uygun	600	0,33	1,0	5/10
		700	0,36	1,0	5/10
		800	0,39	1,0	5/10
		900	0,42	1,0	5/10
		1000	0,45	1,0	5/10

Kaynak: TS 1745, 2004; TSE 825, 2008; TS EN 771-1

2.1.2. Bims blok

Bims blok pomzadan elde edilmiş hafif beton grubunda yer alan bir yapı malzemesidir. Pomza, volkanik patlamalar sonucu oluşmuş hafif ve gözenekli bir yapı taşıdır. Gözenekli yapısı pomzaya yüksek izolasyon yani ısı yalıtkanlık özelliği katmaktadır. Bims beton yapım kuralları, karışım hesabı ve deney metotları standartına göre ise pomza; yoğunluğu 1 g/cm^3 ten küçük Mohs skalasına göre sertlik değeri yaklaşık 6 olan, dağınık boşluklu, sünger görünümlü silikat esaslı ve camsı dokuya sahip volkanik bir malzeme olarak ifade edilmektedir (Bims Raporu, 2006; TS 2511, 2017) Genel olarak pomza iki gruba ayrılır: asidik pomza ve bazik pomza. En yaygın olan pomza türü ise asidik pomzadır. Asidik pomza beyaz ya da kirli beyaz renklidir. Mohs skalasına göre sertliği 5-6 olup, birim hacim ağırlığı $0,5$ ile 1 g/cm^3 arasındadır. Bazik pomza ise kahverengi veya siyah renkli olup, asidik pomzaya göre daha ağırdır. Bazik pomzanın Mohs skalasına göre sertliği 5- 6 iken birim hacim ağırlığı ise 1 ile 2 g/cm^3 arasındadır (Uzun, 2008). Türkiye’de kullanılan pomza kayaçlarının bazı termofiziksel özellikleri Çizelge 2.2’de verilmiştir.

Çizelge 2.2. Türkiye ‘de kullanılan pomza kayaçların termofiziksel özellikleri

Termofiziksel özellikler	
K.B Hacim Ağırlığı (g/cm^3)	0,32 – 0,97
Gerçek Özgül Ağırlığı (g/cm^3)	2,15 - 2,65
Porozite (%)	45 - 90
Rötre (mm/m)	< 1
Isı letkenlik Katsayısı (W/mK)	0,08 – 0,20
Isınma Isısı ($\text{cal /g}^\circ\text{C}$)	0,24 – 0,28
Ses Yalıtımı (dB)	40 – 55
Su Emme (Ağırlıkça %)	30 – 70
Buhar Diffüzyon Katsayısı	5 – 10
Kaynak: Bims Raporu, 2006	

Bims blok Türkiye’de yaygın olarak üretilen ve kullanılan yapı malzemelerinden birisidir. Genellikle İç Anadolu bölgesinde bulunan Nevşehir ili civarında üretimi yaygın yapılır. Pomza Türkiye de en çok yapı sektöründe kullanılmaktadır. Türkiye de yapı sektöründe pomza kullanım alanlar şöyledir (Özkan ve Tuncer, 2001):

1. Hafif yapı elemanı üretiminde
2. Prefabrike yapı elemanı üretiminde
3. Çatı ve dekoratif kaplama elamanlarında
4. Hafif hazır sıva ve harç üretiminde
5. Hafif beton üretiminde
6. Çatı ve döşeme izolasyon dolgusu

Hafif yapı elemanı olarak bims blok daha çok yapı dış duvarlarında tercih edilmektedir. Ancak farklı kullanım yerlerinde karşılaşılmaktadır. Resim 2.3’de verilen bims kagirler genel olarak sınıflanacak olursa ;

1. Tuğla bims kagirler: dolu bims tuğla, boşluklu bims tuğla, özel amaçlı bims tuğla
2. Boşluklu bims kagirler: dikdörtgen sıra, oval sıra ve karma sıra boşluklu bims kagirler
3. Boşlukları dolgulu bims kagirler: sandviç bims kagir ve dolgusu kesintisiz bims kagir
4. Özel yarıklı bims kagirler
5. Dolu bims kagirlar: dolu duvar bims kagir, açılı köşe örgüsü bims kagir, L tipi köşe örgüsü bims kagir
6. U tipi bims kagirlar: normal, içten yalıtımlı ve güçlendirilmiş u tipi bims kagir
7. Yanak kaplamalı bims kagirler
8. Peyzaj bims kagirlar: halka delikli ve yarım halka delikli bims kagir
9. Döşeme levhası bims kagirlar: taban, tavan, çatı döşeme levhası bims kagir yalıtım levhası bims kagir
10. Donatısız lento bims kagirlar: düz ve kemer lento bims kagir
11. Asmolen bims kagirlar: düz asmolen, normal tavan asmolen ve filigram asmolen kagir olarak sınıflandırılabilir (Bims raporu, 2006)



Resim 2.3. Boşluklu bims kagir ürünlerden örnek görüntüler (Bims Raporu, 2006)

Bims kagirlar yatayda harç malzeme kullanılarak birbirlerine bağlanırken, düşeyde bims blok türüne göre lamba zıvana geçmeli ya da harç cepli birleşim deteyleri ile bağlanmaktadır. Bims bloğun türüne göre, ısı ve ses yalıtım özelliğini artırmak amacıyla boşluk yapısında değişiklik görülebilmektedir. Bütün bu değişiklikler standartların izin verdiği ölçüde firmaların ürün özelliklerini iyileştirmek amacıyla yaptıkları ARGE çalışmaları sonucu ortaya çıkmaktadır. Genel olarak Türkiye’de üretilen hafif beton kagirlar grubunda yer alan bims blok ürünlere ait termofiziksel özellikler Çizelge 2.3’de verilmiştir.

Çizelge 2.3. Bims blok malzemeye ait termofiziksel özellikler

Malzeme	Tanım	Birim hacim ağırlığı	Isıl iletkenlik değeri	Özgül ısı	Su buhar difüzyon katsayısı
		ρ Kg/m ³	λ W/mK	c kJ/kg.K	μ Birimsiz
Bims blokDuvar Kagirları	Doğal bims betondan dolu kagirlarla yapılan duvarlar (TS EN 771-3’e uygun DDB türü kagirlarla, kuvars kumu katılmaksızın yapılmış)	450	0,28	1,0	5/10
		500	0,29	1,0	5/10
		550	0,30	1,0	5/10
		600	0,31	1,0	5/10
		650	0,32	1,0	5/10
		700	0,33	1,0	5/10
		800	0,36	1,0	5/10

Çizelge 2.3. (devam) Bims blok malzemeye ait termo fiziksel özellikler

TS EN 998-2'ye uygun ve yoğunluğu 1000 kg/m ³ 'ün altında olan harç kullanılarak doğal bims betondan dolu kagırlarla yapılan duvarlar (TS EN 771-3'e uygun DDB türü kagırlarla, kuvars kumu katılmaksızın yapılmış)	900	0,39	1,0	5/10
	450	0,23	1,0	5/10
	500	0,24	1,0	5/10
	550	0,25	1,0	5/10
	600	0,26	1,0	5/10
	650	0,27	1,0	5/10
	700	0,28	1,0	5/10
	800	0,30	1,0	5/10
	900	0,32	1,0	5/10
	1000	0,35	1,0	5/10
Kuvars kumu katılmaksızın doğal bimsle yapılmış betondan özel yarıklı dolu duvar kagırlarıyla yapılan duvarlar (TS EN 771-3'e uygun SW türü kagırlarla)	450	0,18	1,0	5/10
	500	0,20	1,0	5/10
	550	0,21	1,0	5/10
	600	0,22	1,0	5/10
	650	0,23	1,0	5/10
	700	0,25	1,0	5/10
	800	0,27	1,0	5/10
	900	0,30	1,0	5/10
	1000	0,32	1,0	5/10
Kaynak: TS 1745,2004; TSE 825,2008; TS EN771-4				

2.1.3. Gaz beton

Gaz beton, hafifletilmiş bir yapı elemanıdır. Gaz beton; ince öğütülmüş silisli bir agregası ve inorganik bir bağlayıcı madde (kireç/çimento) ile hazırlanan karışıma, gözenek oluşturu bir malzeme eklenmesi ile hafifletilmesi ve bu karışımın buhar küreyle sertleştirilmesi ile oluşturulan gözenekli hafif beton olarak tanımlanmaktadır (TS 453, 2006).

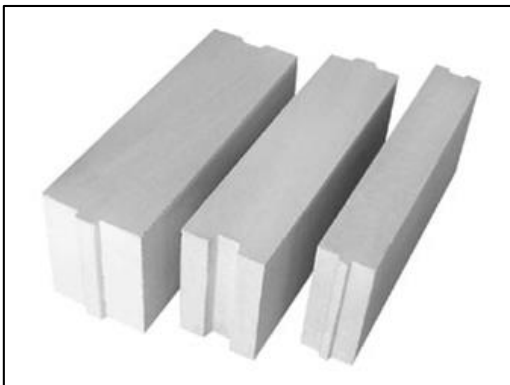
Gaz betonun endüstrileşmiş üretiminde, genellikle silisli agregalar kullanılmaktadır. Bu agregalar silisçe zengin olan kuvarsit kum veya uçucu küldür. Malzemeyi hafifletmek amacıyla kullanılan gözenek oluşturu mazleme ise alüminyum tozu veya alüminyum macunu kullanılmaktadır (Çimentaş, 1998). Gaz betonun hacimsel olarak yaklaşık % 70-80 gözeneklerden oluşur. Bu nedenle ısı iletkenliği diğer kagir duvar malzemelerine göre en düşük yapı malzemesidir. Aynı zamanda yüksek gözenekliği sayesinde diğer duvar dolgu malzemesine göre düşük yoğunluğa sahiptir (Wakili ve diğerleri, 2015). Üretildikleri malzemelerin özelliklerine göre yoğunluğu 93-1800 kg/m³ arasında değişmektedir (Narayanan, 2000; Kreft, 2011). Düşük yoğunluğa sahip gaz betonlar, düşük ısı iletkenliğe sahip olduklarından ısıya ve yangına karşı dirençleri iyidir. Yangına karşı dayanımı da A1 diye adlandırılan hiç yanmaz sınıfta yer almaktadır. Üretilen az betonlara ait boyut, şekil ve teknik özellikleri TS-EN 771-4 standardına standartında belirtildiği şekilde olmalıdır. Gaz beton duvar kagırları genel olarak iki sınıfta incelenir. Bunlar düz duvar kagırları ve geçmeli duvar kagırlarıdır (AKG, 2019).

Düz duvar kagırları kendi içinde G2 ve G4 diye iki farklı sınıfa ayrılır. G2 kodlu gaz beton sınıfı bölme duvar olarak kullanılacak yoğunluğu düşük, G4 kodlu gaz beton sınıfları ise taşıyıcı duvar olarak (yığma binalarda) kullanılacak yoğunluğu yüksek gaz betonları ifade etmektedir. Aşağıda Resim 2.4’de farklı kalınlıklarda üretilen düz gaz beton duvar kagırlarına ait görüntü verilmiştir.



Resim 2.4. Farklı kalınlıklara sahip gaz beton düz duvar kagırlarının görüntüsü (AKG, 2019)

Geçmeli gaz beton duvar kagırları ise TS EN 771-4 (2000) standartlarına uygun üretilen, düz duvar kagırları gibi bina duvarlarında kullanılır. Harçlı düşey derzlerde meydana gelen ısı köprülerini azaltmak için düşeyde lamba zıvana geçmeli derz uygulaması yapılır (Koçkar 2012). Geçmeli gaz beton duvar kagırlarında da düşeyde derzlerde tutkal uygulamasına gerek kalmadan birleşimlerin geçmelerle yapılması sağlanır. Böylece hem uygulama hızı artar, hem tutkal tüketimi azalır hem de ısı köprüleri önlenmiş ya da en aza indirilmiş olur (AKG gaz beton web, 2019). Aşağıda Resim 2.5’de farklı kalınlıklarda üretilen geçmeli gaz beton duvar kagırlarına ait görüntü verilmiştir.



Resim 2.5. Farklı kalınlıklara sahip gaz beton geçmeli duvar kagırlarının görüntüsü (AKG, 2019)

Gaz beton duvar kagirlarının uygulamasında genellikle gaz beton için özel üretilen yapıştırma harcı ya da yapıştırma tutkalı denilen derz dolgu malzemesi kullanılmaktadır. Bu malzeme TS EN 998–2 standardına uygun olarak hazırlanmaktadır. Bu malzemeden düz duvar kagirlarında yatay ve düşey, geçmeli duvar kagirlarında ise sadece yatay derzlere ince bir tabaka halinde uygulanmaktadır. Kullanılacak gaz beton kalınlığına göre 1 m² lik duvar yüzeyine uygulanacak tutkal miktarı değişmektedir ve kullanım için gerekli tutkal miktarı ürün ambalajında belirtilmektedir (AKG, 2019). Gaz beton ve yapıştırma harcına ait teknik özellikleri Çizelge 2.4’ de verilmiştir.

Çizelge 2.4. Gaz betona ait termofiziksel özellikler

Malzeme	Tanım	Birim hacim ağırlığı	Isıl iletkenlik değeri	Özgül ısı	Su buhar difüzyon katsayısı
		ρ Kg/m ³	λ W/mK	c kJ/kg.K	μ Birimsiz
Gaz Beton Duvar Kagirları	Normal derz kalınlığında ve normal harçla yerleştirilmiş kagirlarla yapılan duvarlar	400	0,20	1,0	5/10
		450	0,21	1,0	5/10
		500	0,22	1,0	5/10
		550	0,23	1,0	5/10
		600	0,24	1,0	5/10
		650	0,25	1,0	5/10
		700	0,27	1,0	5/10
		8000	0,29	1,0	5/10
	TS EN 998-2’ye uygun ve yoğunluğu 1000 kg/m ³ ’ün altında olan harç kullanılarak veya özel yapıştırıcısı ile yerleştirilmiş gaz beton kagirlarla yapılan duvarlar	350	0,11	1,0	5/10
		400	0,13	1,0	5/10
		450	0,15	1,0	5/10
		500	0,16	1,0	5/10
		550	0,18	1,0	5/10
		600	0,19	1,0	5/10
		650	0,21	1,0	5/10
		700	0,22	1,0	5/10
		750	0,24	1,0	5/10
		800	0,25	1,0	5/10

Kaynak: TS 1745, 2004; TSE 825, 2008; TS EN 771-4,2000

2.2. Tuğla ve Hafif Beton Kagirların Termofiziksel Özellikleri

Bu kısımda duvarlarda dolgu amaçlı kullanılan kagir birim malzemelerin; birim hacim ağırlık (ρ), ısı iletkenlik hesap değeri (λ), özgül ısı (c), ısı nüfuz katsayısı (e), özgül ısı depolama kapasitesi (VHC), ısı geçirgenlik direnci (R), toplam ısı geçirgenlik direnci (R_T), ısı akış yoğunluğu (q), ısı geçirgenlik katsayısı (U) gibi termofiziksel özellikleri ve ısı sorunlu bölgeler hakkında fikir veren ısınma hızı (R_w) ve sıcaklık indeksi (TI) gibi ısı parametreleri kısaca açıklanmıştır. Bu başlıkla ilgili literatürde yapılan çalışmaların bir kısmı özetlenmiştir.

Birim Hacim Ağırlık

Bir cismin kütlesinin (m), hacmine (V) oranına birim hacim ağırlık denir (RILEM, 1980). Birim hacim ağırlık ile ısı performans arasında ters bir ilişki vardır. Birim hacim ağırlığı yüksek olan malzemelerin ısı iletkenlikleri yüksek ve ısı dirençleri düşüktür (Goulart, 2004; Hoffmann ve Niesel, 1996; Cook, 1978; Langlais ve diğerleri, 1994). Birim hacim ağırlık “ ρ ” ile gösterilir. Birim hacim ağırlık; ısı dağılım, ısı iletkenlik hesap değeri ve özgül ısı gibi termofiziksel özellikleri bilinen malzemeler için aşağıda verilen “Eş.2.1” ile hesaplanmaktadır (Wikipedia, 2019).

$$\rho = \frac{e^2}{\lambda c} \quad (2.1)$$

Burada; e : ısı nüfuz katsayısı (termal efuzivite) ($\text{W/s}^{1/2}\text{m}^2\text{K}$), λ : Isı iletkenlik hesap değeri (W/mK) ve c : özgül ısı değerini (J/kgK) ifade eder.

Yoğunluğu düşük olan malzemeler daha gözenekli ve boşluklu bir yapıya sahiptirler. Bu nedenle ısı dirençleri daha iyidir. Isı özellikleri tahmin edilemeyen malzemelerin yoğunlukları ise kütlenin hacme bölünmesiyle elde edilmektedir.

Isı iletkenlik hesap değeri

Isı direncin hesaplanmasında kullanılan ve her bir malzeme için belirlenmiş bir katsayıdır. Isı iletkenlik bir malzemenin ısıyı iletme yeteneğidir (Çengel, 2011:19). Her bir malzemenin ısı iletkenliği farklıdır. Paralel iki yüzey arasındaki sıcaklık farkı 1°C olduğu zaman birim zamanda birim alandan dik yönde geçen ısı miktarıdır (Candan, 2007). Yani bir malzemenin ısı iletkenlik hesap değeri o malzemenin birim kalınlığından, birim alan ve birim sıcaklık farkı başına ısı transfer hızı olarak ifade edilmektedir (Çengel, 2011:19). Isı iletim hesap değerinin birimi “ W/mK ” dir ve “ λ ” ile gösterilir. Isı iletkenlik hesap değeri aşağıda verilen “Eş. 2.2” ile elde edilmektedir (BS EN ISO 8990:1996; TS 825, 2008; BS EN 12664, 2001).

$$\lambda = \frac{d}{R} \quad (2.2)$$

Burada; **d**: Deney numunesinin kalınlığını (m), **R**: Isıl direnci (m^2K/W) ifade eder.

Bir malzemenin ısı iletkenlik hesap değeri yüksek ise o malzemenin kötü bir yalıtkanlığa ya da iyi bir ısı iletkenliğe, düşük ise iyi bir ısı yalıtkanlığa yani kötü bir ısı iletkenliğe sahip olduğu söylenebilir (Çengel, 2011:20). Türkiye’de kullanılan bazı yapı malzemelerine ait TS 825 (2008) Binalarda Isı Yalıtımı Kuralları standartında verilen ısı iletkenlik hesap değerleri şekilde Çizelge 2.5’de verilmiştir.

Çizelge 2.5. Bazı yapı malzemelerine ait ısı iletkenlik hesap değerleri

Malzeme	Isıl iletkenlik hesap değeri
	(λ , W/mK)
Mermer	3,50
Alçı taşı	2,30
Kireç harcı, kireç-çimento harcı	1,00
Çimento harcı	1,60
Beton	2,50
Gaz beton	0,20
Düşey delikli tuğlalarla yapılan duvarlar	0,32
Yatay delikli tuğlalar yapılan duvarlar	0,33
Ahşap kontrplak	0,13
EPS	0,035
XPS	0,030
Cam yünü	0,035
Taş yünü	0,035

Özgöl ısı

Belirli bir sıcaklık ortamında, bir maddenin birim kütlesinin sıcaklığını bir derece arttırmak için gerekli olan enerji miktarıdır. Spesifik ısı kapasitesi, bir malzemenin ısıyı saklama yeteneğini yansıtır. Yöntem, iki denge durumu arasındaki enerji dengesinin çalışılmasını içerir (Sassine ve diğerleri, 2017). Özgöl ısı “c” ile gösterilir. İki türlü özgöl ısı vardır. Bunlardan bir tanesi hacmi sabit tutulan bir maddenin birim kütlesinin sıcaklığını bir derece arttırmak için gerekli olan enerji ile ifade edilen *sabit hacimde özgöl ısıdır* ve “Cp” ile gösterilir. İkincisi ise basınç sabit tutularak bir maddenin birim kütlesinin sıcaklığını bir derece arttırmak için gerekli olan enerji ile ifade edilen *sabit hacimde özgöl ısıdır* ve “Cv” ile gösterilir (Çengel, 2011:7). Katı ve sıvı haldeki maddeler için sabit basınç ve sabit hacim özgöl ısıları aynıdır. Bu nedenle $C_p=C_v=C$ olarak tarif edilebilir (Çengel, 2011:8). Özgöl ısı kapasite birimi genellikle “J/kgK” olarak kullanılır (P. Çiçek, 2009; TS 4048, 2013).

Literatürde yapı malzemelerinin termofiziksel özelliklerin belirlenmesine yönelik bir takım çalışmalar mevcuttur. Bu termofiziksel özelliklerden bir tanesi de özgül ısı değeridir. Yapılan çalışmalar da gaz beton, tarihi tuğla vb yapı malzemelerine ait özgül ısı değerleri Çizelge 2.6’ da verilmiştir.

Çizelge 2.6. Yapı malzemelerine ait 24 °C ortalama sıcaklıkta verilen özgül ısı değerleri

Malzeme	Kalınlık mm	Özgül kütle kg/m ³	Özgül ısı kJ/Kg.K	Kaynakça
Tuğla (ateş tuğlası)	-	1920	0,79	ASHRAE,1993;Çengel,2011
Hafif Agregalar	-	1600-1280	0,84	ASHRAE,1993;Çengel,2011
Çimento sıva: kum agrega	19	1860	0,84	ASHRAE,1993;Çengel,2011
Alçı sıva: kum agrega	13	1680	0,84	ASHRAE,1993;Çengel,2011
Alçı sıva: perlit agrega	-	720	1,34	ASHRAE,1993;Çengel,2011
Asbest çimento levha	6	1922	1,00	ASHRAE,1993;Çengel,2011
Alçıpan	10	800	1,09	ASHRAE,1993;Çengel,2011
Kontrplak	6-20	545	1,21	ASHRAE,1993;Çengel,2011
Yer karosu	-	-	1,26	ASHRAE,1993;Çengel,2011
Asbest bağlayıcı kiremit	-	1900	1,00	ASHRAE,1993;Çengel,2011
Bitümlü kiremit	-	1100	1,26	ASHRAE,1993;Çengel,2011
Sert ağaçlar (meşe vb)	-	721	1,26	ASHRAE,1993;Çengel,2011
Yumuşak ağaçlar (köknar)	-	513	1,38	ASHRAE,1993;Çengel,2011
Alüminyum (1100)	-	2739	0,896	ASHRAE,1993;Çengel,2011
Demir (yumuşak)	-	7833	0,502	ASHRAE,1993;Çengel,2011
Demir (paslanmaz)	-	7913	0,456	ASHRAE,1993;Çengel,2011

Isıl nüfuz katsayısı (termal efuzivite)

Malzemelerin ısıl dağılımı olarak adlandırılan termal efuzivite bir malzemenin ısıyı emme ve bırakma kapasitesini gösterir. Isıl dağılım değeri bir malzemenin ısıl verimliliğini ifade eder. Isının bir malzeme yüzeyinde ne kadar kolay emilebileceğini tanımlar. Homojen bir malzemenin ısıl nüfuz katsayısı, ısıl iletkenlik hesap değeri, birim hacim ağırlığı ve özgül ısısının karekökü olarak tanımlanır. Bir malzemenin ısıl verimliliği hem ısıl iletkenlik hesap değeri hem de özgül ısı depolama kapasitesi yüksek olduğunda daha yüksektir (Goulart, 2004). Isıl verimliliği yüksek olan malzemeler yavaş ısınır aynı zamanda yavaş soğur. Bu malzemeler ısıl kütleleri yüksek olan malzemelerdir. Örneğin metal ısıl dağılım bakımından iyi olan bir malzeme değildir. Çünkü ısıyı depolamaz çabuk ısınır ve çabuk soğur. Aksine, kil veya taş gibi yüksek ısıl ataletli olan malzemelerin ısıl dağılımleri metale göre daha iyidir ve ısıyı kütlelerinde çok daha uzun süre tutabilirler. Isıl nüfuz katsayısı “e” ile gösterilir ve” Eş.2.3” ile hesaplanır. Birimi “W /s^{1/2}m²K” dir.

$$e = \sqrt{\rho \cdot \lambda \cdot c} \quad (2.3)$$

Burada; ρ : Birim hacim ağırlığı (kg/m^3), λ : ısı iletkenlik hesap değerini (W/mK) ve c : özgül ısı değerini (J/kgK) ifade eder.

Özgöl ısı depolama kapasitesi

Bir malzemenin birim hacim başına ısı kapasitesinin ne kadar olduğunu gösteren bir ölçüdür. Özgöl ısı depolama kapasitesi “VCH (volumetric heat capacity)” ile gösterilmiştir. Bir malzemenin birim hacim ağırlığı ile özgül ısısının çarpına eşittir (Goulart, 2004). Özgöl ısı depolama kapasitesi “Eş. 2.4” ile hesaplanmaktadır. Birimi “ $\text{J/m}^3\text{K}$ ”dır.

$$VCH = \rho \cdot c \quad (2.4)$$

Burada; ρ : Birim hacim ağırlığı (kg/m^3) ve c : özgül ısı değerini (J/kgK) ifade eder.

Isıl geçirgenlik direnci

Deney numunesindeki yapı bileşeninin kalınlık değerinin (d), aynı yapı bileşenine ait ısı iletkenlik hesap değerine (λ) bölünmesiyle elde edilen bir ısı parametredir, birimi “ $\text{m}^2\text{K/W}$ ” dir (TS 825, 2008). Yapı duvarının ısı iletimine karşı gösterdiği direnci ifade eder. Isıl direnç, geometrik şekle ve ısı özelliklere bağlıdır (Çengel, 2011:137). Tek katmanlı yapı bileşeninin ısı iletkenlik direnci “ R ” ile gösterilir ve “Eş. 2.5” ile hesaplanır.

$$R = \frac{d}{\lambda} \quad (2.5)$$

Burada λ : Isı iletkenlik hesap değeri (W/mK), d : deney numunesinin kalınlığını (m) ifade eder.

Toplam ısı iletkenlik direnci

Farklı malzemelerden oluşmuş çok katmanlı düzlem duvarlarda hesaplanır (Çengel, 2011:137). Yapı duvarının her tabakasının ayrı ayrı hesaplanan ısı iletkenlik dirençlerine,

yüzeysel ısı iletim direnci yani diğer bir ifade ile ısıtım direnci değerleri (R_i ve R_e) eklenerek bulunan toplam direnç değeridir (TS 825, 2008; TS EN ISO 6946, 2007; Çengel, 2011:137). Toplam ısı geçirgenlik direncinin birimi “ m^2K/W ” dir. Toplam ısı direnç ne kadar yüksek olursa, ısı akış hızı düşer ve duvar yalıtımı o kadar iyi olur (Hens, 2007; P. Çiçek, 2009) Çok katmanlı yapı bileşenlerinin ısı geçirgenlik direnci “ R_T ” ile gösterilir ve “Eş. 2.6” ile hesaplanır (TS 825, 2008; TS EN ISO 6946, 2007).

$$R_T = R_i + R_1 + R_2 + R_3 + \dots + R_n + R_e \quad (2.6)$$

Burada **R_i** : İç yüzey ısı iletim direnci (m^2K/W) , **$R_1, R_2, \dots, R_n$** : Yapı bileşenlerinin ısı iletim direnci (m^2K/W) ve **R_e** : Dış yüzey ısı iletim direncini (m^2K/W) ifade eder.

Yapı elemanlarının toplam ısı direnci hesaplamalarında taşınım ısı iletiminden etkilenilir. Bu sebeple TS 825’ de verilen yapı elemanlarının iç ve dış yüzeylerindeki yüzeysel ısı iletim direnç (R_e ve R_i) değeri kullanılır (TS 825, 2008).

Yüzeysel ısı iletim direnci (taşınım direnci)

Yapı elemanlarının iç ve dış yüzeylerindeki yüzeysel ısı iletim direnç değerlerini ifade eder. Taşınım direnci olarak da ifade edilir. Taşınım direnci “Eş. 2.7” ile hesaplanır.

$$R_{tasımsı} = \frac{1}{h.As} \quad (2.7)$$

Burada, **h** : taşınım katsayısı, **A** : alan (m^2) ifade eder.

Taşınım ısı transfer katsayısının çok büyük olduğu zamanlarda taşınım direnci sıfır (0) olacaktır. Yani bu durumda yüzey taşınım direnç göstermeyeceği için ısı tranferi işlemi yavaşlamamış olacaktır (Çengel, 2011:134). Yapılan çalışmalarda iç yüzey ısı iletim (R_i) ve dış yüzey ısı iletim direnci (R_e) değerleri için TS 825 verileri kullanılmaktadır. Bu değerler Çizelge 2.7’de verilmiştir.

Çizelge 2.7. TS 825 standartında verilen yüzeysel ısı iletim (taşıma) direnç değerleri

Sıra No	Yapı bileşeni tipi ³⁾	Yüzeysel iletim direnci ^{1) 2)}	
		R _i (m ² K / W)	R _e (m ² K / W)
1	Dış duvar (Sıra no 2 'de verilenin dışındaki dış duvarlar)	0,13	0,04
2	Arkadan havalandırılan giydirmce cephe ⁴⁾ dış duvarlar, ısı yalıtımı yapılmayan tavan arasını ayıran alçak duvarlar		0,08
3	Daireler arasındaki ayırıcı duvarlar, merdiven duvarı, farklı kullanım amaçlı çalışma odalarını ayıran duvarlar, sürekli olarak ısıtılmayan mekânlara bitişik bölme duvarı, ısı yalıtımlı tavan arasına bitişik alçak duvar		5)
4	Toprak temaslı dış duvar		0
5	Bir yaşama mekânının dış hava ile sınırını oluşturan yatay veya eğimli, yukarıda yer alan (havalandırılmayan çatı) tavan veya çatı	0,13	0,04
6	Kullanılmayan bir tavan arası veya havalandırılan bir mekân altındaki tavan (havalandırılan çatı kabuğu)		0,08
7	Daireler arası ayırıcı taban veya farklı kullanım amaçlı çalışma odalarını ayıran taban		
7.1	Aşağıdan yukarıya ısı akışı olması hâlinde	0,13	5)
7.2	Yukarıdan aşağıya ısı akışı olması hâlinde	0,17	
8	Bodrum tavanı	0,17	5)
9	Bir yaşama mekânının dış hava ile sınırını oluşturan çıkma tabanları		0,04
10	Altında bodrum olmayan bir yaşama mekânının zemine oturan tabanı		0

1) Basitleştirmek amacıyla bütün durumlarda R_i =0,13 m²K/W ve 4 ve 10'uncu sıradaki durumlar hariç olmak üzere R_e = 0,04 m²K/W değerleri hesaplamalarda kullanılabilir.

2) Yapı elemanlarından buhar geçişinin tahkiki ve sınırlandırılması ile ilgili hesaplamalarda kullanılacak olan iç ve dış yüzeysel ısı iletim direnci için Madde 2.4.6'ya bakınız.

3) Yapı bileşenlerinin bina üzerindeki konumları için Şekil 1 'e bakınız.

4) Hava boşluklu sandviç duvarlarda Sıra no 1 'de verilen değerler kullanılır.

5) Yapı bileşeninin iç mekânda yer alması durumunda, hesaplamalarda iç ve dış yüzey ısı iletim direnç değerleri aynı kabul edilmelidir.

Isı akış yoğunluğu

Isıl geçirgenlik katsayısının sıcaklık farkıyla çarpılmasıyla elde edilir ve birimi “W/m²” dir. Termodinamikte ısı akışı, ısı transferi doğrultusuna dik yönde birim alan başına gelen ısı transferi hızına denilmektedir. Isı akışı hem zamana hem de yüzeyin konumuna göre değişebilmektedir (Çengel, 2011:136). Isı akış yoğunluğu “q” ile gösterilir ve “Eş. 2.8” ile hesaplanır (TS 825, 2008).

$$q = U \times \Delta T \quad (2.8)$$

Burada; **U**: Yapı bileşenlerinin toplam ısı geçirgenlik katsayısı (W/m²K), **ΔT**: Sıcak ve soğuk taraf ortam sıcaklığı arasındaki fark (°C) ifade eder.

Isı geçirgenlik katsayısı

Tek tabakalı ve çok tabakalı yapı bileşenleri için hesaplanabilir. Hem tek tabakalı yapılarda hem de çok tabakalı yapılarda bir (1) sayısının toplam ısı dirence bölünmesiyle yani 1/R_T

ile elde edilir (TS 825, 2008). Isı geçirgenlik yapının enerji performansı ile doğrudan ilişkilidir. Isı geçirgenlik katsayısı “U” ile gösterilir. Birimi “W/m²K” dir. Düşük U değerine sahip yapıların yüksek U değerine sahip yapılara göre daha iyi ısı yalıtımına ve yüksek enerji korunumuna sahip oldukları bilinmektedir. U değeri TS 825’de tariflendiği şekliyle aşağıda “Eş. 2.9” verilen formül ile hesaplanır.

$$U = \frac{1}{R_{si} + \frac{d_1}{\lambda_1} + \dots + \frac{d_n}{\lambda_n} + R_{se}} \quad (2.9)$$

Burada ***R_{si}***: İç yüzey ısı iletim direnci (m²K/W), ***R_{se}***: Dış yüzey ısı iletim direnci (m²K/W), ***d_n***: Malzeme kalınlığı (m), ***λ_n***: Malzeme ısı iletkenlik hesap değerini (W/mK) ifade eder.

Isınma hızı

Isınma hızı bir yüzeyin ne kadar sürede ısındığını yani ısınma artışının zamana bağlı olarak ne kadar sürede olacağını anlatan ısı karakteristiktir. Duvar yüzeyinde ki sağlam ve sorunlu bölgelerin (ısı köprüsü, yoğunlaşma, hava kaçağı vb ısı problem olan) tespitinde kullanılmaktadır (Tavukçuoğlu ve diğerleri, 2010; Koçkar, 2012; Tuğla ve diğerleri 2013, 2016, 2018). Isınma hızının “R_w” ile gösterilir ve birimi “°C/s^{1/2}” dir.

Sıcaklık indeksi

İç yüzey sıcaklığı ve dış ortam arasındaki farkın, iç ve dış ortam sıcaklık farklarına bölünmesiyle elde edilen ve sıcaklık performansı hakkında bilgi veren bir parametredir (ASTM STP 718, 1980). Sıcaklık indeksi bir yapı malzemesinin yalıtımlı/ yalıtımsız ya da iyi /kötü yalıtımlılık durumlarını belirlemek için kullanılır (ASTM STP 718, 1980; Koçkar, 2012; Tuğla ve diğerleri, 2013, 2016). Sıcaklık indeksi “TI” ile gösterilir ve “birimsiz”dir.

Literatürde yapı malzemelerinin termofiziksel özelliklerin belirlenmesine yönelik yapılan çalışmaların bir kısmı kısaca özetlenmiştir.

Habib ve diğerleri (2017) yaptıkları çalışmalarında üç farklı yoğunluğa sahip kil kagir tuğla malzeme kullanmışlardır. Yapılan bu çalışmada kullanılan kilerin yoğunlukları sırasıyla

düşük (1000 kg/m^3), orta (1700 kg/m^3) ve yüksek (2400 kg/m^3) yoğunlukludur. Çalışmada özgül ısı değerinin tuğlalar için 1000 J/kgK olarak bulunduğu ve yoğunluğa göre değişmediği görülmüştür. Isıl iletkenlik hesap değeri ise düşük, orta ve yüksek yoğunluklu kil malzemeler için sırasıyla $0,27 \text{ W/mK}$; $0,51 \text{ W/mK}$ ve $0,84 \text{ W/mK}$ iken; ısı yayınlılık değeri sırasıyla $0,27 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$; $0,30 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ ve $0,35 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ olarak belirlenmiştir. Burada ısı iletkenlik hesap değerinin yoğunluk arttıkça arttığı ancak ısı yayınlılık değerininin yoğunluğa göre fazla artış göstermediği anlaşılmaktadır (Habib ve diğerleri, 2017).

Toure ve diğerleri (2017) çalışmalarında kırmızı kil, kum ve çimento karışımının farklı oranlarda kullanımı ile beş farklı tuğla üzerine mekanik ve ısı karakterizasyon çalışması yapmışlardır. Isıl kapasite ve ısı iletkenlik hesap değerleri sıcak plaka (hot plate) yöntemi ile belirlenmiştir. Üretilen tuğlaların ısı iletkenlik hesap değerleri $0,72\text{-}0,81 \text{ W/mK}$ arasında bulunmuştur (Toure ve diğerleri, 2017).

Mounira ve diğerleri (2015) çalışmalarında kompozit malzemelerin ısı yayınlılık (termal difusivite) değerini, ısı dağılım (efusivite) değerini ve ısı iletkenlik hesap değerini sıcak plaka (hot plate) ve lazer flaş yöntemleri ile belirlemeyi amaçlamışlardır. Çalışma sonunda malzemeler ısı yayınlılık, ısı dağılımı değeri ve ısı performansına göre değerlendirilmiştir (Mounir ve diğerleri, 2015).

Bonacina ve diğerleri (2011) çalışmalarında farklı yoğunluklara sahip gaz betonların yüksek sıcaklıktaki ısı iletkenlik hesap değerini ve hacimsel özgül ısılarını araştırmışlardır. Bu çalışmada ısı özellikleri (ısı iletkenlik hesap değeri ve termal difusivite) sıcak disk (hot disk) metodu ile belirlenmiştir. Bu yöntemle $20 \text{ }^\circ\text{C}$ sıcaklıkta 350 kg/m^3 ve 450 kg/m^3 yoğunluğunda olan gaz betonlar için sırasıyla ısı iletkenlik hesap değeri $\lambda=0,125\text{-}0,147 \text{ W/mK}$ ve ısı yayınlılık değeri $\alpha=0,356 \times 10^{-6}\text{-}0,354 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ olarak belirlenmiştir (Bonacina ve diğerleri, 2011).

Pruteanu ve Vasilache, (2013) yaptıkları çalışmalarında gaz beton kagir malzeme ve gaz beton duvara ait ısı özellikleri belirlemişlerdir. Gaz beton bloğun ısı iletkenlik hesap değerini “ikiz iklim odası” olarak adlandırdıkları SR EN ISO 8990:2002 standartında tariflenen sıcak kutu deney yöntemiyle yapmışlardır. Gaz betonun birimin ısı iletkenlik hesap değeri bulunduğu ortamın nemine bağlı olarak iki farklı şekilde belirlenmiştir. Bağlı nemi % 10 ve % 60 olan ortamda bulunan gaz betonun ısı iletkenlik hesap değeri sırasıyla

0,11 W/mK- 0,135 W/mK olarak belirlenmiştir. Isıl iletkenlik hesap değeri 0,87 W/mK olan bir harç ile 3 cm ve 5 cm kalınlığında yapılan duvarların ise yine % 10 ve % 60 nem durumlarında ısı iletkenlik hesap değerleri belirlenmiştir. Bu durumda %10 bağıl neme sahip 3 cm kalınlığında harç kullanılarak oluşturulan duvarın ısı iletkenlik hesap değeri 0,12695 W/mK olarak belirlenirken, 5 cm kalınlığında harç kullanılarak oluşturulan duvarın ısı iletkenlik hesap değeri 0,13820 W/mK belirlenmiştir. Aynı deney % 60 bağıl neme sahip ortamda bekletilen gaz betonlardan oluşturulmuş duvarlar için de yapılmıştır. Bunun sonucuna göre de 3 cm kalınlıklı derz kullanılan duvarda 0,15153 W/mK olan ısı iletkenlik hesap değeri, derz kalınlığı 5 cm olduğunda 0,16256 W/mK olarak tespit edilmiştir (Pruteanu ve Vasilache, 2013).

Jin ve diğerleri 2016 yılında yaptıkları çalışmalarında üç farklı yoğunluğa (400, 500 ve 600 kg/m³) sahip gaz beton malzemelerin ısı iletkenlik hesap değerlerinin farklı bağıl nemlerdeki değerlerini araştırmışlardır. 400 kg/m³ birim hacim ağırlığına sahip gazbetonun %10 bağıl nemde ısı iletkenlik hesap değerinin (λ) yaklaşık 0,15 W/mK iken bu değer %80 bağıl nemde 0,37 W/mK olduğu; 600 kg/m³ birim hacim ağırlığına sahip gaz betonun %10 bağıl nemde 0,25 W/mK iken bu değer %80 bağıl nemde yaklaşık 0,53 W/mK olduğunu göstermiştir. Kısaca çalışmada bağıl nem arttıkça gaz beton malzemenin ısı iletkenlik hesap değerinde de artış olduğu görülmüştür.

Kosny (1994) sıcak kutu deney yöntemi ve bilgisayar çözümleri yardımıyla gaz betonunun ısı performansını ve ısı direncini belirlemeye yönelik bir çalışma yapmıştır. Bu çalışmada yaklaşık 510 kg/m³ yoğunluklu gaz betonun ısı iletkenlik hesap değeri 0,14 W/mK ve özgül ısı 1,05 kJ/kgK olarak belirtilmiştir. Kullanılan harcın yoğunluğu ise 1280 kg/m³, ısı iletkenlik hesap değeri 0,72 W/mK ve özgül ısı değeri 1,05 kJ/kgK olarak verilmiştir. Yapılan bu çalışmada gaz beton duvara ait ısı direnç değeri ise 7,75 (hft²F/Btu) olarak verilmiştir. SI birim sistemine göre ise bu değer yaklaşık 0,73 m²K/W karşılık gelmektedir (Kosny, 1994).

Wakili ve diğerleri (2015) yaptıkları çalışmalarında gaz betonun yangına (yüksek sıcaklığa) karşı tepkisi incelemiştir. Yüksek sıcaklıkta gaz betonun kimyasal bileşiminde meydana gelen değişiklikler tespit edilmiş ve ısı analizler yapılmıştır. Yapılan bu çalışmada kullanılan gaz betona ait ısı iletkenlik hesap değeri 0,133 W/mK, yoğunluk 485 kg/m³ ve

özgül ısı 1000 J/kgKJ olarak verilmiştir. Farklı derinliklerde sıcaklığın gaz beton üzerine etkisi ölçülmüş ve hesaplanan sonuçlar karşılaştırılmıştır (Wakili ve diğerleri, 2015).

Literatürde yapılan çalışmalar sonucunda elde edilen bazı yapı malzemelerine ait termofiziksel özellikler Çizelge 2.8’de verilmiştir.

Çizelge 2.8. Yapı malzemelerine ait termofiziksel özellikler: yoğunluk, ısı iletkenlik hesap değeri ve özgül ısı verileri

Malzeme	Tanım	Yoğunluk (ρ , kg/m ³)	Isıl iletkenlik hesap değeri (W/mK)	Özgül ısı (K _s ,J/kgK)	Kaynak
Gaz beton		350	0,125		Bonacina, 2011
		450	0,147		
Gaz beton		510	0,14	1050	Kosny, 1994
Gaz beton	%10 bağıl nemde		0,11		Pruteanu, 2013
	%60 bağıl nemde		0,135		
Gaz beton		485	0,133	1000	Wakili, 2015
Gaz beton duvar	%10 bağıl nemde 3 cm kalınlığında harçlı		0,127		Pruteanu, 2013
	%10 bağıl nemde 5 cm kalınlığında harçlı		0,138		
	% 60 bağıl nemde 3 cm kalınlığında harçlı		0,152		
	% 60 bağıl nemde 5 cm kalınlığında harçlı		0,164		
Gaz beton	Kuru ortamda (%0 bağıl nem)	400	0,12		Jin, 2016
		500	0,15		
		600	0,18		
	% 80 bağıl nem	400	0,37		
		500	0,48		
		600	0,53		
Delikli Tuğla	Delikleri boş tuğla	649	0,197	1000	Aversa, 2017
	Delikleri doldurulmuş tuğla	700	0,143	1103	
Delikli tuğla	Düşük yoğunluklu killi tuğla	1000	0,27	1000	Habib, 2017
	Orta yoğunluklu killi tuğla	1700	0,51	1000	
	Yüksek yoğunluklu killi tuğla	2400	0,84	1000	
Kırmızı tuğla		2025	0,6	800	Avdelidis, 2004
Harç			0,87		Pruteanu, 2013
Harç		1400	0,330	1000	Aversa, 2017
Harç		1280	0,72	1050	Kosny, 1994
Beton		2400	1,65	1008	Avdelidis, 2004
Kireç Taşı		2600	2,1	920	
Alçı		1440	0,5	800	
Beyaz mermer		2695	3,14	870	
Gri mermer		2650	6,7	870	
Hava		1.16	0,026	1007	
Su		1000	0,586	4193	

2.3. Isıl Yayırlılık (Termal Difuzivite) Özelliği

Isıl yayırlılık değeri malzeme ısı özelliklerinin tespitinde kullanılan, malzeme içerisinde ısının ne kadar hızlı ya da yavaş yayıldığını gösteren (Çengel, 2011:23) termofiziksel bir özelliktir. Isıl yayırlılık değerine, ısı dağılımı, ısı yayılımı ya da termal difusivite de denilmektedir. Isı yayırlılık değeri “ α ” sembolü ile gösterilir ve birimi “ m^2/s ”dır (Grinzato ve diğerleri, 2002; Wikipedia, 2011). Malzemeye iletilen ısının, malzeme birim hacim başına depolanan ısıya oranı olarak da ifade edilmektedir. Isı yayırlılık değeri “Eş. 2.10” de gösterilmiştir.

$$\alpha = \frac{ISL_{iletlen}}{ISL_{depolanan}} \quad (2.10)$$

Isıl yayırlılık değeri diğer ifade ile termal difusivite, termal ataletin ölçüsüdür (Venkanna, 2010; Wikipedia, 2016). Isıl yayırlılık ne kadar düşük olursa ortama ısının yayılması da o kadar yavaş olur. Yani ısıyı soğurmeyen/emmeyen malzemelerin ısıl yayırlılıkları daha yüksek olur (Çengel, 2011:23). Yüksek ısıl yayırlılık kabiliyetine sahip bir malzemede, ısı hızlı hareket eder çünkü malzeme hacimsel ısı kapasitesine göre hızlı bir şekilde ısı iletir. Isıl yayırlılık tüm maddeler/malzemeler için önemli bir ısıl parametredir. Yüksek ısıl yayırlılık değerine sahip malzemelerin yüksek ısı iletkenliği ve düşük ısı depolama kapasitesine sahip malzemeler olduğu bilinmektedir (Goulart, 2004). Malzemelerin ısınma-soğuma koşulları altında göstereceği ısıl davranış hakkında bilgi veren ısıl yayırlılık değeri katı, sıvı ve gaz halinde bulunan bütün maddeler için belirlenebilmektedir. Çizelge 2.9’da literatürden elde edilen bazı malzemelere ait ısıl yayırlılık değerleri verilmiştir. Bu değerlere bakıldığında, saf gümüşün ısıl yayırlılık değeri $165,63 \times 10^{-6} m^2/s$ iken; suyun ısıl yayırlılık değeri $0,14 \times 10^{-6} m^2/s$ olarak görülmektedir (Çizelge 2.9).

Çizelge 2.9. Bazı malzemelere ait literatürde verilen ısıl yayırlılık değerleri

Malzeme	Isıl yayırlılık değeri α, m^2s^{-1}	Kaynak
Gümüş	149×10^{-6}	Çengel, 2011
Saf (%99,9) Gümüş	$165,63 \times 10^{-6}$	Holman, 2002
Altın	127×10^{-6}	Çengel, 2011; Wilson, 2007
Alüminyum	$97,5 \times 10^{-6}$	Çengel, 2011
Bakır	$112,34 \times 10^{-6}$	Holman, 2002
Paslanmaz Çelik	$4,2 \times 10^{-6}$	Wilson, 2007
Demir	$2,3 \times 10^{-5}$	Wilson, 2007

Çizelge 2.9. (devam) Bazı malzemelere ait literatürde verilen ısıl yayınlılık değerleri

Mermer	$1,2 \times 10^{-6}$	Çengel, 2011
Beyaz mermer	$1,339 \times 10^{-6}$	Avdelidis, 2004
Gri Mermer	$2,906 \times 10^{-6}$	Avdelidis, 2004
Kumtaşı	$1,12-1,19 \times 10^{-6}$	Holman, 2002
Kireç Taşı	$0,8779 \times 10^{-6}$	Avdelidis, 2004
Alçı	$0,434 \times 10^{-6}$	Avdelidis, 2004
Beton	$0,75-0,682 \times 10^{-6}$	Çengel, 2011; Avdelidis, 2004
Tuğla (yaygın)	$0,52 \times 10^{-6}$	Çengel, 2011; Holman, 2002
Kerpiç	$3,50-3,68-4,57 \times 10^{-7}$	Azhary vd. 2018
Cam yünü	$0,23 \times 10^{-6}$	Çengel, 2011
Su	$0,14 \times 10^{-6}$	Çengel, 2011; Wilson, 2007
Ahşap (meşe)	$1,33 \times 10^{-7}$	Çengel, 2011
Ahşap (sarı çam)	$8,2 \times 10^{-8}$	Holman, 2002
Cam (pencere)	$3,4 \times 10^{-7}$	Holman, 2002
Hava	$2,2160-2,226-2,15 \times 10^{-5}$	Holman, 2002; Avdelidis, 2004; Habib, 2017

Isıl yayınlılık değeri (α) malzemelerin ısıl iletkenlik hesap değeri ve hacimsel ısı kapasitesine bağlıdır (Grinzato ve diğerleri, 2002; Yeşilata, 2004). Isıl iletkenlik hesap değeri (λ), yoğunluğu (ρ) ve özgül ısısı (c) bilinen malzemelerin ısıl yayınlılık değerini belirlemek kolaydır. Ancak bu parametreleri belirlemek çoğu zaman kolay, ekonomik ve pratik değildir, ayrıca zaman alıcıdır. Isıl özellikleri bilinen malzemelerin ısıl yayınlılık değeri aşağıda verilen “Eş. 2.11” ile hesaplanmaktadır.

$$\alpha = \frac{\lambda}{c \times \rho} \quad (2.11)$$

Burada; c : özgül ısı, J /kgK; ρ : yoğunluk, kg/m³ olarak ifade edilir.

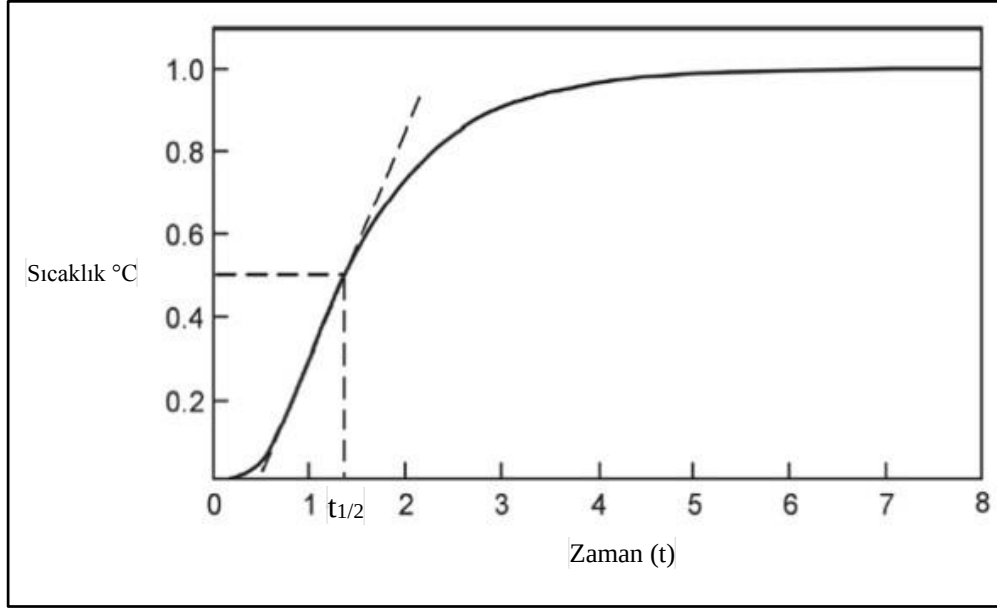
Isıl yayınlılık ısıl özellikleri bilinen malzemeler için Eş. 2.11’de verilen formülün kullanılmasıyla hesaplanabileceği gibi lazer flaş yöntemi denilen bir teknik ile de doğrudan ölçülebilmektedir. Lazer flaş yöntemin çalışma prensibi bir ucunda kısa bir enerji palsıyla silindirik bir örneği ısıtmak ve diğer ucundaki sıcaklık değişimini analiz etmek şekline dayanmaktadır (Wikipedia, 2016). Lazer flaş metodunda lazer tarafından ani ısı sinyalleri üretilmekte ve numunenin ön yüzeyinden emilmektedir. Emilen bu ısı numunenin diğer yüzeyine iletilmekte ve sıcaklık artışı bir sensör yardımıyla takip edilmektedir (Altun, 2008). Lazer flaş yöntem tek bir noktadan ölçüm aldığı için homojen olmayan malzemeler için her zaman doğru sonuç vermeme ihtimali bulunmaktadır. Bununla birlikte farklı yöntemlerle uygulanan ve standartlarda lazer flaş yöntem olarak adlandırılan dört farklı yöntem daha

mevcuttur (Cernuschi ve diğeri, 2016; ASTM C714-72; JIS R 1611). Bu yöntemler aşağıda maddeler halinde verilmiştir (Cernuschi ve diğeri, 2016).

- Termal Denge İnterferometri Yöntemi (TWI Yöntemi),
- Termografik Yöntem I (Mekansal Olarak Çözülen Yöntem),
- Termografik Yöntem II (Yanal Termal Dalgalar)
- Termografik Yöntem III (Tek Taraflı Flaş Yöntemi)

Isıl yayınlılık değeri belirlenmesinde kullanılan bir diğeri yöntem ise modellemeler/similasyonlar yardımıyla yapılan analiz yöntemidir. Bu yöntem ile ısı yayınlılık değeri modelleme üzerinden belirlendiği için elde edilen sonuç malzemenin gerçek durumuna ait bilgileri vermeyebilir. Ayrıca bu yöntem ile ısı yayınlılık değeri belirlemek için ileri derece matematik bilgisine ihtiyaç vardır. Dolayısıyla bu yöntem herkes tarafından uygulanabilir ve anlaşılabilir değildir. Buradan da anlaşıldığı üzere ısı yayınlılık değeri belirlemek için kullanılan birçok farklı yöntem vardır. Ancak bu yöntemlerin çoğu homojen malzemelerin ısı yayınlılık değeri belirlemek için uygundur. Bu yöntemler homojen olmayan yapı malzemelerinin ısı yayınlılık değeri belirlenmesinde yetersiz kalmaktadır.

Isı yayınlılık değeri yapı kesitinden ısı akışının ne kadar hızlı olduğunu ve buna bağlı olarak malzeme yüzeyindeki sıcaklık değişimlerinin ne kadar kolay olduğunu tarif eder. Kısaca yapı kesitinde ilerleyen sıcaklığın malzeme yüzeyinde ilerlediği yolu/ dağılımı tanımlar. Bu ısı dağılım çürüyen/bozulan malzemenin tayini/tespiti için de kullanılan önemli bir parametredir (Grinzato ve diğeri 2002; Bison ve diğeri, 2002). Literatürde yapı malzemelerin ısı yayınlılık değeri belirlemeye yönelik bir takım çalışmalar mevcuttur. Bu çalışmalarda farklı metodların kullanıldığı bilinmektedir. Ancak yapı malzemelerinin ısı yayınlılık değeri belirlemede kolay uygulanabilir, tahribatsız yöntemler kullanılması gerektiği vurgulanmaktadır (Cernushi, 2002; Bison, 2002, 2008; Boué ve Fournier 2008; Martin, 2012; Muscio, 2004). Literatürde ısı yayınlılık değeri, en pratik şekliyle ve ilk olarak Parker vd. (1961) tarafından Şekil 2.2’de verilen sıcaklığın zamana karşı grafiği kullanılarak belirlenmiştir (ASTM E1461-13).



Şekil 2.2. Zamana karşı sıcaklık değişimi grafiği (Parker, 1961; ASTM E1461-13)

Parker (1961) ve Grinzato vd (2002) çalışmalarında kullandıkları formüllerle ısı yayınlılık değerini belirlemek için gerekli olan sıcaklık verilerini infrared termografi (IRT) yöntemini kullanarak elde etmişlerdir. İnfrared termografi (IRT) yöntemi bu alanda kullanılan, ısı görüntülere karşı duyarlı tahribatsız bir muayene yöntemidir. IRT yöntemi günümüzde birçok alanda tercih edilen ve özellikle bina enerji performanslarının tespiti üzerine yapılan çalışmalarda kullanılan bir yöntemdir. IRT yöntemi literatürde yapı duvarlarının termofiziksel özelliklerini belirlemek amacıyla da kullanılmıştır (Koçkar, 2012; Tuğla ve diğerleri, 2013, 2016). Grinzato (2009) iki farklı taşıyıcılığa sahip (G2 ve G4 tipi) gaz betonun ısı yayınlılık değerini belirlemiştir. Koçkar (2012) yaptığı yüksek lisans çalışmasında infrared termografi (IRT) yöntemini kullanarak yapı duvarlarını ve yapı duvarlarında oluşan/oluşabilecek ısı sorunları incelemiştir. Nicel analizle incelenen duvarların sorunlu/sorunsuz bölgelerine ait ısı performansları sayısal olarak belirlenmiştir. Ayrıca bu çalışmada tuğla duvarlara ait ısı yayınlılık değerini belirlemek için bir deneme çalışması da yapılmıştır. Yapılan başka bir çalışmada da üç farklı bölgeden temin edilen kil ile üretilmiş tuğlaların ısı yayınlılık değeri laser flaş yöntemle belirlenmiştir (Azhary ve diğerleri, 2018). Mevcut yapı duvarlarının termal özelliklerini belirlemek amacıyla Fransa'da bir çalışma yapılmıştır (Sassine ve diğerleri, 2017). Bu çalışma kapsamında bölgede yaygın olarak kullanılan bir tuğla duvar örneği incelemiştir. İncelenen duvarda kullanılan tuğla ve harcın ısı özellikleri (ısı iletkenlik hesap değeri, yoğunluk ve özgül ısı değeri) belirlenmiş ve böylece ısı yayınlılık değeri hesaplanmıştır. Duvarın ısı yayınlılık

değeri, duvar inşasında kullanılan dolgu ve harç malzemenin yapısı, ısı özellikler, duvar kalınlıklığı gibi detaylardan etkilenmektedir. Araştırmalarda elde edilen sonuçların farklılıkları bu durumdan kaynaklanmaktadır. Literatür taraması sonucu elde edilen yapı duvarlarının ve duvar dolgu malzemelerinin ısı yayınlılık değerleri Çizelge 2.10'da verilmiştir. Literatüre göre düşey delikli tuğla ile örülen duvarın ısı yayınlılık değeri $5,72 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ olarak bulunurken; ısı performansı geliştirilmiş yenilikçi tuğla ile örülen duvarın ısı yayınlılık değeri $3,68 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ olarak belirlenmiştir (Çizelge 2.10). Tuğla duvarlarda belirlenen ısı yayınlılık hesap değerlerine harçların etkisi dahil edilmiştir. Duvar dolgu malzemesi olarak incelenen tuğlaya ait ısı yayınlılık değeri ise $5,20 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ olarak verilmiştir (Çizelge 2.10). Gaz beton duvar dolgu malzemelerine ait ısı yayınlılık değeri ise G2 ve G4 türü için farklılık göstermektedir. Sırasıyla G2 ve G4 türü gaz betona ait ısı yayınlılık değeri ortalama $2,3 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ ve $2,65 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ olarak verilmiştir (Çizelge 2.10). Bir başka duvar dolgu malzemesi olan betonun ısı yayınlılık değeri $0,75 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ olduğu görülmüştür (Çizelge 2.10).

Çizelge 2.10. Literatüre göre yapı duvarlarına ve duvar dolgu malzemeleri ait ısı yayınlılık değerleri

Malzeme	Tanım	Isıl yayınlılık değeri α , m^2/s	Kaynak
Tuğla duvar	Düşey delikli tuğla ve harç ile örülmüş duvar	$5,72 \times 10^{-7}$	Koçkar, 2012
Tuğla duvar	Düşeyde şaşırtmalı yalıtım levhalı düşey delikli termal tuğla ve harçla örülmüş duvar	$3,68 \times 10^{-7}$	
Tuğla duvar	Dolu tuğla ve harçla örülmüş duvar	$6,45 \times 10^{-7}$	Sassanie, 2017
Tuğla	Yaygın	$5,20 \times 10^{-7}$	Çengel, 2011; Holman, 2002
Kerpiç		$3,50-3,68-4,57 \times 10^{-7}$	Azhary 2018
Delikli tuğla	Düşük yoğunluklu killi tuğla	$2,7 \times 10^{-7}$	Habib, 2017
Delikli tuğla	Orta yoğunluklu killi tuğla	$3,0 \times 10^{-7}$	
Delikli tuğla	Yüksek yoğunluklu killi tuğla	$3,5 \times 10^{-7}$	
Tuğla		$3,70 \times 10^{-7}$	Avdelidis, 2004
Gaz beton	G2 türü	$2,2-2,4 \times 10^{-7}$	Grinzato, 2009
Gaz beton	G4 türü	$2,5-2,8 \times 10^{-7}$	
Gaz beton	Yoğunluğu 350 kg/m^3	$3,56 \times 10^{-7}$	Bonacina, 2011
Gaz beton	Yoğunluğu 450 kg/m^3	$3,54 \times 10^{-7}$	

Bu çalışmada literatürde ki diğer çalışmalar ve eksiklikler göz önünde bulundurularak IRT yönteminden faydalanılmıştır. IRT yöntemi ve sıcak kutu (hot box) test yönteminin birleşik kullanımı ile yeni bir test yöntemi geliştirilmiş yapı duvarlarının ısı yayınlılık değerinin tespitinde kullanılmıştır. Bu çalışma yapı duvarlarının ısı yayınlılık değerinin (α , m^2/s) IRT

yöntemiyle hızlı, kolay ve tahribatsız bir şekilde belirlenmesine ve literature standart bir ölçüm yöntemi kazandırılmasına temel teşkil etmesi bakımından önemlidir.

2.4. Isı Transferi Kavramları

Bu bölümde enerji, ısı ve sıcaklık kavramları hakkın kısaca bilgi verilecektir. Ayrıca ısı transferi ve ısı transfer türleri olan iletim, taşınım ve konveksiyon kavramları açıklanacaktır.

Enerji

Basit ifade ile enerji iş yapabilme yeteneğidir. Termodinamiğin birinci yasası olan enerjinin korunumu prensibine göre bir sisteme giren enerjinin o sistemdeki enerji artış hızına eşit olması gerekmektedir. Yani kapalı bir sistemin enerji miktarı her zaman aynıdır. Bir sisteme giren enerji çıkan enerjiye eşittir ve bu durum “Eş. 2.12” de gösterilmiştir. Enerji kaybolmayan bir şeydir ve parçalara ayrılamaz. Ancak enerjiler farklı türdeki enerjilere dönüştürülebilir.

$$E_{giren} = E_{çıkan} \quad (2.12)$$

Burada; E_{giren} : giren enerji (J), $E_{çıkan}$: çıkan enerji (J) ifade etmektedir.

Enerji potansiyel ve kinetik enerji olarak genelde iki gruba ayrılrsa da; ısı enerjisi, kimyasal enerji, nükleer enerji, elektrik enerjisi, ısı enerjisi, ışık enerjisi, hareket (mekanik) enerjisi, ses enerjisi, elastik enerjisi, yer çekimi enerjisi gibi alt dallara ayrılmaktadır. Enerjinin uluslararası birimi Joule (J)'dir.

Sıcaklık

Isı, sıcaklıkla karıştırılan bir kavramdır. Isı bir enerji iken sıcaklık ölçülebilir bir büyüklüktür (Altınışık, 2003). Birimi genelde °C ya da K olarak kullanılır.

Isı

Bir sistem ve bu sistemin kendi çevresi arasında farklı sıcaklık durumlarından dolayı akan bir enerji şeklidir (Çengel, 2011:2; Kakaç, 1976). Ortam moleküllerinin hareketi sayesinde ısı alışverişi ya da ısı akışı olmaktadır. Isı için bir enerji kaynağı bulunduğu sürece moleküller durdurulamaz ve sürekli olarak bulundukları çevreye yayılırlar (Bayer, 2006).

Isı Transferi

Sıcaklık farkı bulunan iki ortam arasında ısı enerji transfer hızlarını bulmakla ilgilenen bilim dalıdır. Isı transferi her zaman yüksek sıcaklıktaki bir ortamdan düşük sıcaklıktaki bir ortama doğru gerçekleşmektedir. Farklı sıcaklıklara sahip iki ortam arasında sıcaklıklar eşitleninceye kadar ısı transferi devam eder (Çengel, 2011: 2). İki ortam arasında ısı transferi durmuş ise ortam karalı ortam haline gelmiş demektir.

Isı enerjisi kaynağından çıkıp çevreye yayılırken farklı yollar izlemektedir. Isı enerjisinin farklı iki ortam arasından bir ortamdan diğer ortama geçişi üç şekilde olmaktadır. Bunlar iletim, taşınım ve ışıdır (Çengel, 2011:17-27; Candan, 2007).

İletimle (kondüksiyon) ısı transferi: Farklı iki ortam arasında ısı geçişi yollarından bir tanesi iletim yani kondüksiyonla ısı transferi yoludur. İletimle ısı transferi etkileşim halinde olan bir maddenin yüksek enerjili parçacıklarından düşük ısı enerjili parçacıklarına ısı enerjisinin transfer edilmesidir (Çengel, 2011:17). Isı İletimi katı, sıvı ve gazlarda olabilir. Ancak sıvı ve gazlarda moleküllerin rastgele hareketleri sonucu çarpışma ve yayılmaları sebebi ile olur. Katılara ise moleküllerin titreşimleri ve böylece serbest elektronların enerji iletmeleri sonucu gerçekleşir (Çengel, 2011:17). Isı iletimini sıcaklık farkı kadar, malzeme özellikleri (gözeneklilik durumu, malzeme içindeki boşluk oranı), ortamın geometrisi ve kalınlığı da etkiler (Çengel, 2011:17; Candan, 2007). Bu özelliklere göre ısı iletimi ya daha hızlı ya da daha yavaş gerçekleşir. Bundan dolayı da malzemelerin sahip olduğu yapısal özelliklerine göre her malzemenin sabit bir ısı iletim katsayısı vardır (Candan, 2007). Bu ısı iletim katsayısı (λ) ile gösterilir (TS 825, 2008; BS EN ISO 8990,1996). Paralel iki yüzey arasındaki sıcaklık farkı $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ olduğu zaman birim zamanda (1 saat) birim alanda (m^2) ve bu alana dik yöndeki birim kalınlıktan geçen ısı miktarıdır. Isı iletim katsayısının birimi ($\text{kcal/mh}^{\circ}\text{C}$) dir (Candan, 2007; Orhan, 1996).

Taşınım (konveksiyon) ısı transferi: Katı bir yüzeye bitişik hareketli sıvı ve gaz arasındaki ısı enerjisi aktarımını ifade etmektedir. Taşınım ısı aktarımının büyüklüğü akışkan hareketini hızına bağlıdır. Akışkan hareketi ne kadar yavaş olursa taşınım ile ısı aktarımı da o kadar yavaş olur. Bunun tam tersi de mümkündür (Çengel, 2011:25) Diğer bir ifade ile sıvı ve gaz halde bulunan ve akışkan diye tanımlanan maddeler arasında ısı iletimi taşınım yani konveksiyon ile gerçekleşir (Candan, 2007; Orhan, 1996). Sahip oldukları kütle parçalarının pozisyonlarını değiştirmeleriyle yani hareket ederek yer değiştirmeleri sırasında sıvı ve gaz maddelerdeki ısı aktarımıdır. Taşınım ısı aktarımı sırasında kodüksiyon (iletim) olayı meydana geliyor olsa da dikkate alınmaz (Orhan, 1996).

Işınım (radyasyon) ısı transferi: Bu ısı transfer yolunun iletim ve taşınım ısı transferi yollarından farklı bir aracı ortama ihtiyaç duymamasıdır. Işınım ile ısı transferi cisimlerin sıcaklıkları sebebiyle yaydıkları ısı ile ısı ile ilgili (Çengel, 2011:27). Mutlak sıfırın üzerinde bir sıcaklığa sahip bütün nesnelerin etraflarına ısı iletim yaydıkları bilinmektedir. Cisimler yüzeylerindeki bu ısıyı hiçbir aracıya ihtiyaç duymadan nesnelerden tamamen bağımsız olarak yayarlar. Boşlukta dahi ısı yayılım işlemi devam eder (Candan, 2007; Orhan, 1996). Enerjinin fiziksel bir ortam olmaksızın elektro magnetik dalgalar yardımıyla yayılarak geçmesiyle olur ve ayrıca buna “Radyasyonla taşıma” da denir (Altınışik, 2003; Orhan, 1996). Isı ışınlamaya en iyi ve somut örnek olarak güneşin dünyayı ısıtım yoluyla ısıtması verilebilir. Işınımı bütün katılar, sıvılar ve gazlar farklı oranlarda yayar, emer ve geçirirler. Işınımın maksimum hızı Stefan Boltzmann Kanunu ile belirlenebilmektedir. “Eş. 2.13” formül verilmiştir.

$$Q_{\text{yayılan}} = \sigma \cdot A_s \cdot T_s^4 \quad (2.13)$$

Burada; σ : $5.670 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$ Stefan Boltzmann sabiti, A_s : ışınlamın olduğu yüzey alanı m^2 , T_s : yüzey sıcaklığı K olarak ifade edilmektedir.

Burada anlatılan maksimum ışınlam hızı yayan yüzeye karacisim denilmektedir. Bir karacisimin yayıcılığı yani emisivitesi 1 olarak ifade edilir. Bütün yüzeylerin emisivite (ϵ) değeri 0 ile 1 arasındadır. Yine aynı şekilde emisivite (ısı yayıcılık) değerinde olduğu gibi soğurma yani ısıyı emme (yutma) değeri de 0 ile 1 arasında değişmektedir. Karacisimin hem yayıcılık hem de soğurma değeri 1 olarak ifade edilir. Kirchhoff ışınlam kanunu belirtilen ışınlam ve sıcaklık için bir yüzeyin emisivite ve soğurganlık değerlerinin eşit olduğunu ifade

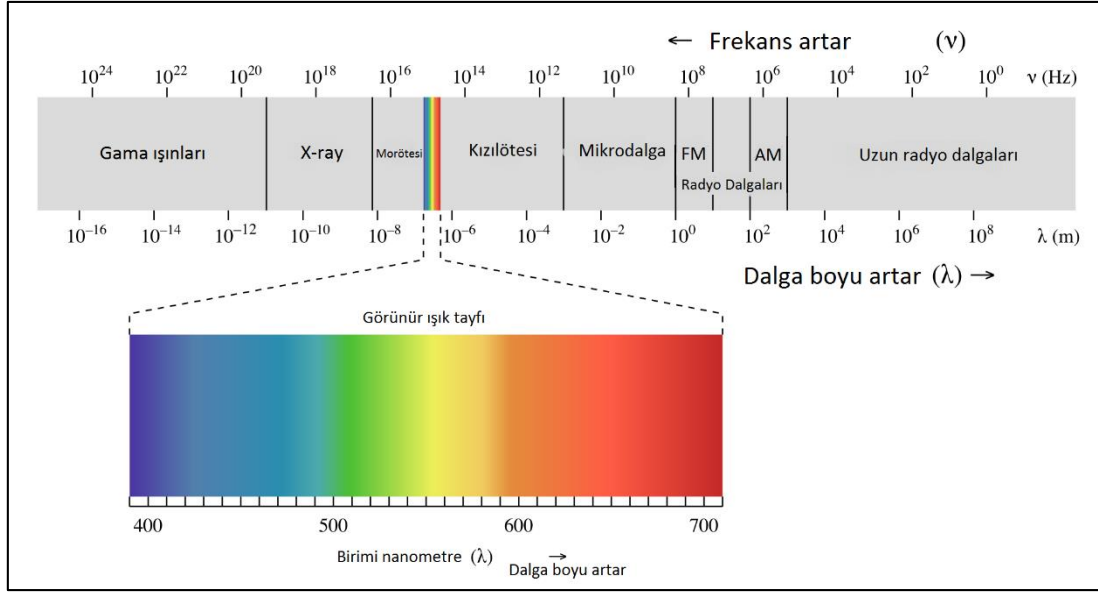
eder (Çengel, 2011:28). Değişik malzemelere ait yayıcılık değerleri Çizelge 2.11' de verilmiştir (Çengel, 2011:28; Avdelidis, 2004; Flir, 2001). Burada toprak türü malzemelerin yayıcılık değeri ile topraktan elde edilen tuğlaya ait yayıcılık değerleri 0,93-0,96 arasında benzer olduğu görülmektedir.

Çizelge 2.11. Malzemelerin ısı yayıcılık (emisivite) değerleri

Malzeme	Isıl yayıcılık değerleri
Siyah boya	0,98
Alüminyum folyo	0,07
Kırmızı tuğla	0,93-0,96-0,90
Harç	0,87
Harç (kuru)	0,94
Ağaç	0,82-0,92
Parlatılmış gümüş	0,02
Parlatılmış paslanmaz çelik	0,17
Toprak	0,93-0,96
Su	0,96
Asfalt döşeme	0,85-0,93
Bitkiler	0,92-0,96
Alçı	0,91
Kireçtaşı	0,93
Mermer	0,95
Beton	0,94

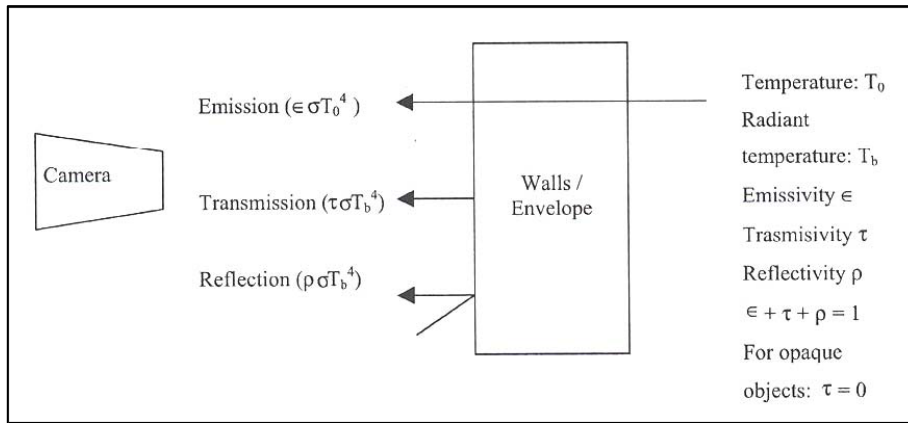
2.5. Kızılötesi Isıl Görüntüleme Yöntemi

Kızılötesi ısı görüntüleme (IRT) yöntemi mutlak sıfırdan farklı enerji yayan cismin yüzeyindeki ısıyı görüntüleyen yöntemdir (Serra ve diğerleri, 2017). Kızıl ötesi ısı görüntüleme yöntemine literatürde InfraRed Termografi (IRT) yöntemi de denilmektedir. Kızıl ötesi ısı görüntüleme yönteminde bu ısı görüntüler ısıya karşı duyarlı termal kameralar aracılığıyla görüntülenmektedir. Isıl yayınının olduğu her cismin ısı görüntüsünü alabilen bir prensibe sahiptir. Bilindiği üzere bütün cisimler etrafına ışıma (radyasyon) yayar. Biz insanlar ise sadece gözümüzün algılayabildiği dalga boyuna sahip ışımları aracısız yani çıplak gözle görürüz. Elektronmanyetik spektrumda ilk keşfedilen ve insan gözünün algılayabildiği bu ışıma görünür ışık da denilmektedir (Açık bilim, 2013). İnsan gözünün görebildiği bu görünür ışığın dalga boyu 400 ile 700 nanometre aralığındadır. Şekil 2.3' de verilen ışık tayfına bakıldığı zaman görünür ışığın sahip olduğu bu dalga boyu aralığı ile spektrumun en dar bölgesini oluşturduğu görülmektedir (Açık bilim, 2013).



Şekil 2.3. Elektromanyetik spektrumda verilen ışık tayfı (Wikipedia, 2019)

Kızıl ötesi ışıının dalga boyu ise gözle görülemeyen 0,75-10 μm olan elektromanyetik spektrumda görülebilir mikro dalga boyuna sahiptir (Ocana ve diğerleri, 2004). Kızıl ötesi ısı görüntüleme yönteminde kullanılan termal kameralar ışıının yayan bütün cisimleri ve 3 – 5 μm olan kısa ya da 8 – 14 μm olan uzun dalga boylarını görüntüleyebilmektedir (Ocana ve diğerleri, 2004; Titman, 2001). Neredeyse sivil kullanım amaçlı tüm kameralar, uzun dalga IR bölgesinde, sadece gaz analizinde kullanılan termal kameralar orta dalga IR alanında çalışmaktadırlar. Şekil 2.4’de bir cismin ışıının bir kısmını yuttuğu, bir kısmını geçirdiği ve geçen bu ışıının bir kısmını da yansıttığı gösterilmiştir. IRT yönteminde termal kameralar cismin yuttuğu, geçirdiği ve yansıttığı bu ışıının birleşimlerini görüntüler (Ocana ve diğerleri, 2004).



Şekil 2.4 Termal kamera tarafından ışıının görüntülenmesi (Ocana ve diğerleri, 2004)

Bu yöntemde elde edilen ısı görüntü görüntülenen cismin yüzey sıcaklığına ve yayılım bir diğer adıyla emisivite faktörüne bağlıdır (Ocana ve diğerleri, 2004). Emisivite (yayınım) faktörü her cisim için farklı bir değere sahiptir. Yayınım faktörü değeri maksimum olan yüzeye karacisim denilmektedir (Çengel, 2011:28) Karacisimin yayınım faktörü 1'dir. Aynı sıcaklıkta gerçek yüzeylerden yayılan ışınlım, karacisim tarafından yayılan ışınlım değerinden azdır. Emisivite değeri bütün yüzeyler için 0 ile 1 aralığındadır. Yayılan ışınlım değeri 1'e yaklaştıkça cismin yayıcılığının karacisime o kadar yakın olduğu bilinmektedir. Yapı malzemeleri için emisivite değerleri hesaplanabileceği gibi literatürde verilen 0,90 ve 0,95 arasında yer alan değerlerde kullanılabilir (bkz. Çizelge 2.11). Emisivite değerinin yüksek (1'e yakın) ya da düşük (0'a yakın) olması durumu termal kamera ile sıcaklık ölçümünün doğruluğunu etkileyen bir faktördür (Ocana ve diğerleri, 2004; Goulart, 2004; Maldague, 2001; Hall, 1994:30). Kızılötesi ısı görüntüleme yönteminde ısı görüntü alan termal kameralar emisivite faktörüne ilaveten başka faktörlerdende etkilenmektedir. Bu faktörler ölçüm yapılan ortamın sıcaklığı, rüzgar hızı, bağıl nemi, termal kamera ile ölçüm yapılacak cisim arasındaki mesafe, termal kameranın cisme göre kurulum açısı ve çalışmanın yapılacağı mevsimsel özellikler vb. olarak sıralanabilir (Balaras ve diğerleri, 2002; Titman, 2001). Burada mevsimsel özelliklerden kasıt güneş ısı kaynağından çalışma yüzeyinin etkilenme oranı ve süresidir. Mevsime bağlı olarak yapılan ölçümlerde eğer malzemenin yüzey sıcaklık bilgisiyle alakalı veri elde etmek istiyorsak ısı kaynağının (güneş vb.) yüzeyi doğrudan etkileyerek malzemenin yüzey sıcaklık verilerini etkilememesini sağlayacak zaman dilimleri tercih edilmelidir. Bunun için kış ayları ya da güneşten doğrudan etkilenmeyecek zaman akşam ya da sabahın erken saatleri tercih edilmelidir. Çünkü güneşin yüzeyi doğrudan etkileme olanağı azalmış ve gerçeği daha çok yansıtan yüzey sıcaklık verileri elde edilmiş olacaktır (Titman, 2001).

Kızılötesi ısı görüntüleme yönteminin kullanım alanları

Kızılötesi ısı görüntüleme (IRT) yöntemi birçok alanda kullanılmaktadır. Ancak günümüzde özellikle tarihi yapıların incelenmesi ve kontrolü için tercih edilen tahribatsız bir muayene yöntemidir. IRT yöntemi için termal kameralar kullanılmaktadır. Termal kameraların kullanıldığı bu tahribatsız deney yönteminde malzemelerin yaymış oldukları ışınlım (radyasyon) takibi yapılarak belirlenen eşik değerinde ki renk skalalarına göre malzemenin ısı haritası çıkarılır. Böylece incelenecek alan belirlenmiş olur. Bu incelenecek alanlarda varsa ısı soruların; yapı duvarının içerisinde barındırdığı nemin ve/veya hava

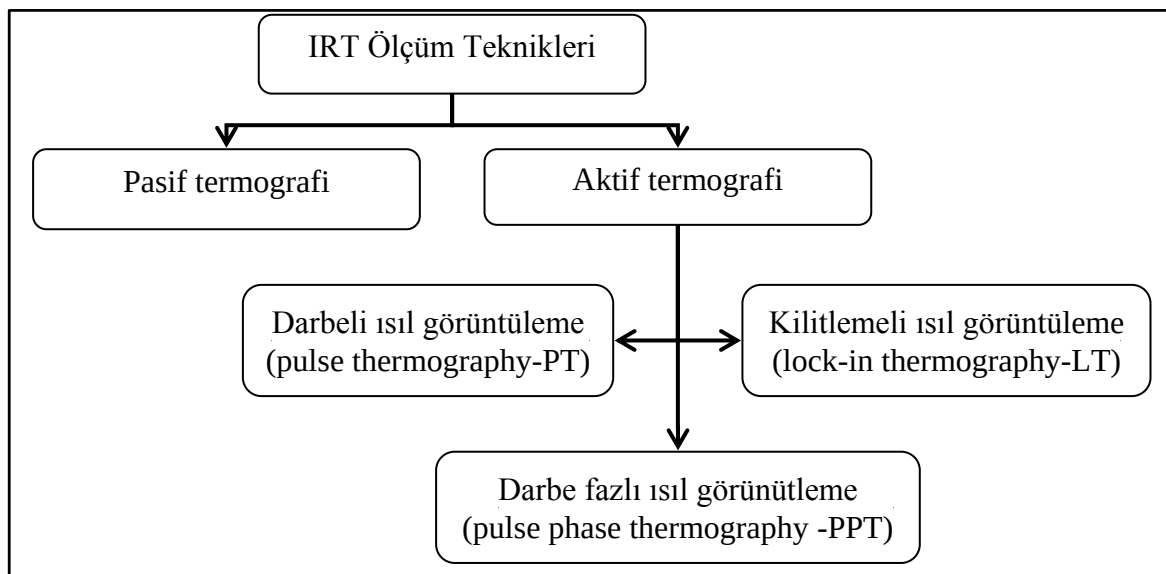
kaçağının ısı iletimin artırmasını, boşluk varsa ısı iletimin azaltarak yalıtımlılık durumu göstermesi gibi ısı farklılıklarının, ısı köprülerinin, malzeme farklarının ve birleşim noktalarının saptanmasına olanak sağlamaktadır. Kısacası incelenen yapıyla ilgili sorunlu/sorunsuz bölgeler tahribatsız şekilde ortaya çıkarılıp belirlenmektedir (Titman, 2001; Avdelidis ve diğerleri, 2003; Grinzato ve diğerleri, 2002; Kandemir-Yücel ve diğerleri, 2007; Tavukçuoğlu ve diğerleri, 2005, 2007, 2008, 2010; Tavukçuoğlu, 2009). Kızıl ötesi ısı görüntüler ancak uzman kişiler tarafından analiz edilip gerçeğe yakın sonuçlar elde edilir. Özellikle askeriye, endüstri, tıp, meteoroloji, mimari, mühendislik vb. gibi alanlarda kullanılmaktadır (Titman, 2001). Son zamanlarda çeşitli bilim insanları da çalışmalarında özellikle de malzeme ve tarihi yapı sorunlarının tespitinde IRT tercih etmektedirler. Bunun yanında ısı kaybı, nemli bölge, hava kaçağı, ısı köprüsü ve bunlarla beraber ısı yalıtımlılık durumlarını tespit etmek amacıyla kullanılmıştır (Tavukçuoğlu ve diğerleri, 2008; Titman, 2001; Moropolcu ve diğerleri, 2001; Grinzato, 1998). Bunun yanında tarihi yapılarda meydana gelen bozulmalar, yağmur suyu ve atık su akıdama sistemi problemleri, yapı çatlakları üzerinde de IRT yöntemi kullanılmıştır (Tavukçuoğlu ve diğerleri, 2010; Tavukçuoğlu ve diğerleri, 2005, 2007). IRT yöntemi yapı duvarlarının termofiziksel özelliklerinin belirlenmesi amacıyla da kullanılmış ve elde edilen sonuçlara bakıldığı zaman bu yöntemle termofiziksel özelliklerin sadece yüzey sıcaklık verileri yardımıyla belirlenebileceği anlaşılmıştır (Koçkar, 2012; Tuğla ve diğerleri, 2013, 2016).

IRT yöntemiyle son zamanlarda yerinde çalışmalar artarak hız kazanmaktadır. Bina dış cephe ısı performansı değerlendirilirken IRT yönteminden yararlanılmaya başlanmıştır. Bu yöntemin özellikle bina cephelerinde gözle fark edilemeyen ısı köprülerini saptamada ve nicel olarak ifade etmede kullanımı kolay bir yöntem olarak kullanılabileceğini göstermektedir (O'Grady ve diğerleri, 2017). Herhangi bir malzemenin yüzey altında kusurlar/sorunlar mevcut olduğunda, malzemenin içindeki ısının yüzeyde yayılması farklı olmaktadır. Bu durum IRT tarafından alınan ısı görüntülerde ortaya çıkmaktadır (Serra ve diğerleri, 2017). IRT yöntemi malzemelerdeki veya ürünlerdeki gizli kusurları tahribatsız bir şekilde algılama ve karakterize etmedeki etkinliği sayesinde birçok, birçok sektörde çok sayıda uygulamada kullanılır hale gelmiştir (Maldague, 2001). IRT yöntemi binalarda ise en çok eksik veya hasarlı izolasyon, ısı köprüleri ve hava kaçakları ve aşırı nemli/ıslak alanların neden olduğu ısı kaybını tespit etmek için enerji verimliliği çalışmalarında kullanılır (Balaras, 2002). IRT çalışmaları nitel ve nicel analizlere imkan vermektedir. Bazı çalışmalara yüzey nem değişimlerini (Edis, 2015), kaçak noktalarını (Barreira ve diğerleri,

2017), binaların dinamik ısı davranışını incelemek ve değerlendirmek için yarı nicel ve nicel yaklaşımlar önerilmiştir (Fox ve diğerleri, 2015). Ancak binalardaki IRT uygulamaları için yapılan çoğu çalışmada pasif termografi yöntemini kullanarak, bina cephesinin ısı durumunun yüzek sıcaklık verileri ile nitel olarak değerlendirildiği görülmektedir. Ancak, belli bir süre boyunca art arda elde edilen termal görüntülerin (ardışık ısı görüntüleme yöntemi) hataları ve malzemeleri daha verimli karakterize edebileceği bilinmektedir. Ancak, bu gelişmiş işlemler için IRT testleri ile kombine teknikler kullanılarak oluşturulan aktif termografi yöntemi ile elde edilmektedir (Grinzato ve diğerleri, 1998). Aktif ve pasif termografi yöntemi, IRT ile ölçüm teknikleri başlığı altında detaylıca anlatılmıştır.

2.6. Kızılötesi Isıl Görüntüleme ile Ölçüm Teknikleri

Kızılötesi ısı görüntüleme yöntemi ile yapılacak ölçümlerde sıcaklık farkını yaratacak bir ısı kaynağına ihtiyaç vardır. Bu ölçümlerde ısı kaynağı herhangi bir ısıtıcı/soğutucu (radyatör, ısı kabini, klima vb.), ısı yayan ampüller (halojen lambalar vb.) ve aletler (saç kurutma makinesi vb.), güneş ya da güneş battıktan sonra gündüz ısıtmış olduğu sıcak cismin kendisi olabilmektedir. IRT yönteminde kullanılan ısı kaynağı türü ölçüm tekniğini belirlemektedir. Bu ölçüm tekniklerine göre infrared termografi genel olarak aktif ve pasif termografi diye ikiye ayrılmaktadır. Aktif termografi de kendi içinde üç gruba ayrılmaktadır. Bu gruplar Şekil 2.5’de gösterilmiştir.



Şekil 2.5. İnfrared termografinin ölçüm tekniklerini gösteren şematik çizim

Aktif termografi

Aktif termografi incelenen alanın ısınma veya soğuma süreçleri boyunca ısının sıcaktan soğuğa geçişi prensibine dayanır (Tavukçuoğlu ve diğerleri, 2005). Aktif termografide çalışma esnasında örnek yüzeye bir ısı verilir ve daha sonra yüzey sıcaklığı termal kameralar ile kayıt edilir (Wiggenhauser, 2002; Maldague, 2001: 343). Kayıt etme işlemi belli bir aralıkta ard arda gerçekleşiyorsa buna ardışık ısı görüntüleme denilmektedir.

Endüstriyel uygulamalarda çoğunlukla havacılık, elektronik ve mekanik alanlarda (Maldague, 2001) aktif termografi teknikleri uzun süredir kullanılmaktadır. Ayrıca aktif termografi yöntemi, metal olmayan malzemelerin karakterizasyonu ve bina cephelerinin ısı performansının tespit edilebilmesi için de uygun bir yöntemdir. Yapı yüzeyindeki kusurlu bölge ısınma/soğuma sürecinde sağlam bölgedeki yüzeyden farklı bir ısı davranış göstermektedir. Yani kusurlu bölgelerde farklı ısı kapasitesi veya farklı ısı yayınlılık özelliği görülmektedir (Grinzato ve diğerleri, 1998; Koçkar, 2012). Bu ölçüm tekniği yapı yüzelerindeki kusurlu/sorunlu alanları tespitinde de kullanılmaktadır. Ancak yanlış sonuçlar elde etmemek için incelenen yüzeye homojen ısıtma uygulanmalıdır (Grinzato ve diğerleri, 1998).

Aktif termografide yüzeyi ısıtmak için radyatör, ısıtıcı, halojen lamba, saç kurutma makinesi vb. gibi yapay ısı kaynakları veya güneş gibi doğal ısı kaynakları kullanılabilir. Isıtma süreleri ve bunun için harcanan enerji incelenen malzemenin özelliklerine bağlıdır (Grinzato ve diğerleri, 1998).

Aktif termografi ile ölçüm üç farklı şekilde yapılmaktadır. Darbe ısı görüntüleme (pulse thermography-PT), kilitlemeli ısı görüntüleme (lock-in thermography-LT) ve darbe fazlı ısı görüntüleme (pulse phase thermography -PPT) gibi üç farklı şekilde uygulanmaktadır (Maldague, 2001).

Pasif Termografi

Cisimlerin doğal koşullarının ürettiği ısı akışını ölçen bir ölçüm tekniğidir (Grinzato ve diğerleri, 2002a) yani ısı farkı oluşturmak için dışarıdan herhangi bir ısı kaynağı kullanılmaz. Bu ölçüm tekniği ile cisimlerdeki ısı düzensizlikleri tespit etmek için kullanılır (Avdelidis

ve diğerleri, 2003b). Örneğin bir ısıtma/soğutma hattında meydana gelen kaçaklar bu teknikle tespit edilebilir. Malzemelerin yüksek ısıl atalet özellikleri sayesinde, yüzeydeki ısıl farklılıklar IRT tarafından incelenebilmektedir (Grinzato ve diğerleri, 2002a; Moropoulou ve diğerleri, 2001).

2.7. Kızılötesi Isıl Görüntüleme ile Yapı Duvarlarının Isıl Performansının İncelenmesi

Kızıl ötesi ısıl görüntüleme (IRT) yöntemi günümüzde birçok alanda olduğu gibi yapı ve yapı malzemelerinin incelenmesi amacıyla da dünyada yaygın olarak kullanılmaktadır. Özellikle tarihi yapıların malzeme koruma ve onarım çalışmalarında malzemede meydana gelen bozulmaların, çatlakların vb sorunların tespitinde yol göstericidir. Son zamanlarda ise yapıların enerji performansının değerlendirilmesinde, yapı duvarlarında meydana gelen ısıl sorunların tespitinde, yapıların yalıtımlılık durumlarının incelenmesinde IRT yöntemi ile yapılan çalışmalar artmıştır.

IRT yöntemiyle yapılan çalışmalar gene olarak iki sınıfa ayrılmaktadır. Bunlardan ilki “Kalitatif (nitel)” diğeri ise “Kantitatif (nicel)” termografidir. Kalitatif termografi, analiz edilen yapıların yüzeyindeki sıcaklık dağılımı hakkında temel bilgiler sağlar (Glavas ve diğerleri, 2019). Bu yöntemde yüzey sıcaklık dağılımını gösteren sıcaklık haritalarına bakılarak nitel değerlendirmeler yapılır. Nitel değerlendirme ısıl sorun tespit etmek ve sorunun yerinin belirlemek için kullanılmaktadır. Ancak ısıl sorunun teşhisinde tek başına yeterli değildir. Çünkü bu yöntemde kamerada okunan sıcaklık değerleri analizi yapılan yüzeyin gerçek sıcaklık değerlerinden farklı olabilir (Glavas ve diğerleri, 2019). Ayrıca nitel değerlendirme yapılan alanlarda sıcaklık dağılımı her zaman tahmin edilen sonucu vermeyebilir. Örneğin bir bina yüzeyinin IR kamera da soğuk olarak görülmesi her zaman iyi yalıtıldığı anlamına gelmeyebilir. Yüzeyde bulunan nemli/ıslak alanda (Koçkar, 2012) ya da yüzeyi ısıtılmadığını için ısı farklı oluşmayan yüzeylerde soğuk görünebilmektedir. . Bu nedenle infrared termografi ile yapılan nitel değerlendirmeler her zaman tek başına yeterli olmamaktadır. Yanıltıcı sonuçlara neden olabilmektedir. Bu nedenle IRT yöntemiyle elde edilen ısıl görüntülerin nicel/sayısal olarak değerlendirilmesi gerekmektedir. Bunun için Kantitatif termografiye ihtiyaç duyulmaktadır. Kantitatif termografinin görevi, analiz edilen bir nesnenin yüzeyinden doğru sıcaklık değerleri sağlamaktır. Kantitatif bir analizi tamamlamak için doğru emisivite (yayıcılık) değerleri, görünür yansıyan sıcaklıklar ve hava koşulları verilerini bilmek gerekir. Kantitatif termografi ancak bu alanda eğitim almış,

tecrübe ve bilgiye sahip kişilerin uygulayabileceği bir yöntemdir (Glavas ve diğerleri, 2019; Koçkar, 2012).

Kızılötesi ısı görüntüleme yöntemi (infrared termografi) alanında bir çok standart vardır. Araştırmacılar, genelde EN 13187: 1998 (Uluslararası Standardizasyon Örgütü, 1998) ve RESNET Binaların Termografik Muayeneleri için RESNET Geçici Kılavuz İlkeleri (Konut Enerji Hizmetleri Ağı, 2010) tarafından tanımlanan kalitatif IRT testlerini kullanmışlardır. Binalarla ilgili olarak ise en yaygın kullanılan “ISO 6781-3: 2015'teki - Binaların performansı - binalarda ısı, hava ve nem düzensizliklerinin kızılötesi yöntemlerle belirlenmesi - Bölüm 3: Ekipman operatörlerinin nitelikleri, veri analistleri ve rapor yazarları” standartıdır (ISO 6781-3, 2015).

Enerji verimliliğini sağlama çalışmalarının arttığı son yıllarda yapı duvarlarının ısı performansları üzerine çalışmalar yapılmaktadır (Ferrarini ve diğerleri, 2016; Nardi ve diğerleri, 2016; Sassine ve diğerleri, 2017). Özellikle enerjinin büyük bir kısmını tüketen mevcut yapıların enerji verimliliğini artırmaya yönelik bakım, onarım ve yenileme çalışmaları hız kazanmıştır. Yapılan bu çalışmaların takibinde kullanılacak tahribatsız muayene yöntemlerinin geliştirilmesi dünya genelinde araştırma konusudur. Bu araştırmalarda farklı yöntemler kullanılmaktadır. Kızıl ötesi ısı görüntüleme yöntemi de son zamanlarda yapı duvarlarının ısı performanslarının belirlenmesinde tercih edilen bir yöntemidir (Ferrarini ve diğerleri, 2016; Nardi ve diğerleri, 2016; O’Grady ve diğerleri, 2017). IRT yöntemiyle yapıların ısı performansının değerlendirilmesinde önemli rol oynayan ısı geçirgenlik direnci (R) ve ısı geçirimsizlik katsayısı (U) özelliklerinin kantitatif (nicel) olarak belirlenmesi hedeflenmektedir (Nardi ve diğerleri, 2016). Nicel (sayısal) verilerle ifade edilebilen ısı parametreler duvarın ısı performansı hakkında objektif değerlendirmelere imkan vermektedir. Bu nedenle IRT yöntemiyle yapılan çalışmalarda öznel değerlendirmelerden kaçınılmalı, sayısal verilerle ifade edilen nicel değerlendirmeler ön planda tutulmalı ve bu alanda yapılan çalışmaların artırılması gerekmektedir. Son yıllarda yapı ısı performansını değerlendirme prosedürünün hızlandırılması ve binaların daha geniş bölümlerini doğrudan, yerinde araştırmak için, kantitatif İnfraRed Termografi (IRT) kullanımı önerilmektedir. Bu anlamda yapılan literatür çalışmalarında yerinde yapılacak çalışmalara ihtiyaç olduğu konusunda hemfikir olunmasına rağmen, halen bu alanda detaylı bir çalışmanın olmadığı vurgulanmaktadır (Nardi ve diğerleri, 2016).

Binaların enerji performansı belirlenirken bina bir bütün olarak ele alınıp incelenmelidir. Binanın çeşitli bölmelerinde oluşan ve ısıl performansı olumsuz etkileyen ısı köprülerine dikkat edilmelidir. Isı köprüleri bina duvarlarının yani bina çevresinin çeşitli bölgelerinde bulunabildiği ve ısı kaybına neden olduğu bilinmektedir (O’Grady ve diğerleri, 2017; Koçkar, 2012). Bina yüzeyinde oluşan ısı köprülerini, hem duvarın toplam ısıl performansını etkileyip ısıl direncini azaltması hem de yerel yoğunlaşma problemlerine neden olarak küf oluşumuna neden olması bakımından mümkün olduğunca sınırlandırmak gereklidir (O’Grady ve diğerleri, 2017). Isı köprüsüyle ilişkili ısı kaybını tanımlayan değer ısıl geçirgenlik değeri (U , W/mK) olarak bilinmektedir (EN ISO 14683, 2000). Standartta belirtilen şekliyle U değeri hesaplanabilir. Isı köprüleri aynı zamanda ısınma hızı değerleri (R_w) ve sıcaklık indeksi (TI) verileri ile de tanımlanmaktadır (Koçkar, 2012). Isınma hızı yüksek bölgeler bir ısıl sorununun varlığına işaret etmektedir. Isınma hızı, ısıl direnç değeri ile ters orantılıdır. Yani ısınma hızı yüksek olan bir bölgede ısıl direnç değeri düşüktür (Koçkar, 2012). Bu durum nemli bölgelerde farklılık göstermektedir. Sıcaklık indeksi verileri de ısıl köprüsü tespitinde kullanılan başka bir parametredir. Sıcaklık indeksinde sınır değeri “1”dir. 1 değerine ne kadar yaklaşırsa, ısıl performansına kadar iyi olduğu anlamı çıkmaktadır. Eğer yüzeyde ısı köprüsü (ısı kaçağı) varsa sıcaklık indeksi değeri 1 değerinin altında, yüzeyde nem sorunu varsa da sıcaklık indeksi (TI) 1 değerinin üstünde bulunmaktadır (Koçkar, 2012).

Isı köprüsü tespit edilen yapı elemanının ısı akışı modelleme yoluyla belirlenebilmektedir. TS EN ISO 10211-1 (2000) standartında ısı köprüsü olan bir yapı elemanının toplam ısı akışının hesaplanması için sayısal olarak nasıl modelleneceğini açıklanmaktadır. Ancak belirtilen bu işlemler ortam şartları ve inşaat detayları bilinen yapılarda uygulanabilmektedir. Mevcut yapılarda bu işlemlerin uygulanamayacağı bilinmektedir. (O’Grady ve diğerleri, 2017). Bu nedenle yapıların ısıl geçirimsizlik özelliklerini yerinde ölçebilecek yöntemlere ihtiyaç vardır. Bugüne kadar bina yüzeyinin yerinde/sahada U değerini belirlemek için kullanılan tek yöntemin ısı akış ölçer (Heat flux meter, HFM) yöntemi olduğu bilinmektedir (ISO 9869, 2014; O’Grady ve diğerleri, 2017). Bu yöntem duvarın sadece bir noktasından alınan ölçüm sonucuna göre değer verir. Bu nedenle homojen olmayan yapı duvarları için doğru sonuçlar vermeyebilir (Danielski ve Fröling, 2015). İkinci bir durum ise HFM yöntemiyle ölçüm için en az 72 saat ve en fazla bir hafta test süresi gerektirir (ISO 9869, 2014). Bu olumsuz koşullar göz önüne alınarak sahada ölçüme imkan veren tahribatsız muayene yöntemlerinin geliştirilmesine yönelik araştırmalar devam

etmektedir. Bu bağlamda infrared termografi (IRT) yöntemi yerinde U-değeri ölçümleri için iyi bir alternatif olabilir (Tejedor ve diğerleri, 2017). HFM ile IRT yöntemi karşılaştırıldığında, IRT ile bir duvar alanının değerlendirilmesi sadece birkaç saatlik test süresi gerektirdiğinden (Tejedor ve diğerleri, 2017) ve duvarın bütün yüzeyi hakkında bilgi verebileceğinden daha çok tercih edilebilir bir yöntem olduğu görülmektedir. Geleneksel olarak, IRT sadece bölgedeki/yüzeydeki termal düzensizlikleri tespit etmek için nitel analizde kullanılmıştır (EN 13187, 1998; RESNET, 2010). Bununla birlikte, Kantitatif IRT yöntemleri ile U-değerlerini belirlemek için kullanılabilir olduğu anlaşılmıştır ancak bu yöntem tam olarak hala geliştirilmemiştir (Danielski ve Fröling, 2015).

Literatürde yapılan çalışmalarda Infrared termografi yöntemi, HFM tekniği ve/veya modelleme tekniği ile yapılan çalışmalarla birlikte kullanılmış ve IRT yöntemin kullanılabilirliği sınanmıştır. Infrared termografi (IRT) yöntemi ile yapılan çalışmaların bir kısmı aşağıda özetlenmiştir:

Albatici ve Tonelli (2010) U değerini belirlemeye yönelik yaptıkları çalışmada IRT yöntemi ile elde edilen sonuçları ve teorik değerlerle kıyaslamış ve aralarında % 30 civarında bir fark bulmuşlardır. IRT tekniğini doğrulamak için uzun yıllar farklı dış duvarlar üzerine deneysel çalışmalar yapılmıştır (Albatici ve Tonelli, 2015). Yapılan bu çalışmada da IRT yöntemiyle elde edilen değerler diğer yöntemlerle elde edilen değerlere göre yaklaşık %20 civarında sapmalar göstermiştir. Bu durum IRT yönteminin ortam koşullarından etkilendiği şeklinde açıklanmaktadır (Nardi ve diğerleri, 2015). IRT tekniğinin kararlı hal durumunda olan laboratuvar koşullarında ise verimli çalıştığı gösterilmiştir (O'Grady ve diğerleri, 2017).

Yapı duvarlarının ısı performansını hakkında bilgi sahibi olabilmek için yapı duvarına ait ısı geçirimsizlik değeri (U)'nin ve/veya ısı direnç gibi ısı parametrelerinin belirlenmesi gerekmektedir. Bu ısı parametrelerine çoğu kez teorik hesaplamalar ile yapılmaktadır. Farklı formüllerle ve farklı yöntemlerle elde edilen ısı parametre değerlerinin birbirine ne kadar benzediği bir merak konusudur. Bu nedenle Nardi (2016) yaptıkları çalışmada bu farklı sonuçların etkisini araştırmayı hedeflemiş, bu hedef doğrultusunda yapı cephesinin U değerini belirlemek için literatürde verilen dört farklı yöntemi kullanılmışlardır. Bu yöntemler: IRT yöntemi, muhafazalı sıcak kutu yöntemi, ısı akış ölçer (HFM) yöntemi ve

teorik hesaplamalar şeklinde sıralanmaktadır. Bu yöntemler sonucunda elde edilen verilerin karşılaştırılması yapılmıştır.

Tejedor ve diğerleri (2017) yapı duvarlarının ısıl geçiririmsilik (U) değerini IRT yöntemiyle nicel olarak belirlemek amacıyla bir çalışma yapmışlardır. Yapılan bu çalışmada, tek katmanlı duvarlar için % 1-2 ve çok katmanlı duvarlar için % 3-4 sapma ile nicel olarak U-değerleri belirlenmiştir. 2-3 saat süren çalışma sonucunda nicel (kantitatif) IRT yönteminin gelecekte bina cephesinin ısıl performansı hakkında bilgi vermek için kullanılabilir olduğunu söylemişlerdir (Tejedor ve diğerleri, 2017).

Glavas ve diğerleri (2019) çalışmalarında tarihi binalardaki gizli açıklık ve yapısal kusurları tespit etmek amacıyla kızılötesi ısı görüntüleme yöntemini kullanmışlardır. Kızılötesi termografi yöntemiyle iki binanın termografik analizi yapılmıştır. Çalışma 20 °C sıcaklık farkının olduğu sabit bir ısı akış ortamında Aralık 2017 ve Ocak 2018'de gerçekleştirilmiştir. Çalışma sonucunda elde edilen analiz sonuçlarının literatürde verilen sonuçlara yakın çıktığı söylenmiştir (Glavas ve diğerleri, 2019).

O'Grady ve diğerleri (2017) yaptıkları çalışmada yapı cephelerinin ısıl geçiririmsilik özelliklerini olumsuz etkileyen, mevcut yapılarda tespiti zor olan ısı köprülerinin tespiti ve analizi için infrared termografi tekniğini kullanmışlardır. Bu çalışmada yapı cephesinin ısıl geçiririmsilik özellikleri gerçek ısı değerleri ile sayısal olarak belirlenmiştir. Çalışma laboratuvar koşullarında kararlı ortam şartlarında yapılmıştır (O'Grady ve diğerleri, 2017). Barreria ve diğerleri (2017) infrared termografi yöntemin kullanarak bina cephesinde oluşan hava kaçalarını tespit etmek için deneysel bir çalışma yapmışlardır. Yapılan çalışma kullanılan odanın pencere ve panjur kenarlarında oluşan hava kaçakları IRT yöntemiyle tespit edilmiştir. Çalışma da elde edilen termal/ısı görüntüleri ile yapılan nitel analizde sızıntı noktasına yakın alanların daha soğuk olduğu görülmüştür. Yapılan nicel analizle elde edilen sonuçlar diğer yöntemlerle elde edilen veriler ile karşılaştırılmıştır (Barreira ve diğerleri, 2017).

Serra ve diğerleri (2017) aktif IRT yöntemini kullanarak deneysel bir çalışmada bina ısıl geçiririmsilik özelliklerini incelemiş ve sonuçları ısı transfer simülasyonları ile karşılaştırmışlardır. Çok katmanlı ortamlarda difüzyonla ısı transferini hesaplamak için analitik ifadelerle dayalı bir simülasyon modeli kullanıldığına ancak bu yöntemin yapı

elemanlarıyla kusurlu/sorunlu bölgeleri tespit edilmediğini, aktif IRT yönteminin yapı kusurlarını tespit etmede kullanılabileceğini bildirmişlerdir. Bu nedenle yaptıkları bu çalışmada binalardaki IRT uygulamalarını daha da ileriye götürmeyi amaçlamışlardır. Çalışma sonucunda IRT yöntemi ile bina cephelerinde bulunan kusurların veya eklerin tespit edebilir; çok katmalı yapı elemanı bileşenlerinin ısı karakterizasyonunun yorumlanmasında kullanılabilir olduğu anlaşılmıştır (Serra ve diğerleri, 2017).

Aversa ve diğerleri (2017) duvarların ısı davranışını incelemek amacıyla termografi yöntemine dayalı yenilikçi bir deneysel prosedür önermişlerdir. Çalışmalarında iki farklı duvar türünü karşılaştırmışlardır. Bu duvarlardan bir tanesi boşluklu bir tuğla duvar diğeri ise kenevir lifli bitkisel bir yalıtım dolgusu ile boşlukları doldurulmuş tuğla duvardır (Aversa ve diğerleri, 2017). Bu çalışmada duvarın bir yüzeyi halojen lambalar ile ısıtılmış ve duvar her iki yüzeyden de termal kameralar ile takip edilmiştir. Termografi, simülasyon ve EN ISO 13786: 2007 standartında tariflenen üç farklı yöntemle elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır (Aversa ve diğerleri, 2017).

Yapılan bu çalışmalarda İnfrared termografi (IRT) yönteminin yapı dış duvarında oluşan ısı kayıplarını ve ısı geçirirmlilik değerini sayısal olarak belirleme potansiyeline sahip olduğunu göstermiş ve standart bir ölçüm yöntemi oluşturmak için bu alanda çok daha fazla çalışma yapılmasına ihtiyaç duyulduğu anlaşılmıştır.

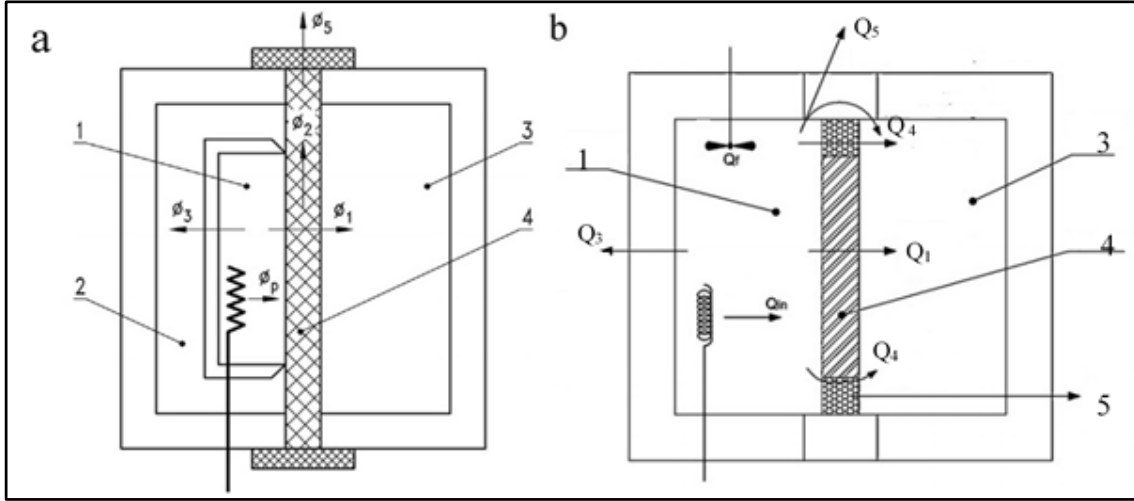
2.8. Sıcak Kutu Deney Yöntemi ile Duvarların Isıl Direnç Performanslarının İncelenmesi

Sıcak kutu (ısı kabini) yalıtım malzemelerinin, duvar yapım elemanlarının kararlı haldeki ısı iletim özelliklerini belirlemek amacıyla geliştirilmiş bir deney aracıdır. Farklı ülkelerde EN ISO 8990 ve ASTM C1363-05 standartlara uygun ve farklı boyutlarda tasarlanmış Mahfazalı Sıcak Kutu (Şekil 2.8 a) ve Kalibre Edilmiş Sıcak Kutu (Şekil 2.8 b) diye adlandırılan ısı kabinleri (sıcak kutu) mevcuttur (BS EN ISO 8990,1996; Gao ve diğerleri, 2004; Nussbaumer ve diğerleri, 2006; Geola ve diğerleri, 2009; Ghazi ve diğerleri, 2003). Her iki sıcak kutu da, arasına deney numunesinin yerleştirileceği (Asdrubali ve Baldinelli, 2011) sıcak ve soğuk, ileri geri hareketli olmak üzere iki bölmeden oluşmaktadır. Sıcak bölmede duvar yüzey sıcaklığını ve ortam sıcaklığını ayarlamaya yarayan sabit ısı kaynakları vardır. Ayrıca duvar yüzey sıcaklıklarını ve ortam sıcaklığını ölçecek sıcaklık

sensörleri vardır. Aynı şekilde soğuk bölmede de ortam ve yüzey sıcaklıklarını ölçecek sıcaklık sensörleri vardır (BS EN ISO 8990, 1996). Sıcak kutu deney yönteminde kararlı ortam şartlarında yani sıcak soğuk sıcaklıklarının dengeye geldiği şartlarda numunenin ısı direnci belirlenmektedir (Asdrubali ve Baldinelli, 2011). Mahfazalı ve kalibreli sıcak kutularda ısı akışının yönü kabinin özelliğine göre farklılık göstermektedir.

Mahfazalı sıcak kutu da (Şekil 2.6 (a)), deney numunesinde oluşan yanal ısı akışını (Q_2) ve mahfaza olarak kullanılan ölçme kutusunun duvarlarında oluşan ısı akışını (Q_3) azaltmak için ve ortamın ısısın kontrol altında tutabilmek için mahfaza diye adlandırılan bir engel ile kuşatılmıştır. Bu durumun temel nedeni sıcak ve soğuk kabin arasında yerleştirilen homojen deney numunesinin ve ölçme kutusunun hem iç hem de dış tarafı üniform sıcaklıkta tutulmak istenmesidir. Böylece konulan engel (mahfaza) kutusunun içindeki ve dışındaki hava için bir sıcaklık dengesi oluşturmuş olacaktır. Bu durumda deney numunesi yüzeyinden geçen ısı (Q_1) için kararlı/dengeli bir ortam elde edilecektir. Çünkü deney numunesinin yüzeyinde oluşan denge, ölçme kutusunun sıcak ve soğuk taraf ortamı arasında bir denge olduğunu göstermektedir. Kısaca bu yöntemle ulaşmak istenilen $Q_1 = Q_3 = 0$ olması durumudur. Bu eşitlik deney numunesi yüzeyinden geçen toplam ısı akışının (Q_1), mahfazadan ölçme kutusuna geçen ısıya (Q_3) eşit olduğunu anlatmaktadır (BS EN ISO 8990, 1996).

Kalibre edilmiş sıcak kutu da (Şekil 2.6 (b)), sıcak ve soğuk taraf iki ısı kabininden oluşmaktadır. Bu sıcak kutuda da sıcaklık kontrol altındadır. Ancak bu teknikte kabin ölçme kutusunun ortam sıcaklığı ile aynı seviyede olmasına ihtiyaç duyulmayan bir ortamla çevrelenmiştir. Q_3 , sıcak kutu kabin duvarlarından geçen ısı akışını ifade etmektedir. Sıcak kutunun kabininde oluşan bu ısı kayıplarını en aza indirmek için yüksek ısıl dirence sahip malzeme ile kabin yapılmıştır. Q_p her iki sıcak kutu yönteminde de çalışmada harcanan toplam güç girdisini ifade etmektedir. Q_4 ve Q_5 sıcak kutu kabini ve duvar birleşim noktalarında meydana gelen yanal ısı kayıplarını göstermektedir. Sıcak kutu deney yöntemiyle yapılan çalışmalarda yanal ısı akışları ile karşılaşılmaktadır. Bu yanal ısı akışlarının deney sonuçları üzerine etkisini en aza indirmek için daha önceden test edilmiş ve ısıl dirençleri bilinen deney numunelerine göre kalibrasyon yapılmalıdır (BS EN ISO 8990, 1996). Yanal kayıp kalibrasyonu yapılırken kullanılacak kalibrasyon numunesinin ısıl direnç ve kalınlık değerlerinin ölçümü yapılacak deney numuneleri ile benzerlik göstermesine dikkat edilmelidir (BS EN ISO 8990, 1996).



Şekil 2.6. Sıcak kutu deney düzeneğini: a) mahfazalı sıcak kutu deney düzeneği b) kalibreli sıcak kutu deney düzeneği ve düzenekte oluşan ısı akışının şematik görüntüsü: (1) sıcak taraf ölçüm kabini ; (2) mahfaza alanı; (3) soğuk taraf ölçüm kabini ; (4) çalışma duvarı; (5) kuşatma/sarma paneli (TS EN ISO 8990, 2002; BS EN ISO 8990, 1996)

Sıcak kutu deney düzeneği ile kararlı durumda olan yapı malzemelerinin ısı iletim özelliklerinin tayininde kullanılmaktadır.

Mahfazalı sıcak kutu için deney numunesi büyüklüğü, deney numunesi kalınlığının 3 katı veya 1 m x 1 m boyutlarından büyük olan seçilirken; kalibre edilmiş sıcak kutu için deney numunesi büyüklüğü 1,5 m x 1,5 m olarak alınır. Verilen ölçülere uygun duvarı ısı kabineye yerleştirirken kolaylık sağlanması adına hareketli çerçeveler üretilmiştir. Deney yapılacak duvarlar bu hareketli çerçeveler üzerine inşa edilir. Deney esnasında duvarla ısı kabini arasında kenarlardan ya da başka bölgelerden hava ve nem girmemesine özen gösterilmelidir. Hazırlanan deney numunelerinin yüzey sıcaklıkları ortam sıcaklığının ölçülmesi için metrekareye en az iki tane ve 9 sıcaklık ölçer yerleştirilmelidir. Ölçümler deney kararlı hale geldikten en az 3 saat sonra bitirilmelidir ve kararlı hale geldikten sonraki 3 saatlik dilim içerisinde giren veriler duvarların ısııl özelliklerini (U , R , $q...$) belirlemek için yapılacak hesaplamalarda kullanılmalıdır. Bu süre büyük kütleli deney numunelerine göre yeterli gelmeyebilir ve değişiklik gösterebilir (BS EN ISO 8990, 1996; ISO 12567-1, 2010)

Isı kabini kullanılarak yapılan deneylerde belirlenen deney numunesine bir taraftan verilen ısınnın diğer tarafa geçişini yani ısı geçirimsilik katsayısını (U)(Basak ve diğerleri, 2015; Ghosh, 2014; Geola ve diğerleri, 2009; Wakili ve diğerleri, 2003; Koçkar, 2012), ısı iletkenlik hesap değerini (λ) (Wakili ve diğerleri, 2003; Koçkar, 2012) ısıl direncini (R),

(Koçkar, 2012) ısı akış yoğunluğunu (q), sıcaklık indeksini (TI) (Koçkar, 2012) belirlemek için kullanılabilir. Ayrıca sıcak kutu deney yönteminin yapı duvarında bulunan ısı köprülerinin tespitinde de işe yarar olduğu bilinmektedir (Koçkar 2012; Martin, ve diğerleri, 2012). Isı iletim özellikleri çoğunlukla hazırlanan deney numunesinin kendisine ve taşıdığı özellikler ile sınır şartlarına, boyutlarına, ısı transferinin yönüne, sıcaklıklara, sıcaklık farklarına, hava akım hızlarına ve bulunduğu ortamın bağıl nemine bağlıdır (BS EN ISO 8990, 1996). Tüm bu farklar hesaplama yapılırken göz önünde bulundurulmalıdır.

Sıcak kutu deney yöntemi yapı malzemelerinin ısı özelliklerinin araştırılmasında yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir. Literatürde farklı tasarımlarda olan sıcak kutu örnekleri mevcuttur (Ghosh ve diğerleri, 2014; Li ve diğerleri, 2017; Asdrubali ve Baldinelli, 2011; Buratti ve diğerleri, 2016). Sıcak kutu kullanılarak yapılan çalışmalar hakkında kısaca bilgi verilmiştir.

Astruaballi ve diğerleri (2011) sıcak kutu deney yöntemi ile ısı geçirgenlik (U) ölçümleri ile ilgili bir çalışma yapmışlardır. Bu çalışmada yapı cephelerinde kapı, pencere ya da ısı köprüleri ile oluşan ısı kaybının laboratuvar ortamında gerçek değerinin belirlenmesi amacıyla yapılmıştır. Bu çalışmada sıcak kutu yönteminin kalibrasyonu için üç farklı standarttan: Avrupa standardı (EN ISO 8990, 1996), Amerikan standardı (ASTM C1363-05, 2005) ve Rus standartından (GOST 26602.1-99, 1999) faydalanılmış ve sonuçları birbirleriyle karşılaştırılmıştır (Astruaballi ve diğerleri, 2011).

Wakili ve Tanner (2003) boşluklu kil tuğlalarının ısı performansını sıcak kutu deney yöntemiyle araştırmışlardır. Yapılan çalışmada elde edilen sayısal sonuçlar tuğla boşluklarına dolan harç malzemenin tuğla duvarının ısı direncini (R) önemli ölçüde değiştirebileceğini göstermektedir (Wakili ve Tanner, 2003).

Meng ve diğerleri (2015, 2017) duvarların ısı geçirgenliğinin (U) yerinde tespit edilmesi için sıcak kutu ve ısı akış ölçer yöntemlerini kullanarak bir çalışma yapmışlardır. Çalışmada ısı akış ölçer ve sıcak kutu deney düzeneği birlikte kullanılmış ve araştırma yerinde, mevcut yapı duvarı üzerinde yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar deneysel yöntemlerin işe yaradığını ve çok olumsuz test koşulları altında dahi hata payının tasarım değerleri içinde kabul edilebilir sınırlar içinde çıktığını göstermiştir (Meng ve diğerleri, 2015, 2017).

Basak ve diğerkleri (2015) yaptıkları çalışmada malzemenin ısı performans değerklendirmesi ve U değerkinin belirlenmesi için muhafazalı sıcak kutu deney yönteminden faydalanmıştır (Basak ve diğerkleri, 2015).

Li ve diğerkleri (2017) yaptıkları çalışmada sıcak kutu deney yöntemi ile sandevic bir dış duvarın ısı performansını incelenmiştir. Isı yalıtımlı ve yalıtımsız iki set şeklinde deney yapılmıştır. Yüzey sıcaklığı, ortam sıcaklığı ve duvar içindeki ara katların üç farklı hava akımındaki ısı akış yoğunluğu test edilmiştir. Deney sonuçlarına göre geleneksel dış duvar ile karşılaştırıldığında, hava akış hızı ve basınç artışı sandviç duvarın ısı performansını artırdığı görülmüştür. Isı yalıtım levhasının sandviç duvarın ısı performansını % 12,3 oranında artırdığı da ifade edilmiştir (Li ve diğerkleri, 2017).

Martin ve diğerkleri (2012) yılında ısı köprü analizinde muhafazalı sıcak kutu deney yöntemini kullanılmışlardır. Deney sonuçları similasyon verileri ile karşılaştırılarak yorumlanmıştır (Martin ve diğerkleri, 2012).

Gao ve diğerkleri (2004) çalışmalarında boşluklu kagırların ısı kaybını sıcak kutu deney yöntemiyle araştırmış ve çalışma sonucunda bir analiz yöntemi geliştirmişlerdir (Gao ve diğerkleri, 2004).

Burch ve diğerkleri (1990) ürettikleri iklim odasını (sıcak kutu) çok katmanlı bir duvar duvarının araştırılmasında kullanmışlardır. Bu çalışması ile tam ölçekli bina cephelerinde bulunan bileşenlerin/katmanların araştırılmasına olanak tanımışlardır (Burch ve diğerkleri, 1990).

Kus ve diğerkleri (2013) yılında Türkiye de yerel imkanlarla üretilmesi ve düşük ısı iletkenlik değerkine sahip olması sebebiyle pomza agregalı boşluklu beton kagırların hidrotermal performansı üzerine sıcak kutu deney yöntemini kullanarak bir çalışma yapmıştır. Duvar yüzeylerinde ve oyuk alanlarda yapılan çalışmada ısı performansın homojen alanlarda daha iyi çıktığı belirtilmiştir. Heterojen ve pürüzlü duvar yüzeylerine ilaveten ıslak/nemli yapı duvarlarının incelenmesinin ve değerklendirilmesinin zor olduğu ifade edilmiştir (Kus ve diğerkleri, 2013). Bu araştırma kapsamında mahfazalı sıcak kutu kullanılmış ve deney düzeneğinden soğuk kabin çıkarılarak deney düzeneği IRT yönteminin dahil edilmesiyle yeniden düzenlenmiştir.

3. MALZEME VE YÖNTEM

Bu bölümde çalışmada kullanılan kagir malzemeler, bu kagir malzemelerden üretilen duvarlar ve mevcut bir duvar örneği ile bu duvarların ısıl geçirimsizlik özelliklerinin belirlenmesinde kullanılan yöntemler ilgili başlıklar altında açıklanmıştır.

3.1.Kagir Duvar Malzemeleri ve İncelenen Duvar Örnekleri

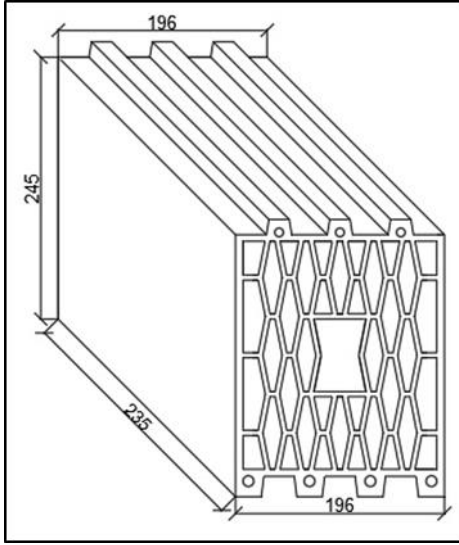
Bu tez çalışmasında duvar dolgu malzemesi olarak üç farklı kagir kagir malzeme kullanılmıştır. Bu kagir malzemeler izo tuğla, bims blok ve gaz betondur. Çalışmada kullanılan kagir malzemelerin termofiziksel özellikleri Çizelge 3.1’de özetlenmiştir.

Çizelge 3.1. Çalışma duvarlarında kullanılan kagir malzemelerin termofiziksel özellikleri

Malzeme	Tanım	Boyut cm	d cm	P kg/m ³	λ W/mK	Yangın sınıfı	μ (birimsiz)
İD	İzo tuğla (Düşey delikli-lamba zıvana geçmeli W sınıfı)	29x20x23,5	20	700	0,24*		5~10
BD	Bims blok (geçmeli, SW tipi)	39x19x18,5	19	700	0,25*	A1 (hiç yanmaz)	5~10
GD	Gaz beton G2/400 sınıfı	60x20x25	20	400	0,13*	A1 (hiç yanmaz)	5~10
Harç-1	Kireç - çimento harcı	-	19	1800	1,0*		15~35
Harç-2	Gaz Beton Yapıştırma harcı		20	1400-1700			

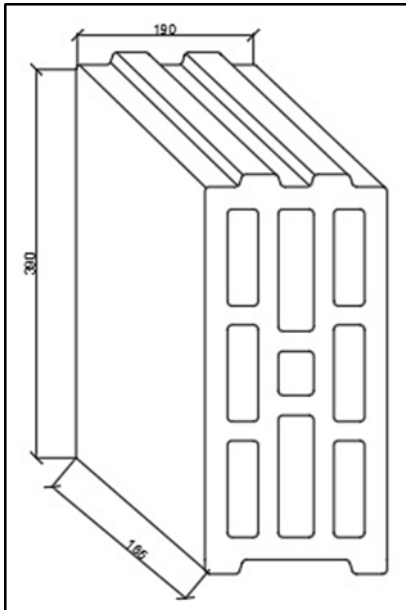
ρ : Birim hacim ağırlığı, kg/m³ λ : Isı iletkenlik hesap değeri, W m⁻¹K⁻¹ İD: İzo tuğla duvar
 μ : Su buharı difüzyon direnci, Birimsiz R: Isıl iletkenlik direnci ,m²K W⁻¹ BD: Bims Duvar
U: Isıl geçirgenlik katsayısı (W m⁻²K⁻¹) d: kalınlık (cm) GD: gaz beton duvar
Boyut (uzunluk x genişlik x yükseklik) cm * TS 825 standartından alınmıştır.
Not: gaz beton için verilen λ değerlerine derzlerin etkisi dahildir.

Çalışmada ilk duvarın yapımında kullanılan kagir malzeme izo tuğladır. İzo tuğla Manisa Turgutlu bölgesinde bulunan Kudret Tuğla firmasından temin edilmiştir. Kullanılan izo tuğla TS EN 771-1 (2005) standartında uygun, 29 cm x 20 cm x 23,5 cm boyutlarında (uzunluk x genişlik x yükseklik), yoğunluğu 700 kg/m³ olan petek delikli ve düşeyde lamba-zıvana geçme birleşimlidir. İzo tuğlaya ait detay çizimi Şekil 3.1’de verilmiştir.



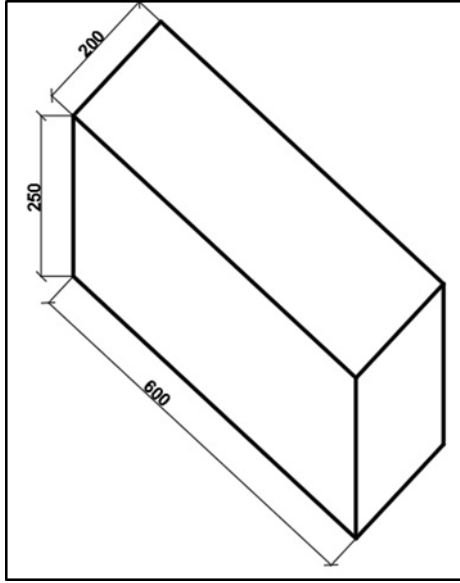
Şekil 3.1. Çalışma duvarında kullanılan petek delikli ve düşeyde lamba-zıvana geçme birleşimli izo tuğlanın şematik detay çizimi

Çalışmada ikinci duvarın yapımında kullanılan dolgu malzemesi hafif beton kagir malzeme grubunda yer alan bims kagirdir. Çalışmada kullanılan Bims kagir, Nevşehir yöresinde bulunan Net Bims firmasından temin edilmiştir. Bims blok TS EN 771-3 (2005) standartına uygun, 39 cm x 19 cm x 18,5 cm boyutlarında (uzunluk x genişlik x yükseklik), yoğunluğu 700 kg/m^3 olan, SW tipi düşey delikli ve geçme birleşimlidir. Bims blok malzemeye ait detay çizimi Şekil 3.2’de gösterilmiştir.



Şekil 3.2. Çalışma duvarında kullanılan düşeyde delikli ve lamba-zıvana geçmeli bims blok duvar dolgu malzemesinin şematik detay çizimi

Çalışmada incelenen son duvarda kullanılan hafif beton kagir duvar dolgu malzemesi grubunda yer alan gaz betondur. Çalışmada kullanılan gaz beton AKG firmasından temin edilmiştir. Gaz beton TS EN 771-4 (2005) standartına uygun, 60 cm x 20 cm x 25 cm boyutlarında (uzunluk x genişlik x yükseklik), yoğunluğu 400 kg/m³ olan geçmesiz/ düz kagir şeklindedir. Gaz betona ait detay çizimi Şekil 3.3’de gösterilmiştir.



Şekil 3.3. Çalışma duvarında kullanılan gaz beton duvar dolgu malzemesine ait şematik detay çizimi

İzo tuğla, bims blok ve gaz beton duvar dolgu malzemeleri kullanılarak üç farklı duvar kesiti oluşturulmuştur. Her bir duvar yaklaşık 100 cm x 100 cm boyutlarında olacak şekilde iki farklı duvar yürütecisi üzerine inşa edilmiştir. Duvarlardan ilki kızılötesi ısı görüntüleme (IRT) ve sıcak kutu yöntemlerinin birleşik kullanımı için oluşturulan deney düzeneği (Resim 3.1.a, Resim 3.2.a, Resim 3.3.a) için, ikincisi ise muhafazalı sıcak kutu deney düzeneği (Resim 3.1.b, Resim 3.2.b, Resim 3.3.b) için hazırlanmıştır. Çalışmada kullanılan duvarlar “İD” (izo tuğla duvar), “BD” (bims blokduvar) ve “GD” (gaz beton duvar) olarak adlandırılmıştır.



(a)

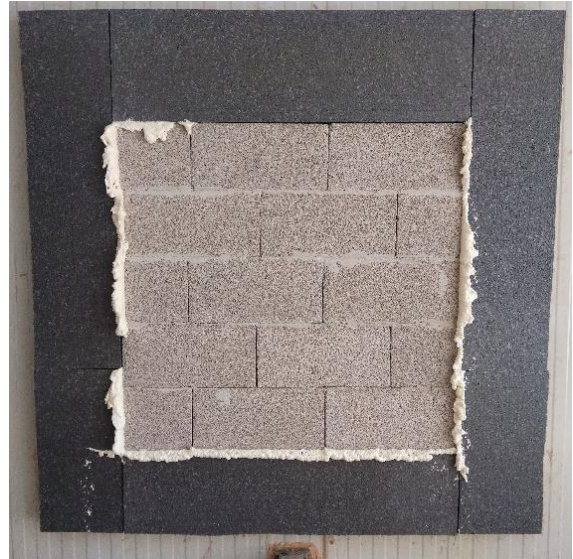


(b)

Resim 3.1. İzo tuğla duvarın ön görünüşü: a) IRT-HB için hazırlanan duvar, b) Muhfazalı sıcak kutu deney düzeneği için hazırlanan duvar.

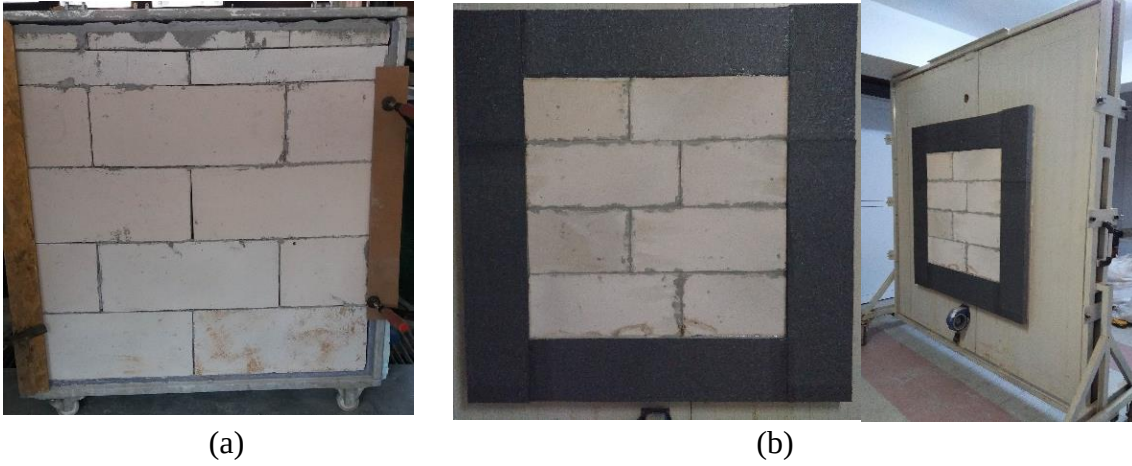


(a)



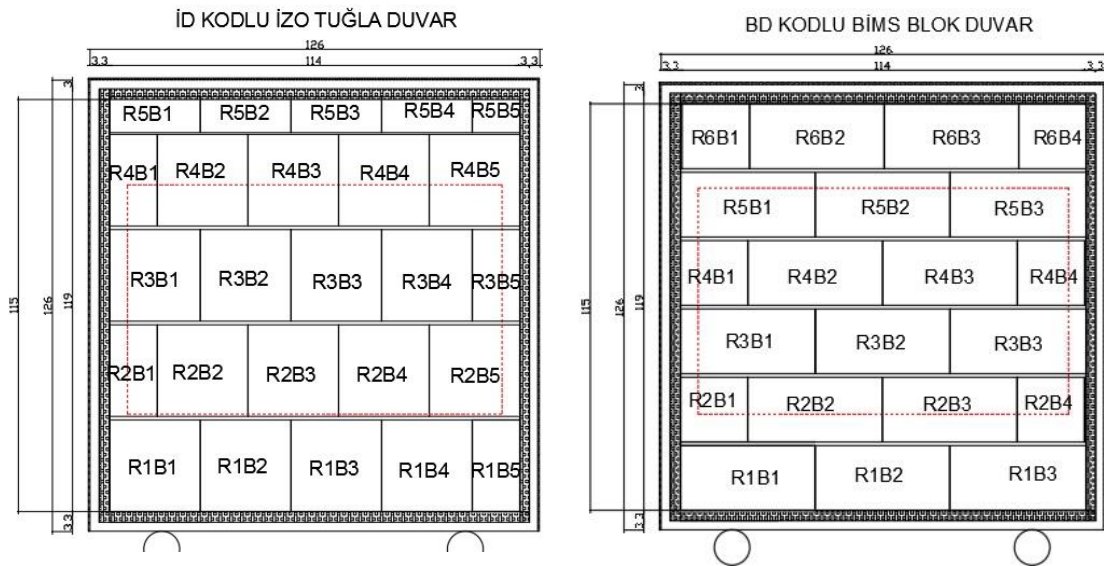
(b)

Resim 3.2. Bims blok duvarın ön görünüşü: a) IRT-HB için hazırlanan duvar, b) Sıcak kutu deney düzeneği için hazırlanan duvar.



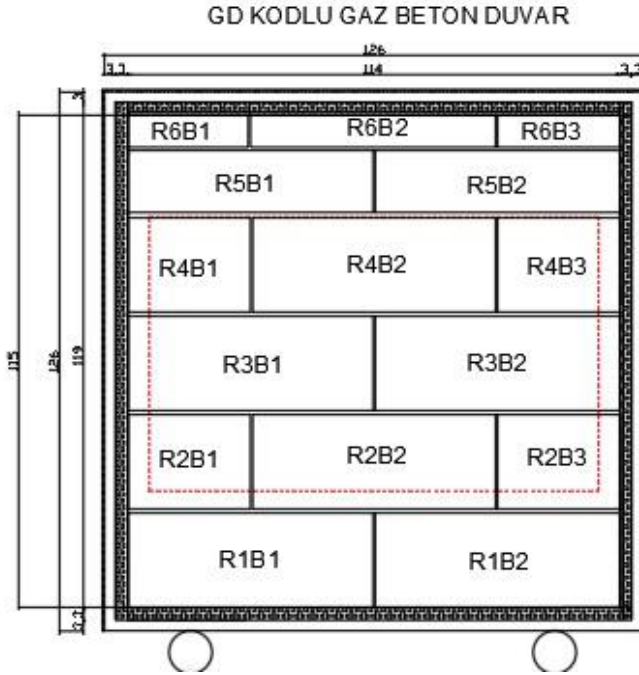
Resim 3.3. Gaz beton duvarın ön görünüşü: a) IRT-HB için hazırlanan duvar, b) Sıcak kutu deney düzeneği için hazırlanan duvar.

İD (izo tuğla duvar) ve BD (bims blokduvar) kodlu duvarların üretimi için aynı niteliklere sahip çimento-kireç bağlayıcı harç (takviyeli harç) malzeme kullanılmıştır. Bu harç malzeme “Harç 1” olarak tanımlanmıştır (Bkz. Çizelge 3.1). Harç yapımında kireç:çimento bağlayıcı miktarı 1/3 oranında kullanılmıştır. Kullanılan bu harcın birim hacim ağırlığı (ρ) 1800 kg/m³, ısı iletim katsayısı (λ) 1,0 W/mK ve su buharı difüzyon direnci (μ) 15~35 kabul edilmiştir (bkz. Çizelge 3.1) (TS 825, 2008). İD ve BD kodlu duvarların şematik çizimi Şekil 3.4’de verilmiştir.



Şekil 3.4. IRT ve sıcak kutu deney yönteminin birleşik kullanımı ile incelenen İD kodlu izo tuğla duvarın (solda) ve BD kodlu bims blokduvarların (sağda) şematik çizimi

GD (gaz beton duvar) kodlu duvarda ise gaz beton kagırlar arasında özel yapıştırma harcı kullanılmıştır. Bu harç malzeme “Harç 2” olarak tanımlanmıştır. Kullanılan harcın birim hacim ağırlığı (ρ) 1500 kg/m³’tür (bkz. Çizelge 3.1). Yatayda ve düşeyde kullanılan harcın kalınlığı yaklaşık 5 mm’dir. GD kodlu duvarın şematik çizimi Şekil 3.5’de verilmiştir.



Şekil 3.5. IRT ve sıcak kutu deney yönteminin birleşik kullanımı ile incelenen GD kodlu gaz beton duvarın şematik çizimi

Şekil 3.4 ve Şekil 3.5 üzerinde gösterilen R: her bir yatay sıra sayısını, B: her bir yatay sırada kullanılan kagır malzeme sayısını ifade etmektedir.

Hareketli duvar yürüteçleri üzerine inşa edilen duvarların duvar-yürüteç ya da yürüteç-sıcak kutu birleşim noktalarında oluşan hava kaçakları, derzlerde meydana gelen ısı köprüleri duvarın ısıl geçirimliliğini olumsuz etkilemektedir. Çalışılan duvar kesitlerinde oluşan ısıl sorunlar incelenmiş; bu ısıl sorunların ısıl karakteristikleri belirlenmiş ve duvarın ısıl geçirimlilik özelliklerine etkisi değerlendirilmiştir.

Çalışmada son olarak ısıl yalıtımlık özelliğini belirlemek üzere çok katmanlı mevcut bir duvar üzerinde çalışma yapılmıştır. Çalışmada bir ofise ait iç duvar kullanılmıştır. İncelenen mevcut duvara ait bilgiler ve kullanılan yöntem birlikte ilerleyen sayfalarda verilmiştir.

Çalışmada oluşturulan duvar örnekleri ve mevcut duvar örneği üzerinde yapılan deneysel çalışmalar aşağıda ilgili başlıklarda anlatılmıştır.

3.2. Duvar Malzemelerin Termofiziksel Özelliklerinin Belirlenmesi

Çalışmada kullanılan duvar malzemelerin (izo tuğla, bims blokve gaz beton) birim hacim ağırlıkları, özgül ısıları laboatuvar ortamında yapılan standart deneyler ile belirlenmiş ve ısı iletkenlik hesap değeri mahfazalı sıcak kutu metoduyla ölçülmüştür. Bu termofiziksel özelliklerin belirlenmesi ilgili alt başlıklar altında detaylıca anlatılmıştır.

Birim hacim ağırlığın belirlenmesi

Bu çalışmada üç farklı kagir malzemenin birim hacim ağırlıkları RILEM,1980; TS 699, 1987; TS EN 1936;2007 standartlarında tarfilendiği şekliyle belirlenmiştir. Bunun için ilk olarak duvarlarda kullanılan kagir malzemelerin kütlesi tartılmış ve hacmi hesaplanmıştır. Deneysel olarak elde edilen veriler “Eş. 3.1”de kullanılarak kagir malzemelerin birim hacim ağırlıkları belirlenmiştir. Sonuçlar bulgular kısmında verilmiştir.

$$\rho_{RE f} = \frac{M_{Re f}}{V_{Re f}} \quad (3.1)$$

Burada; M_{Ref} . Çalışmada kullanılan kagir malzeme kütlesini (kg), V_{Ref} . Çalışmada kullanılan kagir malzeme boşluklu hacmini (m³) ifade eder.

Özgül ısı değerinin belirlenmesi

Bir malzemenin bir gramını bir °C ya da bir kilogramını bir kelvin (K) artırmak için gerekli olan ısı enerjisi miktarına denir. Özgül ısı iki türlü belirlenebilmektedir: sabit hacimde özgül ısı (c_v) ve sabit basınçta özgül ısı (c_p). Sabit hacim de özgül ısı belirlenirken hacim, sabit basınçta özgül ısı belirlenirken ise basınç sabit tutularak bir gramın sıcaklığını bir derece artırmak için kullnılan enerjiye bakılır. Gazlar için c_p değeri c_v değerinden büyüktür. Özgül hacmi ya da yoğunluğu basınç ve sıcaklıkta değişmeyen sıkıştırılmaz maddeler yani sıvılar ve katılar için sabit basınç ve sabit hacim özgül ısıları aynıdır ($c=c_p=c_v$). Sıvılar ve katıların

özgül ısı değerleri sadece sıcaklığa bağlıdır (Çengel, 2011:7). Sıkıştırılmaz maddelerin iç enerjilerindeki değişimi yani sıcaklık farkı olan bölgelerdeki enerji aktarımını gösteren ısı formülü “Eş. 3.2” de gösterilmiştir. Isı (q) birimi Joule (J) veya Kalori (cal) ile ifade edilmektedir (Çengel, 2011: 12-13; TS 4048, 2013; P. Çiçek, 2009).

$$q = m.c.\Delta T \quad (3.2)$$

Burada; m : Malzeme kütlesini (kg), c : Malzeme özgül ısını (J/ kgK), ΔT : Malzeme sıcaklık farkını ($^{\circ}\text{C}$) ifade eder.

Termodinamiğin birinci kanunu yani Enerji Korunumu Prensibine göre enerji yoktan var, vardan da yok edilemez sadece şekil değiştirebilir. İki farklı sıcaklığa sahip malzeme birbirlerine temas ettiği anda ısı geçişi sağlanacaktır. Burada çevre ısısından etkilenmemek kaydıyla soğuk olan malzemeye girecek/kazanılacak ısı (q_{giren}), sıcak olan malzemeden çıkacak/kaybedilecek ısı miktarına eşit olacaktır. Bu durumu gösterir denklem “Eş. 3.3” de verilmiştir.

$$q_{\text{giren}} = q_{\text{çıkan}} \quad (3.3)$$

Katı cisimlerin özgül ısı deneyleri basit bir deney düzeneği ile yapılabilir (P. Çiçek, 2009). Özgül ısı deneyi için ODTÜ Mimarlık Fakültesi Malzeme Koruma Laboratuvarında bulunan özgül ısı deney düzeneğinden faydalanılmıştır. Bu deney düzeneğinin oluşturulması için TSE 4048 standardında tariflendiği gibi ısıyı dışarı vermeyen bir kalorimetre kabına ihtiyaç duyulmaktadır. Deney düzeneği için iki adet 1200 ml kapasiteli sıcak su termosu kullanılmıştır. Bu sıcak su termoslarının ağız kısımlarını kapatmak için ısı kaybını engelleyecek şekilde yalıtım malzemesinden oluşturulmuş bir kapak kullanılmıştır. Bu kapağın tam orta noktasında termos içindeki suya temas edebilecek uzunlukta bir termometre bulunmaktadır. Bu termometre su içerisindeki sıcaklık değişimini kayıt etmek için kullanılmaktadır. Çalışmada kullanılan özgül ısı deney düzeneği Resim 3.4’ de gösterilmiştir.



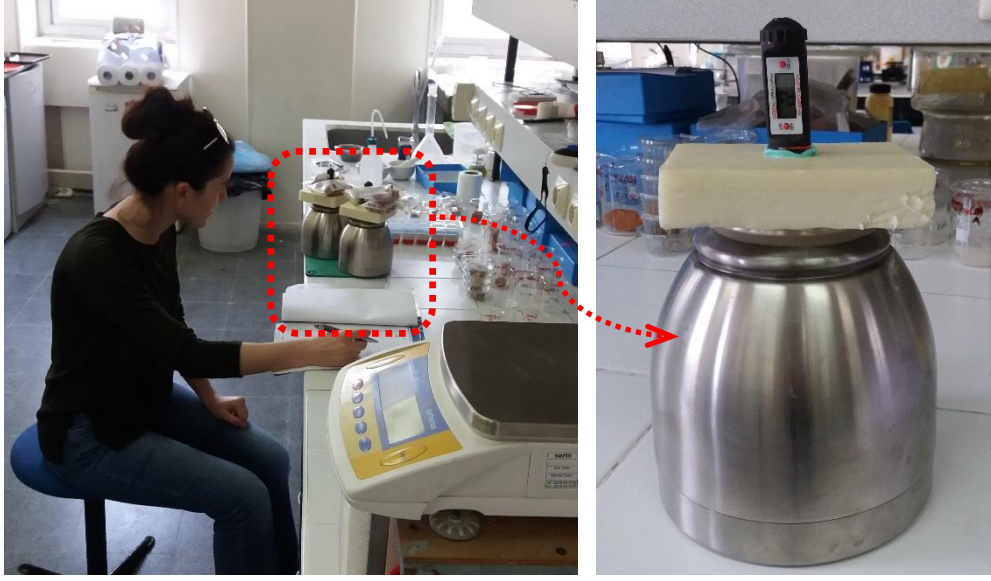
Resim 3.4. Duvar dolgu malzemelerinin özgül ısılarının belirlenmesinde kullanılan deney düzeneğinin görünüşü ve şematik çizimi.

Özgül ısı deneyini yapmadan önce çalışmada kullanılan duvar dolgu malzemeleri (izo tuğla, gaz beton, bims kagir) Resim 3.4’de gösterilen deney seti içerisine girebilecek boyutta kesilerek hazırlanmıştır. Resim 3.5’de deneyde kullanılan numuneler gösterilmiştir.



Resim 3.5. Özgül ısı deneyi için hazırlanan numune örnekleri

Hazırlanan deney numunelerinin doğal durumdaki halleri tartılarak ilk ağırlıkları kayıt edilmiştir. Daha sonra bu numuneler etüv içerisinde 40°C sıcaklıkta malzeme kütleleri sabit hale gelinceye kadar tutulmuştur. Aralıklarla tartılan numunelerin kütlesi dengeye gelince yani kütlesi sabitleninceye kadar ölçüm yapılmış ve sabitlenen kütle miktarı kayıt edilmiştir (M_n). Ardından 60°C ’de ki etüvde 24 saat bekletilmiştir. Etüvün sıcaklığı numunenin başlangıç sıcaklığı olarak kayıt edilmiştir (T_N). Bu sırada kalorimetre kabı 1/2 litre saf su (M_s) ile doldurulmuş ve bu suyun ilk sıcaklığı ölçülerek kayıt edilmiştir (T_s). 24 saat sonra etüvden çıkarılan numune hızlıca saf su doldurulmuş kalorimetre kabına bırakılmıştır. Böylece deney süreci başlatılmıştır. Deneyde 10 dk aralıklarla suyun sıcaklığı kapak üzerindeki termometre vasıtasıyla ölçülmüştür. Özgül ısı deney düzeneği ile deneyin yapılışına ait fotoğraflar Resim 3.6’da gösterilmiştir.



Resim 3.6. Özgül ısı deneyinde ölçüm yapıldığı süreci gösteren resim

Numune ve su arasındaki ısı alış-verişinin tamamlandığı yani karalı hale geldiği ard arda alınan ve değişmeyen son 3 ölçümden anlaşılmaktadır. Bu durum suyun maksimum sıcaklığa ulaştığı zamanı ifade etmektedir (T_E). Elde edilen veriler aşağıda verilen “Eş. 3.4” ve “Eş. 3.5” da yerine konularak numunelerin özgül ısıları tespit edilmiştir (P., Çiçek, 2009; TS 4048, 2013).

$$q_{su} = q_{numune} \quad (3.4)$$

$$M_s c_s \Delta T_1 = M_n c_n \Delta T_2 \quad (3.5)$$

Burada; M_s : kalorimetre kabındaki suyun kütlesi (g), c_s : kalorimetre kabındaki saf suyun özgül ısısı cal/ g°C, ΔT_1 : kalorimetre kabındaki suyun sıcaklık farkı, $T_E - T_s$ (°C), M_n : deney numunesinin kütlesi (g), c_n : deney numunesinin özgül ısısı cal/g°C, ΔT_2 : deney numunesinin sıcaklık farkı, $T_N - T_E$ (°C).

Çalışmada kullanılan üç farklı duvar dolgu malzemesine ait özgül ısı değerleri eşitliklerde verilen denklemlerin çözülmesiyle elde edilmiştir.

Isıl iletkenlik hesap değerinin belirlenmesi: Sıcak kutu yöntemi

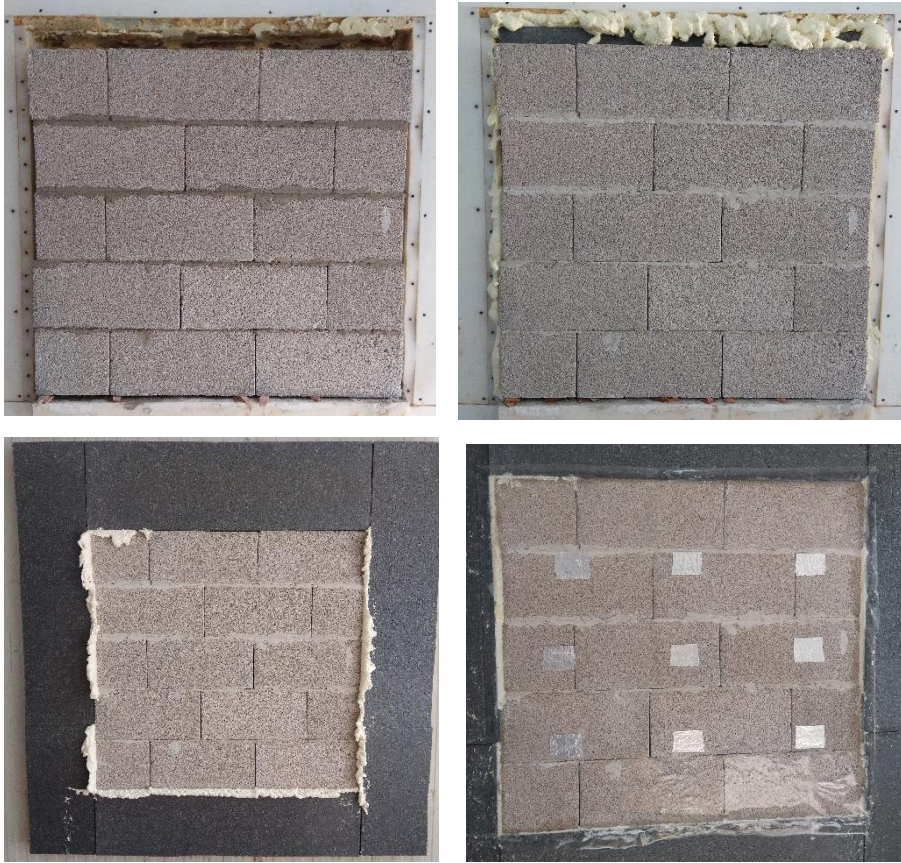
Duvar malzemelerin gerçek ısı iletkenlik hesap değeri (λ_{REF} , W/mK), Türk Akreditasyon Kurumundan (TÜRK-AK) akrediteli olan YAPI AR-GE firması tarafından TS EN ISO 8990 (2002) standartında tariflenen mahfazalı sıcak kutu/ısı kabini (hot box) metodu ile ölçölmüştür. Sıcak kutu (ısı kabini) yalıtım malzemelerinin, duvar yapım elemanlarının kararlı haldeki ısı iletim özelliklerini belirlemek amacıyla geliştirilmiş bir deney aracıdır. Sıcak kutu, yalıtılmış sıcak ve soğuk kabinler ve bu iki kabin arasında inceleme için hareketli yürüteç üzerine inşa edilmiş duvar kesitinden oluşmaktadır. Sıcak kutu deney düzeneğinin genel görüntüsü Resim 3.7’de gösterilmiştir.



Resim 3.7. Isı iletkenlik hesap değerinin belirlendiği, sıcak- soğuk kabinler ve bu kabinler arasına yerleştiren çalışma duvarından oluşan sıcak kutu deney düzeneği (Yapı ARGE, 2019)

Muhfazalı sıcak kutu deney düzeneğinde incelenecek duvarlar TS EN ISO 8990 (2002) standartında tariflendiği gibi 100 cm x 100 cm boyutlarında hareketli duvar yürüteci üzerine inşa edilmişlerdir. Duvarlar kuruyuncaya kadar ortam sıcaklık ve bağıl nem şartlarında bekletilmiştir. Her bir duvar için deney ortam sıcaklık ve bağıl nem koşullarında yapılmıştır. Deneyin yapıldığı günlerde yaklaşık ortam sıcaklığı 23°C ve bağıl nem % 45 olarak tespit edilmiştir. Deney esnasında duvarla ısı kabini arasında kenarlardan ya da başka bölgelerden hava ve nem girmesini engellemek adına bir takım önlemler alınmıştır. Duvar ile yürüteç

arasında tam sızdırmazlık sağlamak için kenar boşluklara poliüretan sıkılarak boşluklar kapatılmıştır. Daha sonra duvar ve yürüteç arasındaki sızdırmazlığın sağlamak için dört bir taraf yalıtım malzemesi ile çevrelenmiştir. Ayrıca duvarların sıcak ve soğuk taraf her iki yüzeyi duvarın şartlandırma koşullarında aldığı nemi muhafaza etmesi ve olası ısı kaçaklarından yüzeyin etkilenmemesi için şeffaf görümlü jelatinle kaplanmıştır. Duvarların deneye hazırlık aşamaları Resim 3.8’ de verilmiştir.



Resim 3.8. Sıcak kutu deneyine tabi tutulacak çalışma duvarlarının deneye uygun hale getirilme aşamaları: duvarın örülmesi (sol üst), duvar-yürüteç birleşim noktalarında kalan boşlukların poliüretan ile kapatılması (sağ üst), çerçeve kenarının yalıtım malzemesi ile kapatılması (sol alt), şartlandırma koşullarını korumak için duvar yüzeyine jelatin çekilmesi (sağ alt).

Sıcak ve soğuk bölmede duvar yüzey sıcaklığını ve ortam sıcaklığını ayarlamaya yarayan sabit ısı kaynakları vardır. Ayrıca duvar yüzey sıcaklıklarını ve ortam sıcaklığını ölçecek sıcaklık sensörleri vardır. Aynı şekilde soğuk bölmede de ortam ve yüzey sıcaklıklarını ölçecek sıcaklık sensörleri vardır [BS EN ISO 8990,1996]. Her bir yüzeyde 9 tane olmak üzere toplam da 18 tane sıcaklık sensörü kullanılmıştır. Bu sensörler sıcak ve soğuk taraf duvar yüzeyine karşılıklı denk gelecek şekilde konumlandırılmış ve her bir sensörün altına

pürüzlü yüzeylerde gerçeğe daha yakın veri kayıt edebilmek için alüminyum bant yapıştırılmış. Sensörlerin duvar yüzeyine yapıştırılması ile çalışma duvarı deneye hazır hale getirilmiş, sıcak ve soğuk kabinler duvar yüzeyine kapatılmıştır. Deney düzeneği Resim 3.9’da gösterilmiştir.



Resim 3.9. Duvarın soğuk taraf görünüşü (sol taraf), mahfazalı sıcak kutu deney düzeneği (sağ taraf)

Sıcak kutu deney düzeneği ile ısı iletkenlik hesap değeri tayini yaparken sıcak- soğuk taraf ortam sıcaklık farkının $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ olması gerekmektedir (TS EN ISO 8990,2002). Bu çalışmada deney düzeneğinin soğuk kabin sıcaklığı 0°C ’de ve sıcak kabin sıcaklığı 20°C ’de ayarlanarak ortam sıcaklık farkı 20°C ’ de tutulmuştur. Böylece deney süreci başlatılmıştır. Deney süreci boyunca veriler bilgisayar ortamında excel dosyası şeklinde kayıt edilmiştir. Veri kayıdı, deney kararlı hale geldikten en az 3 saat sonra bitirilmelidir (TS EN ISO 8990,2002). Ortam şartları dengeye geldikten sonraki bu 3 saatlik dilim içerisinde kalan veriler duvarların ısı geçirimsizlik özelliklerini (U , R , λ ve q) belirlemek için yapılacak hesaplamalarda kullanılmalıdır. Ancak belirtilen bu süre deney numunesinin kütlesine göre değişebilir ve büyük kütleli deney numuneleri için yeterli gelmeyebilir (BS EN ISO 8990, 1996; ISO 12567-1, 2010). Bu çalışmada deney süresince kayıt edilen anlık, saatlik ve 18 saatlik veriler kullanılarak ısı geçirimsizlik özellikleri belirlenmiştir. Sıcak-soğuk taraf ortam şartları dengeye yani ortamlar kararlı hale gelinceye kadar deneye devam edilmiştir. Duvarların ısı geçirimsizlik özelliklerinin belirlenmesinde ortamın kararlı olduğu durumda alınan sıcaklık verileri kullanılmaktadır.

Deney için harcanan toplam enerji hesaplanırken, sıcak kutudan kaynaklanan ısı kaçakları için harcanan enerjiye de dikkat edilmelidir. Bu nedenle standartta tariflendiği şekliyle örnek duvardaki ısı akışı için harcanan enerji, Φ_1 , toplam güç girdisi, Φ_P , sıcak kutu duvarlarındaki ısı kayıpları, Φ_3 , ve yanal ısı kayıpları, Φ_2 dikkate alınarak “Eş. 3.6” da verilen formül ile hesaplanmıştır. Sıcak kutu deney düzeneğinde yer alan mahfaza deney numunesinde yanal ısı akışı Φ_2 'yi ve sıcak kutunun duvarlarında olan ısı akışı Φ_3 'ü azaltmak amacıyla yapılmış ve bu durumda ısı kayıpları eşitlenmiştir (Eş. 3.7). (BS EN ISO 8990, 1996; TS 825, 2008; TS EN ISO 6949, 2009; Geola ve diğerleri, 2009; ASTM 789, 1983; ASTM 1320, 1997; ASTM 885, 1985).

$$\phi_1 = \phi_P - \phi_3 - \phi_2 \quad (3.6)$$

$$\phi_3 - \phi_2 = 0 \quad (3.7)$$

Burada; Φ_1 : çalışma duvarındaki ısı akışını (W), Φ_P : Toplam gücü (W), Φ_3 : Sıcak kutu duvarlarındaki ısı akışını Φ_2 : Yanal ısı kayıplarını (W) ifade eder.

Çalışma duvarının ısı akış yoğunluğu (q) “Eş. 3.8” de verilen formülün çözümü ile belirlenir (BS EN ISO 8990, 1996).

$$q_{REF} = \frac{\phi_1}{A} \quad (3.8)$$

Burada; q: Isı akış yoğunluğunu (W/m²), Φ_1 : çalışma duvarındaki ısı akışını (W/m²), A: çalışma duvar alanını (m²) ifade eder.

Duvarların taşınımıyla ısı transferinden etkilendiği hesaba katılarak radyasyon (ışınım) katsayısının bulunabilmesi (hr) gereklidir. Bunun için ortalama radyant sıcaklığın (T_m) belirlenmesi aşağıda verilen “Eş. 3.9” dan yararlanılarak bulunur.

$$T_{MI} = \frac{1}{2} \times (T_{RI} + T_{SI}) \quad (3.9)$$

Burada; T_{MI} : Sıcak taraf ortamala radyant mutlak sıcaklığını (K), T_{RI} : Sıcak tarafta bulunan alüminyum panelin (baffle /engel) ortalama sıcaklığını (K), T_{SI} : Sıcak taraf yüzey sıcaklığını (K) ifade eder.

Çalışmada kullanılan duvarların ısısal salınımı (emisivite) değerleri 0,95 olarak kabul edilmiştir (Ocana ve diğerleri, 2004). Duvarların emisivite değeri (E) ile gösterilmiştir. Emisivite değeri, iç-dış ortam ve yüzey sıcaklıkları kullanılarak TS EN ISO 8990 (2002) standartında iç çevre sıcaklığı (T_{NI}) adlandırılan veri “Eş. 3.10” ile bulunur. Radyasyon katsayısı için “Eş.3.11” da verilen Stefan Boltzman kanunundan yararlanılır.

$$T_{NI} = \frac{T_{AI} \times \frac{\phi_1}{A} + Eh_r \times (T_{AI} - T_{RI}) \times T_{SI}}{\frac{\phi_1}{A} + Eh_r \times (T_{AI} - T_{RI})} \quad (3.10)$$

$$h_r = 4 \times \sigma \times T_{MI}^3 \quad (3.11)$$

Burada; T_{NI} : Sıcak taraf çevre sıcaklığını (°C), T_{AI} : Sıcak taraf ortam sıcaklığını (°C), E : Salım faktörü, emisiviteyi (birimsiz), h_r : Radyasyon kat sayısını (W/m²K), σ : Stefan Boltzman sabitini (5,67x10⁻⁸, W/m²K⁴) ifade eder.

TS EN ISO 8990 (2002) standartına göre yukarıda verilen hesaplamaların hepsi deney numunesinin dış tarafı (soğuk tarafı) içinde yapılmalıdır. Duvarların soğuk taraf ortalama radyant sıcaklığın (T_m) belirlenmesi için aşağıda verilen “Eş. 3.12” kullanılır.

$$T_{MO} = \frac{1}{2} \times (T_{RO} + T_{SO}) \quad (3.12)$$

Burada; T_{MO} : Soğuk taraf ortamala radyant mutlak sıcaklığını (K), T_{RO} : Soğuk tarafta bulunan alüminyum panelin (baffle /engel) ortalama sıcaklığını (K), T_{SO} : Soğuk taraf yüzey sıcaklığını (K) ifade eder.

Belirlenen bu verilerle dış çevre sıcaklığı “Eş. 3.13” ile hesaplanabilir. Radyasyon katsayısı için “Eş.3.14” da verilen Stefan Boltzman kanunundan yararlanılır.

$$T_{NO} = \frac{T_{AO} \times \left(-\frac{\phi_1}{A}\right) + Eh_r \times (T_{AO} - T_{RO}) \times T_{SO}}{\left(-\frac{\phi_1}{A}\right) + Eh_r \times (T_{AO} - T_{RO})} \quad (3.13)$$

$$h_r = 4 \times \sigma \times T_{MO}^3 \quad (3.14)$$

Burada; T_{NO} : Soğuk taraf çevre sıcaklığını ($^{\circ}\text{C}$), T_{AO} : Soğuk taraf ortam sıcaklığını ($^{\circ}\text{C}$), E : Salım faktörü, emisiviteyi (birimsiz), h_r : Radyasyon kat sayısını ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$), σ : Stefan Boltzman sabitini ($5,67 \times 10^{-8}$, $\text{W}/\text{m}^2\text{K}^4$) ifade eder.

T_{NI} ve T_{NO} sıcaklık verileri elde edildikten sonra çalışma duvarının gerçek ısıl geçiririmsilik katsayısı (U_{REF} , $\text{W}/\text{m}^2\text{K}$) “Eş. 3.15” ile hesaplanır (BS EN ISO 8990, 1996; TS 825, 2008).

$$U_{REF} = \frac{\phi_1}{A \times (T_{NI} - T_{NO})} \quad (3.15)$$

Sıcak taraf yüzey ısıl direncini (R_{SI}) ve soğuk taraf yüzey ısıl direncini (R_{SO}) bulmak için “Eş. 3.16” ve “Eş. 3.17”den yararlanılır.

$$R_{SI} = \frac{A(T_{NI} - T_{SO})}{\phi_1} \quad (3.16)$$

$$R_{SO} = \frac{A(T_{NO} - T_{SO})}{\phi_1} \quad (3.17)$$

Burada; R_{SO} : Soğuk taraf yüzey ısıl direncini ($\text{m}^2\text{K}/\text{W}$), T_{SO} : Soğuk taraf yüzey sıcaklığını ($^{\circ}\text{C}$) ifade eder.

Çalışma duvarlarına ait toplam ısıl direnç (R , $\text{m}^2\text{K}/\text{W}$) ,sıcak taraf ve soğuk taraf ısıl dirençlerinin toplamına eşittir. Toplam ısıl direnç “Eş. 3.18” kullanılarak hesaplanır.

$$R = R_{SI} + R_{SO} \quad (3.18)$$

Bu deneysel çalışma ile ısıl geçirimsizlik özelliklerinden olan ısıl iletkenlik hesap değeri (λ) dolaylı yoldan belirlenebilmektedir. λ değerinin belirlenebilmesi için çalışma duvarlarının yüzey ısıl dirençleri (R_{REF} , m²K/W) verilen “Eş. 3.19” ile hesaplanır.

$$R_{REF} = \frac{A \times (T_{SI} - T_{SO})}{\phi_1} \quad (3.19)$$

TS EN ISO 8990 (2002) standardında belirtildiği üzere düz deney numuneleri için kalınlığın (d), gerçek yüzey ısıl direnci (R_{REF}) değerine bölünmesi ile duvara ait referans ısıl iletkenlik hesap değeri (λ) “Eş. 3.20” kullanılarak dolaylı yoldan bulunabilir.

$$\lambda_{REF} = \frac{d}{R_{REF}} \quad (3.20)$$

Deney sonucunda elde edilen duvarların referans duvarların referans ısıl geçirimsizlik özellikleri; ısı akış yoğunluğu (q_{REF}), ısıl geçirgenlik katsayısı (U_{REF}) ve ısıl direnç (R_{REF}), değeri belirlenmiş ve ısıl iletkenlik hesap değeri (λ_{REF}) ise referans ısıl direnç ve kalınlık verilerine bağlı olarak dolaylı yoldan hesaplanmıştır. Bunun için BS EN ISO 8990, 1996; TS 825, 2008; TS EN ISO 6949, 2009 standartlarından faydalanılmıştır. Çalışma sonucunda elde edilen değerler bulgular kısmında verilmiştir.

Özgül ısı depolama kapasitesi

Çalışmada elde edilen referans birim hacim ağırlık (ρ_{REF}) ve özgül ısı (c_{REF}) değerlerinden faydalanılarak malzemelerin gerçek özgül ısı depolama kapasitesi (VHC_{REF}) belirlenmiştir (Eş.3.21). Standartlardan elde edilen veriler ile Eş.2.4 kullanılarak teorik özgül ısı depolama kapasitesi(VHC_{Teorik}) elde edilmiş ve bu sonuçlar bulgular kısmında verilmiştir. Birimi “J/m³K” dir.

$$VCH_{REF} = \rho_{REF} \cdot c_{REF} \quad (3.21)$$

Isıl nüfuz katsayısının belirlenmesi:

Çalışmada duvar dolgu malzemelerin ısı dağılım özelliği belirlenmiştir. Isıl dağılım özelliği iki farklı veri kullanılarak belirlenmiştir. Bunlardan ilkinde duvar malzemeleri için birim hacim ağırlığı (ρ_{Teorik}) ve ısı iletkenlik hesap değeri (λ_{Teorik}) standartlardan ve özgül ısı (c_{Teorik}) ise literatürden alınarak Eş.2.3’de verilen formülde kullanılarak teorik ısı dağılım özelliği (e_{Teorik}) hesaplanmıştır. Eş.2.3’de ısı iletkenlik hesap değeri (λ) yerine ısı yayınlılık değerinin (α_{Ref}) karakökü ve özgül ısı depolama kapasitesi (VHC_{Ref}) (bkz. 3.21) çarpımı ile ısı yayılım değeri ile ısı nüfuz katsayısı arasında bir ilişki kurulmuş Eş.3.22 de verilen formül ile gerçek ısı nüfuz katsayısı (e_{Ref}) elde edilmiştir. Birimi “W/s^{1/2}m²K”dir.

$$e = \sqrt{\alpha_{\text{Ref}} \cdot VHC_{\text{Ref}}} \quad (3.22)$$

Burada; α_{Ref} : Referans ısı yayınlılık değerini (m²/s), VHC_{Ref} : Referans özgül ısı depolama kapasitesini (J/m³K) ifade eder.

3.3. Duvar Malzemelerin Isıl Yayınlılık Değerlerinin Belirlenmesi: Teorik Veriler ve Laboratuvar Verileri Kullanılarak Yapılan Hesaplamalar

Isıl yayınlılık değeri (α , m²/s) malzemelerin ısı iletkenlik hesap değeri ve hacimsel ısı kapasitesine bağlıdır. Isıl iletkenlik hesap değeri (λ), özgül ısı (c) ve birim hacim ağırlığı (ρ) bilinen malzemelerin ısı yayınlılık değeri temel bir formül ile belirlenebilmektedir. Bu tez çalışmasında duvar malzemelerin ısı yayınlılık değerleri (α) “teorik veriler” ve “laboratuvar verileri” kullanılarak yapılan hesaplamalar ile iki farklı şekilde elde edilmiştir.

Teorik veriler kullanılarak hesaplanmış ısı yayınlılık değeri “ α_{teorik} ” olarak adlandırılmıştır. Bu değer için gerekli olan termodinamik özelliklerden ısı iletkenlik hesap değeri (λ_{Teorik}) ve birim hacim ağırlık (ρ_{Teorik}) TS 825 standartında kullanıma sunulmuş listelerden alınmıştır. Özgül ısı (c_{Teorik}) değeri olarak gaz beton ve bims blok malzeme için literatürden elde edilen değerler kullanılmıştır. İzo tuğla için özgül ısı değerine literatürde yapılan araştırmalar dahilinde rastlanmamıştır. TS 1745 (2004) standartında tuğla, gaz beton, bims blok gibi tüm kagir birim malzemeler için özgül ısı değeri 1000 J/KgK olarak verilmiştir. Ancak bu türden farklı özelliklere sahip tüm malzemelere aynı değerin verilmesi çalışmada kullanılmak üzere güvenli bulunmamıştır. Bu sebeple standartta yazan veri izo tuğla için c_{Teorik} değeri olarak

kullanılmamıştır. Bu araştırmada bizzat laboratuvar ortamında TS 4048 (2013) standartında verilen yöntem esas alınarak oluşturulmuş deney düzeneği ile ölçülen özgül ısı değerleri teorik veri olarak kullanılmıştır. Kagir duvar malzemelerin teorik termofiziksel özellikleri “Eş. 3.21” de verilen denklemde kullanılmış ve “ α_{Teorik} ” değerleri elde edilmiştir. (Grinzato ve diğerleri, 2002). Isı yayınlılık değerinin birimi “m²/s” dir (Wikipedia, 2019).

$$\alpha_{Teorik} = \frac{\lambda_{Teorik}}{C_{Teorik} \times \rho_{Teorik}} \quad (3.21)$$

Burada; λ_{Teorik} : Malzemelerin TS 825’de verilen ısı iletkenlik hesap değerini (W/mK), C_{Teorik} : malzemelerin literatürden elde edilen özgül ısısını (J/kgK) ve ρ_{Teorik} : Malzemelerin TS 825’de verilen birim hacim ağırlığını (kg/m³) ifade eder.

Çalışmada kullanılan duvar malzemeler için ısı iletkenlik değeri laboratuvar verileri kullanılarak da hesaplanmıştır. Laboratuvar verileri kullanılarak hesaplanmış ısı iletkenlik değeri duvar malzemelerinin gerçek ısı iletkenlik değerlerini vermektedir. Bu gerçek ısı iletkenlik değerleri duvarlar için “referans ısı iletkenlik değeri (α_{Ref})” olarak kabul edilmiştir. α_{Ref} değerinin belirlenmesinde başlık 3.2, başlık 3.3 ve başlık 3.4’ de tariflenen birim hacim ağırlık (ρ_{Ref}), özgül ısı (C_{Ref}) ve ısı iletkenlik hesap değeri (λ_{Ref}) verileri Eş. 3.22” de verilen formülde kullanılmış ve elde edilen sonuç “ α_{Ref} ” olarak kabul edilmiştir. Çalışma sonucunda teorik ve referans ısı iletkenlik değerleri karşılaştırılmış ve böylece çalışmanın güvenilirliği kontrol edilmiştir.

$$\alpha_{REF} = \frac{\lambda_{Re f}}{C_{Re f} \times \rho_{Re f}} \quad (3.22)$$

Burada; λ_{Ref} : Sıcak kutu yöntemiyle belirlenen ısı iletkenlik hesap değerini (W/mK), C_{Ref} : Malzemelerin deney sonucu elde edilen özgül ısısını (J/kgK) ve ρ_{Ref} : Malzemelerin deney sonucu elde edilen birim hacim ağırlığını (kg/m³) ifade eder.

Çalışma sonucunda elde edilen veriler bulgular kısmında verilmiş ve “ α_{Ref} ” ve “ α_{Teorik} ” değerleri karşılaştırılmıştır.

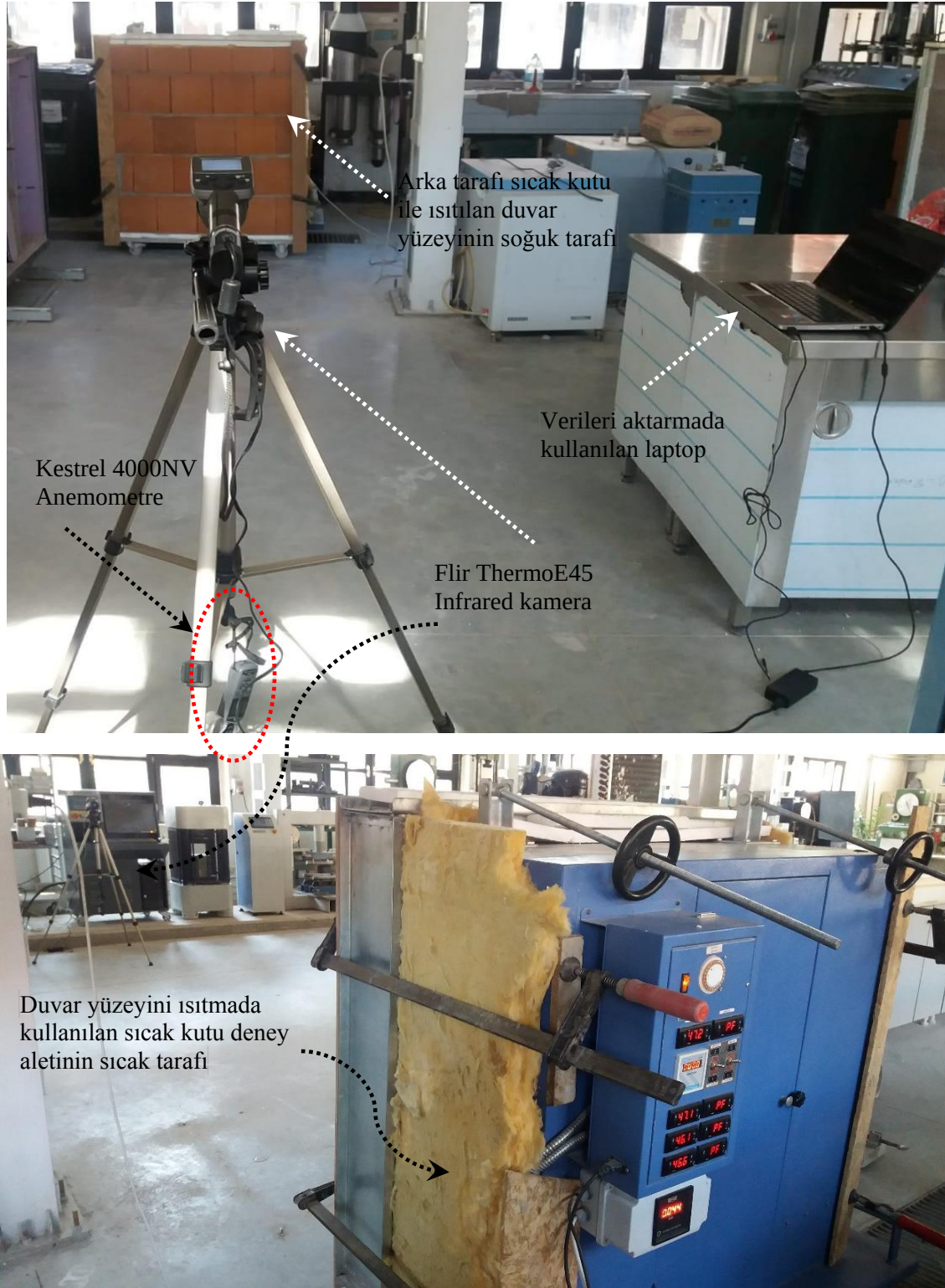
3.4. Kızılötesi Isıl Görüntüleme (IRT) ve Sıcak Kutu (HB) Yöntemlerinin Birleşik Kullanıldığı Deney Düzeneği (IRT-HB Düzeneği): Duvar Örneklerinin Isıl Geçirimsizlik Özelliklerinin Belirlenmesi

Bu çalışmada “Kızılötesi Isıl Görüntüleme (Infrared Termografi-IRT)” (ASTM STP 1320; 1997), ve “Mahfazalı sıcak kutu” (BS EN ISO 8990; 1996) deney yöntemlerinin bir arada kullanılması ile oluşturulan deney düzeneği ile yapı duvarlarının termofiziksel özelliklerinin hızlı, kolay, pratik ve tahribatsız bir şekilde belirlenmesi hedeflenmiştir. Oluşturulan bu yeni deney düzeneği “IRT-HB” olarak adlandırılmıştır. Bu düzeneğini geliştirmek ve elde edilen sonuçları değerlendirebilmek için BS EN ISO 8990 (1996), TSE 825 (2008), ASTM STP 1320 (1997), TS EN ISO 6946(2009), TS EN ISO 10211 (2009), TS EN 1745 (2004), standartlardan ve Koçkar (2012), Tuğla ve diğerleri (2013, 2016, 2018) çalışmalardan yararlanılmıştır.

Çalışmada eşit sıcaklık dağılımının alüminyum panel ile sağlandığı bir mahfazalı sıcak kullnılmıştır. Sıcak kutu, BS EN ISO 8990 standartında tariflendiği üzere tamamıyla yalıtılmış sıcak ve soğuk kabinler ve bu iki kabin arasında incelenecek olan duvar kesitinin yerleştirilmesinden oluşmaktadır. Kısacası, deney düzeneği sıcak-soğuk bölmelerin arasında duvarın yeleştirilmesi ile tamamen kapalı bir kutu görünümü almaktadır. Yapılan bu tez çalışmasında ise sıcak kutu bölmesi olan soğuk kabin devre dışı bırakılmış yani sıcak kutu deney düzeneğinden çıkarılmıştır. Soğuk kabin yerine sıcak kutu deney düzeneğine infrared kamera eklenmiştir. Bu kamera örnek/çalışma duvarın soğuk tarafında, zaman bağlı olarak yüzey sıcaklıklarını kaydedecek bir pozisyonda yerleştirilmiştir. Bu sayede, duvarın her noktasından alınacak ısı görüntüleri ile duvar yüzeyindeki sıcak taraftan soğuk tarafa olan ısı akışı takip edilmiştir. Deney düzeneğinde sıcak kabin ile çalışma duvar birleşimlerindeki ısı yalıtımlılık nitelikleri aynen korunmuştur müdahale edilmemiştir. Kısacası, infrared kamera, varolan sıcak kutu deney düzeneğine adapte edilmiştir. Bu sayede, duvarın soğuk tarafında yüzey sıcaklıklarındaki farklılıklar ve zamana karşı yüzey sıcaklıklarındaki değişim daha hassas takip edilebilmiştir. Çalışmada kullanılan düzenek Resim 3.10’da ve Resim 3.11’de gösterilmiştir.

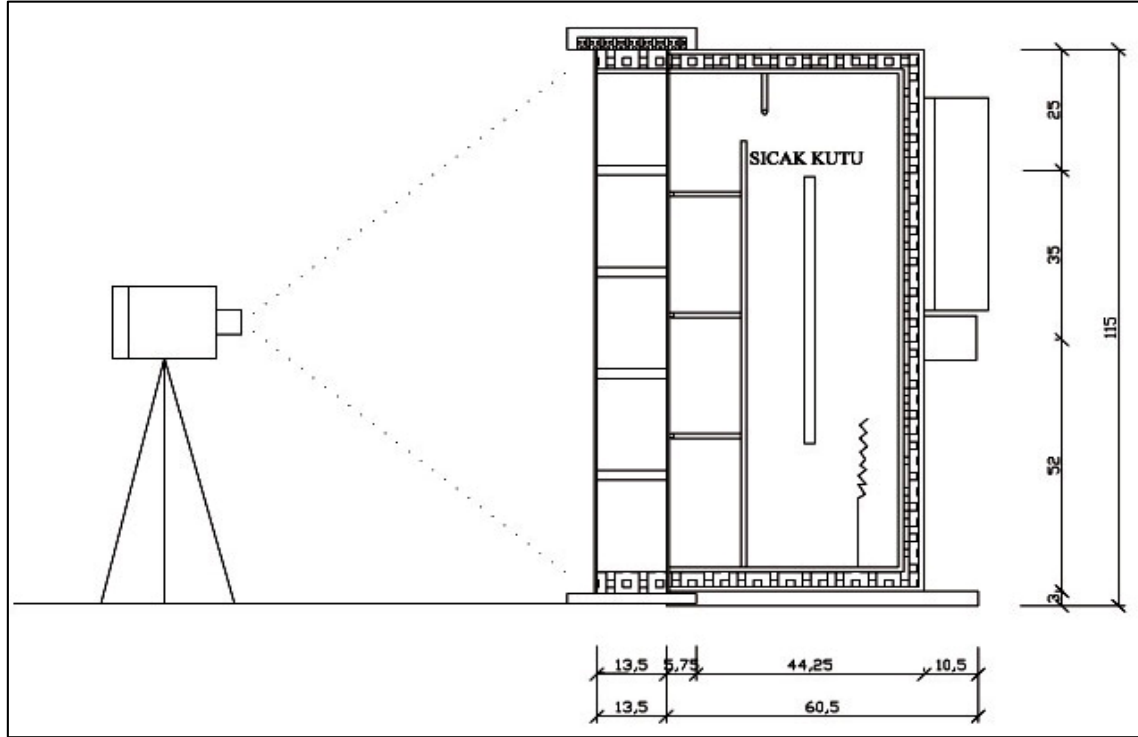


Resim 3.10. Arka tarafı sıcak kutu ile ısıtılan duvar kesitindeki ısı akışı soğuk tarafta duvar yüzeyinden 2 dk aralıklarla peş peşe alınan kızılötesi ısı görüntüleri ile takip edildiği deney düzeneği.



Resim 3.11. Örnek duvarın ısıl geçirimsizlik özelliklerinin belirlendiği deney düzeneğinin önden (ısı kabininin soğuk tarafı) ve arkadan (ısı kabininin sıcak tarafı) görünüşü.

IRT ve sıcak kutu (HB) deney yönteminin bir arada kullanıldığı deney düzeneğinde (IRT-HB) IR kamera ve sıcak kutu arasında bulunan duvarın konumunu ve sıcak kabin kesitini gösteren şematik çizim Şekil 3.6’da verilmiştir.



Şekil 3.6. IRT-HB deney düzeneğinin şematik çizimi (Koçkar, 2012).

Sıcak ve soğuk ortam arasındaki sıcaklık farkının oluşması için sıcak kutu deney düzeneğinde sıcaklık 45 °C’ye ayarlanmıştır. Bu deney düzeneğinde incelenen duvar yüzeylerine ait iç yüzey sıcaklıkları ve iç ortam sıcaklığı veri toplayıcılarla kayıt altına alınmıştır. Veri toplayıcılar belirtilen zaman diliminde 1 dk aralıklarla yüzey sıcaklıklarını otomatik olarak kayıt etmiştir.

Bu çalışmada, manuel (elle/otomatik olmayan) ölçüm alabilen *FLIR ThermoE45 infrared kamera* kullanılmıştır. Bu kamera ile ısı kabininin soğuk taraftaki duvar yüzeyinden peş peşe kızıl ötesi ısı görüntüleri alınmış; zamana karşı sıcaklık değişimi *ardışık ısı görüntüleme* ile 2 dk aralıklarla kaydedilmiştir. Toplam veri toplama süreci her bir duvar için farklıdır. Bunun sebebi duvar dolgu maddelerinin termofiziksel özelliklerinden dolayı kararlı hale gelme süreçlerinin farklılık göstermesidir. Deneyden elde edilen ısı görüntüleri kullanılan termal kamera yazılımı *Flir ThermoCAM Researcher* yardımıyla, sıcak ve soğuk ortamlar arasında kalan duvar kesitindeki ısı akışı analiz edilmiş; zamana bağlı yüzey sıcaklık eğrileri

oluşturulmuş; oluşan bu eğrilerden ısı yayınlılık değeri tayin edilmiş ve kararlı ortam haline gelmiş her iki tarafta sabitlenen yüzey sıcaklıkları ile ısı geçirimsizlik hesapları yapılmıştır. IRT görüntülerinden gerçek yüzey sıcaklık değerlerini elde edebilmek ve detaylı analiz yapabilmek için ısı görüntü çekimleri esnasında soğuk taraf ve sıcak taraf ortam sıcaklık ve bağıl nem verileri, kamera ile çalışma duvarı arasındaki mesafa ve duvar yüzeyinin yayılım (emissivite) değerleri dikkate alınmıştır. İlgili mikroklimatik ölçümler: sıcak ve soğuk kabinler ve ortamlardan alınan sıcaklık, bağıl nem ve yüzey sıcaklık verileri *HOBO LCD nem ve sıcaklık kaydediciler* ve *KESTREL 4000 NV anemometre* ile elde edilmiştir.

Bu çalışmada BS EN ISO 8990 standardında tariflendiği gibi sıcak ve soğuk ortam arasındaki ısı akışı tamamlanıp ortam kararlı hale gelinceye kadar deneye devam edilmiştir. Bu çalışmada iki türlü veri elde edilmiştir. Bunlardan ilki ısınma süreci devam ederken alınan, diğeri ise ortam kararlı halde iken elde edilen verilerdir.

1. Kararlı halde elde edilen veriler ile:-

- incelenen/örnek duvar kesitlerinin ısı geçirgenlik katsayısı (U_{IRT-HB} , W/m^2K), ısı direnci (R_{IRT-HB} , m^2K/W) ve ısı akış yoğunluğu (q_{IRT-HB} , W/m^2) doğrudan; ısı iletkenlik hesap değeri (λ_{IRT-HB} , W/mK) ise dolaylı olarak ile hesaplanabilmekte,
- incelenen duvarların sağlam ve sorunlu bölgeleri sıcaklık indeksi (TI) ile belirlenebilmektedir.

2. Isınma sürecinde elde edilen veriler ile:-

- ısı yayınlılık değeri (α_{IRT-HB} , m^2/s) hesaplanabilmekte,
- incelenen duvarın sağlam ve sorunlu bölgeleri zamana bağlı ısınma hızı (R_w , $^{\circ}C/s^{1/2}$) grafikleri ile belirlenebilmektedir.

Duvarların ısı geçirimsizlik özelliklerinin belirlenmesinde ortamın kararlı olduğu durumda alınan sıcaklık verileri kullanılmaktadır. Çalışmada kullanılan örnek duvarın ısı geçirgenlik katsayısı (U_{IRT-HB}), ısı direnci (R_{IRT-HB}), ısı iletkenlik (λ_{IRT-HB}) ve ısı akış yoğunluğu (q_{IRT-HB}) değerleri, bu deney düzeneği ile belirlenebilmektedir (Koçkar 2012). Deney için harcanan toplam enerji hesaplanırken, sıcak kutudan kaynaklanan ısı kaçakları için harcanan enerjiye de dikkat edilmelidir. Duvardan ya da sıcak kutuda oluşan ısı kaçakları ısı geçirimsizlik özelliklerini doğrudan etkilemektedir. Bu nedenle standartta tariflendiği şekliyle örnek duvardaki ısı akışı için harcanan enerji (Φ_w), toplam güç girdisi (Φ_P), sıcak kutu duvarlarındaki ısı kayıpları (Φ_B) ve yanal ısı kayıpları (Φ_Y) dikkate alınarak “Eş. 3.23”

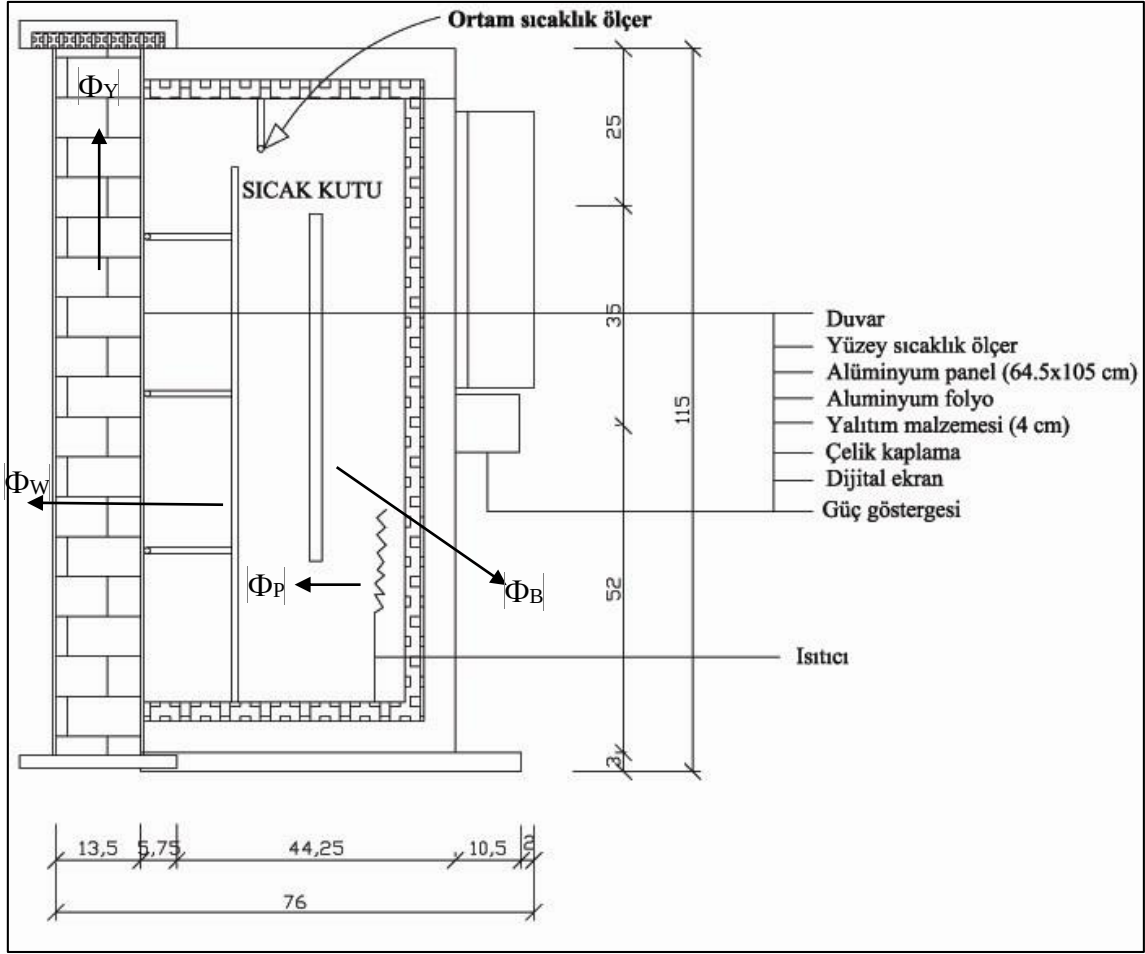
deverilen formül ile hesaplanmıştır. Burada yanal ısı kayıpları TS EN ISO 8990 (2002) standartında tariflendiği şekliyle her bir duvar için referans ısı geçiririmsilik (R_{ref} , U_{ref} ve λ_{ref}) verileri dikkate alınarak belirlenmiştir. (BS EN ISO 8990, 1996; TS 825, 2008; TS EN ISO 6949, 2009; Geola ve diğerleri., 2009, ASTM 789, 1983; ASTM 1320, 1997; ASTM 885, 1985).

$$\phi_W = \phi_P - \phi_B - \phi_Y \quad (3.23)$$

Burada; Φ_W : kalibre sonrası çalışma duvarındaki ısı akışını (W), Φ_P : Toplam gücü (W) ve Φ_B : Isı kutu duvarlarındaki ısı akışını (W) , Φ_Y : yanal ısı akışını (W) ifade eder.

Laboratuvar ortamında oluşturulan düzenekte, sıcak kutuda yanal ısı kayıplarının mevcut olduğu anlaşılmıştır. Bu sebeple yanal ısı akışı (Φ_Y)“0” W kabul edilmemiş; TS EN ISO 8990 (2002) standartında tariflenen denklemlere sözkonusu ısı kayıpları dahil edilmiştir. Referans U değerleri ile IRT-HB düzeneğinden elde edilen U değerleri arasındaki fark esas alınarak, sistemdeki yanal ısı akışı (Φ_Y) hesaplanmış; bu veri ile sistem kalibre edilmiştir. Kalibrasyon için Eş.3.23 denkleminde dahil edilen yanal ısı akışı (Φ_Y), izo tuğla duvar için $\Phi_{YID}=11,40$ W, bims blokduvar için $\Phi_{YBD}=15,77$ W ve gaz beton duvar için $\Phi_{YGD}=23,52$ W’dır. Bu aşamadan sonra IRT-HB düzeneğinden elde edilen sıcaklık verileri kullanılarak, her bir örnek duvarın gerçek/referans ısı geçiririmsilik özellikleri belirlenebilmiştir.

Çalışmada kullanılan sıcak kutunun kesiti Şekil 3.7’ de gösterilmiştir. Sıcak kutu duvarlarının ana gövdesi boyalı çelik malzemeden yapılmıştır. İç tarafına yaklaşık 4 cm kalınlığında alüminyum folyo kaplı cam yünü levha kapatılarak kabin yalıtkan hale getirilmiştir. Sıcak kutunun kendi duvarlarındaki ısı akışı “Eş. 3.24” ve “Eş. 3.25” de verilen denklemlerin çözülmesiyle belirlenmiştir (BS EN ISO 8990, 1996; TS 825, 2008, Koçkar 2012).



Şekil 3.7. Isı kabini sıcak taraf deney düzeneğinin şematik çizimi (Koçkar, 2012)

$$\phi_B = U_B \times A_B \times \Delta T \quad (3.24)$$

Burada; ϕ_B : sıcak kutu duvarındaki ısı akışını (W), U_B : sıcak kutu duvarındaki ısıl geçirimsilik değerini (W/m²K), A_B : Sıcak kutu duvarının alanını (m²), ΔT : Sıcaklık farkını (K) ifade eder.

$$U_B = \frac{1}{R_I + R_{INS} + R_{ST} + R_E} = \frac{1}{R_I + \frac{d_{INS}}{\lambda_{INS}} + \frac{d_{ST}}{\lambda_{ST}} + R_E} \quad (3.25)$$

Burada; R_I : İç yüzey ısıl iletim direncini (m²K/W), R_E : Dış yüzey ısıl iletim direncini (m²K/W), R_{INS} : Alüminyum folyo kaplı camyünü katmanının ısıl direncini (m²K/W), R_{ST} : Çelik tabakanın ısıl direncini (m²K/W), d_{INS} : Isı yalıtım katmanının kalınlığını (m), d_{ST} :

Çelik tabakanın kalınlığını (m), λ_{INS} : Alüminyum folyo kaplı camyünü katmanın ısı iletim hesap değerini (W/mK), λ_{ST} : Çelik tabakanın ısı iletim hesap değerini (W/mK) ifade eder.

Çalışma duvarının ısı akış yoğunluğu (q_{IRT-HB}) “Eş. 3.26”da verilen formülün çözümü ile belirlenebilmektedir (BS EN ISO 8990, 1996).

$$q_{IRT-HB} = \frac{\phi_w}{A} \quad (3.26)$$

Burada; q : Isı akış yoğunluğunu (W/m²), Φ_w : Çalışma duvarının ısı akışı (W/m²), A : çalışma duvar alanını (m²) ifade eder.

IRT-HB düzeneği ile duvarların ısı iletirgenlik katsayıları TS EN ISO 8990, 2002 standartında tariflendiği gibi çalışma duvarından geçen ısı akışının (Φ_w), sıcak- soğuk taraf çevre (ortam) sıcaklık farkları ($T_{NI}-T_{NO}$) ile duvar alanın (A) çarpımına oranı ile elde edilmiştir. IRT-HB yöntemi ile ısı iletirgenlik katsayısı (U_{IRT-HB}) “Eş.3.27” ile hesaplanmıştır. Burada Sıcak taraf çevre sıcaklık (T_{NI}) değeri Eş. 3.10’de verilen ve soğuk taraf çevre sıcaklık (T_{NO}) değeri ise Eş.3.13’de verilen formül ile belirlenmiştir (BS EN ISO 8990, 1996; TS 825, 2008; Geola ve diğerleri 2009). Sıcak-soğuk taraf çevre sıcaklıklarının belirlenmesinde duvarların ısı salınım (emisivite) değerine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu çalışmada kullanılan duvarların emisivite değerleri 0,95 olarak kabul edilmiş ve “E” ile gösterilmiştir (Ocana ve diğerleri, 2004

$$U_{IRT-HB} = \frac{\phi_w}{A \times (T_{NI} - T_{NO})} \quad (3.27)$$

Burada; Φ_w : Çalışma duvarının ısı akışı (W/m²), A : çalışma duvar alanını (m²), $T_{NI}-T_{NO}$: Sıcak-soğuk taraf çevre (ortam) sıcaklık farkını (°C) ifade eder.

Çalışmada incelenen duvarların IRT-HB düzeneği ile ısı direnç değerleri (R_{IRT-HB}) “Eş.3.28” kullanılarak belirlenmiştir. Duvarın sıcak taraf yüzey sıcaklık (T_{SI}) verileri duvar yüzeyinin sıcak tarafına yapıştırılmış sıcaklık kaydedicilerden (datalogger) elde edilmiştir. Duvarın soğuk taraf yüzey sıcaklık (T_{SO}) verileri ise infrared (IR) kamera ile kayıt edilen yüzey sıcaklık değerlerinden alınmıştır.

$$R_{IRT-HB} = \frac{A \times (T_{SI} - T_{SO})}{\phi_W} \quad (3.28)$$

Burada; A: Çalışma duvar alanını (m²), T_{SI}: Sıcak taraf yüzey sıcaklığını (°C) T_{SO}: Soğuk taraf yüzey sıcaklığını (°C) ve Φ_W : Çalışma duvarının ısı akışı (W/m²) ifade eder

TS EN ISO 8990 (2002) standardında belirtildiği üzere düz deney numuneleri için kalınlığın (d), IRT-HB ile elde edilen yüzey ısı direnç (R_{IRT-HB}) değerine bölünmesi ile duvara ait ısı iletkenlik hesap değeri (λ_{IRT-HB}) “Eş. 3.29” ile dolaylı yoldan elde edilmiştir

$$\lambda_{IRT-HB} = \frac{d}{R_{IRT-HB}} \quad (3.29)$$

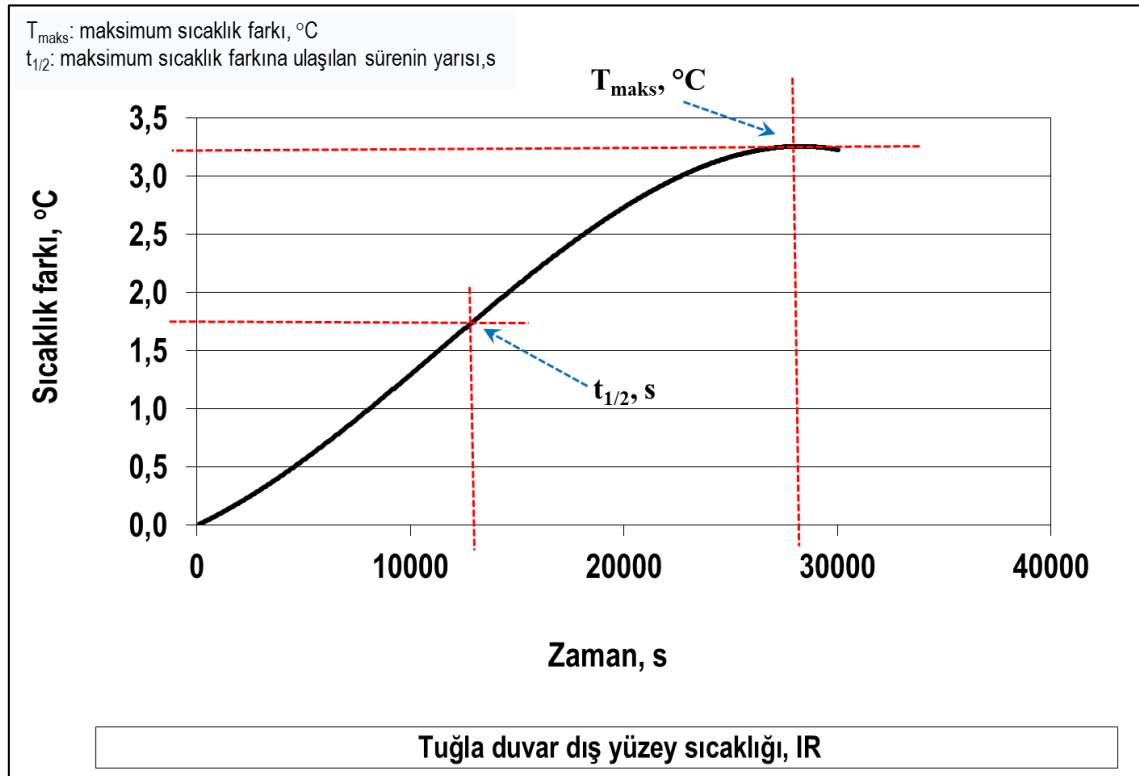
Burada; d: Çalışma duvar kalınlığını (m), R_{IRT-HB}: Çalışma duvarının IRT-HB düzeneği ile ölçülen ısı direnç değerlerini (m²K/W) ifade eder

TS 825 (2008) standardında yapı malzemelerinin değişmeyen/sabit 23°C sıcaklık ve % 80 bağıl nem ortam koşullarındaki ısı iletkenlik hesap değerleri verilmektedir. Oluşturulan bu düzeneğe ile yapılan çalışmada duvarların bulunduğu ortamın bağıl nem ve sıcaklığı sabit tutulamamıştır. Bu sebeple duvarların deney sonucu bulunan ısı iletkenlik değerlerinin (λ_{IRT-HB}), TS 825’deki listelenen ısı iletkenlik (λ_{Teorik}) hesap değeri verilerine göre daha düşük olması beklenmelidir. Ancak deney düzeneğinde oluşan ısı kaçaklarının fazla olduğu ve engellenemediği durumlarda λ_{IRT-HB} verileri diğer yöntemlerle belirtilen λ_{Teorik} ve λ_{Ref} verilerinden daha yüksek çıkmaktadır. Bunun nedeni ise sıcak kutu ile duvar birleşim noktalarında meydana gelen yanal ısı kayıplarıdır. Bu nedenle IRT-HB ve sıcak kutu yönteminin birleşik kullanımından elde edilen ısı geçirimsizlik (R_{IRT-HB}, U_{IRT-HB} ve λ_{IRT-HB}) değerleri yanal ısı kayıpları (Q_Y) göz önünde bulundurularak kalibre edilmiştir. Yanal ısı kayıpları her bir duvar için referans ısı geçirimsizlik (R_{ref}, U_{ref} ve λ_{ref}) verileri dikkate alınarak belirlenmiştir (TS EN ISO 8990, 2002).

Böylece IRT ve sıcak kutu deney yönteminin birleşik kullanımı ile oluşturulan bu deney düzeneğinin (IRT-HB), sıcak kabin çevresinden ve duvar birleşim noktalarında oluşan ısı kayıplarının engellenmesi ile yapı duvarlarının ısı karakteristiklerinin (U, R λ ve q) belirlenmesinde kullanılmış ve sonuçlar bulgular kısmında detaylıca anlatılmıştır.

3.5. IRT-HB Düzeneği ile Duvarların Isıl Yayınlılık Değerinin Belirlenmesi

IRT yöntemi ile sıcak kutu deney yönteminin birleşik kullanıldığı (IRT-HB) bu deney düzeneği ile duvarların ısıl yayınlılık (α_{IRT-HB}) değeri belirlenmiştir. Isıl yayınlılık değeri ısının malzeme yüzeyinde bir metrekaarelik alanda ne kadar sürede yayıldığını gösterir. (Grinzato ve diğerleri, 2002). IRT-HB yöntemiyle belirlenen Isıl yayınlılık değeri, sürekli ve sık aralıklarla toplanan yüzey sıcaklık verileriyle belirlenebilmekte ve ilk ısınma süreci kritik önem taşımaktadır. Bu çalışmada, veri toplama işlemi kullanılan termal kameranın sınırlılıkları doğrultusunda 2 dk'lık aralıklarla manuel olarak yapılmıştır. IRT-HB yöntemiyle ısıl yayınlılık değerinin belirlenmesinde sadece yüzey sıcaklık verileri kullanılmıştır. Yüzey sıcaklık verileri zamana karşı sıcaklık farkının verildiği grafiklerin oluşturulması için tek gerekli veridir. Bunun için ardışık ısıl görüntüleme incelenen çalışma duvarlarının soğuk tarafından elde edilen ısıl görüntüler ile ısınma sürecini, ısınma sürecinde maksimum sıcaklığa ulaşılan zaman dilimini ve ardından sıcaklığın dengeye geldiğini gösteren grafikler oluşturulmuştur. Sıcaklık farkının zamana karşı oluşturulduğu grafik Şekil 3. 8'de verilmiştir.



Şekil 3.8. Yüzey sıcaklık verileri ile elde edilen zamana karşı sıcaklık değişimini gösteren grafik

Yüzey sıcaklık farkının zamana karşı sıcaklık değişimini (artışını) gösteren (Şekil 3.8) grafikten elde edilen verilerin ASTM E1461-13 standartından faydalanılarak aşağıdaki “Eş. 3.30”da verilen formülün kullanılmasıyla duvarların ısıl yayınlılık değeri yeni, tahribatsız, pratik ve ulaşılabilir bir yöntemle hesaplanmıştır. Burada ısıl yayınlılık değeri, sabit bir sayı olan 0,138 ile duvar kalınlığı karesinin (d^2) çarpımının duvar yüzeyindeki artan sıcaklık değerinin maksimum (T_{maks}) seviyeye ulaştığı zaman diliminin yarısına ($t_{1/2}$) bölünmesiyle elde edilmiştir. Isı yayınlılık değerinin birimi “ m^2/s ”dir (Parker ve diğerleri, 1961; Grinzato ve diğerleri, 2002).

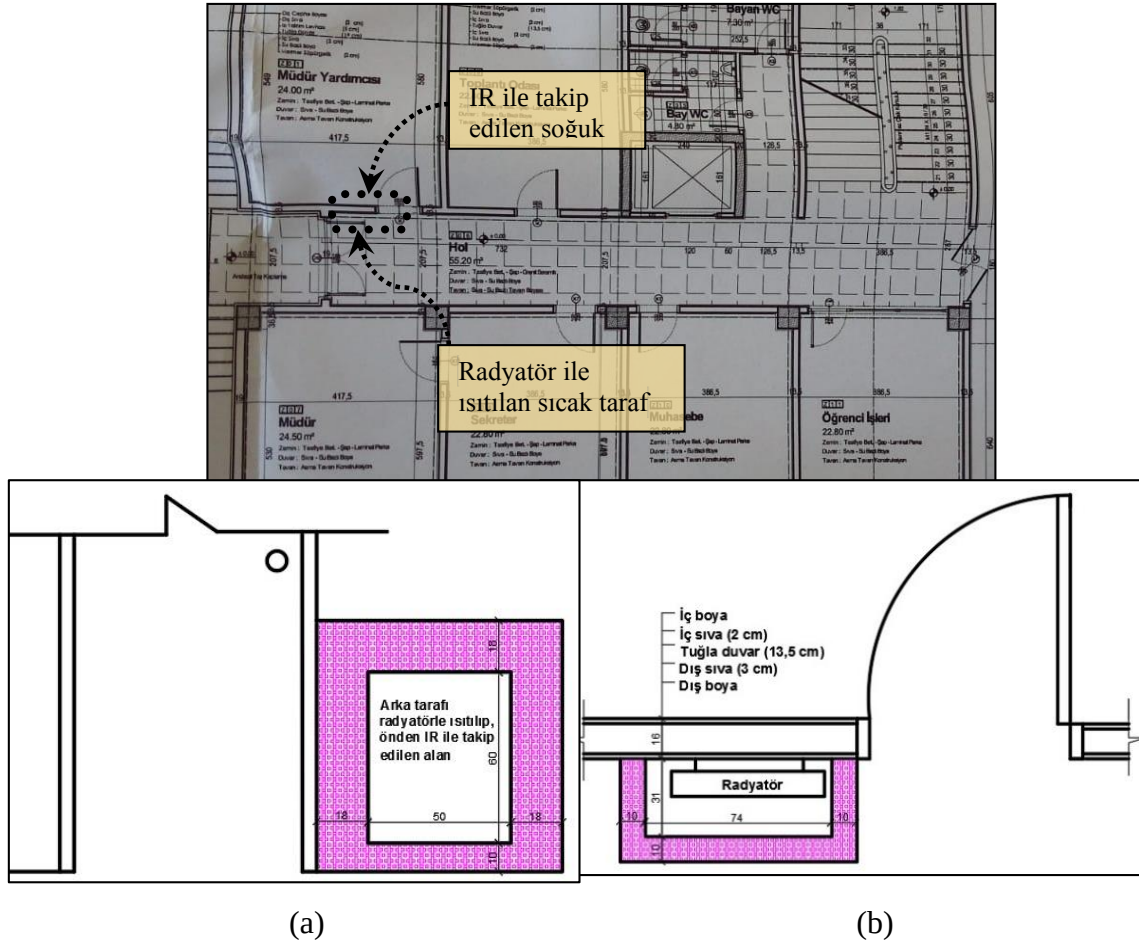
$$\alpha_{KÖIG} = 0,1388 \frac{d^2}{t_{1/2}} = \frac{1,38 \times d^2}{\pi^2 \times t_{0,5}} \quad (3.30)$$

Burada, ***d***: duvarın kalınlığını, (m), ***t_{1/2}=t_{0,5}***: sıcaklığın maksimum seviyeye ulaştığı zamanın yarısını (s), ***π***: pi sayısını ifade etmektedir

Çalışmada elde edilen sonuçlar bulgular kısmında verilmiştir.

3.6. Kızılötesi Isıl Görüntüleme ile Mevcut Duvarın Yerinde Isıl Yayınlılık Değerinin Belirlenmesi (Pilot Ölçüm)

Laboratuvar ortamında yapı duvarlarının ısıl yayınlılık değerinin belirlenmesi için kızılötesi ısıl görüntüleme yöntemi ve sıcak kutu deney yönteminin birleşik kullanımı ile geliştirilen deney düzeneği bu bölümde mevcut yapı duvarlarının yerinde ısıl yayınlılık değerinin belirlenmesinde kullanılmıştır. Yapı duvarlarının yerinde ısıl yayınlılık değerinin belirlenebilmesi için mevcut bir duvar üzerinde pilot uygulama yapılmıştır. Yapılan bu pilot uygulamada kullanılan duvarın kompozisyonu ve deney düzeneği Şekil 3.9’da verilmiştir. Buna göre toplam duvar kalınlığı 19 cm olan duvarın 13,5 cm delikli tuğla, 2 cm iç sıva ve 3 cm dış sıva ve iç-dış boyadan oluştuğu bilinmektedir. Deney düzeneğinde bir yüzeyi radyatör ile ısıtılan mevcut duvarın soğuk tarafta ısıl takibi kızılötesi ısıl görüntüleme (IRT) yöntemi ile yapılmaktadır.



Şekil 3.9. Yapılarda yerinde ısı yayınırcık değerinin belirlenmesi amacıyla yapılan pilot uygulamada kullanılan Abana MYO mevcut yapı duvarının planı ve deney düzeneğinin şematik gösterimi: a) Deney düzeneğinin IR ile görüntü alınan soğuk tarafı, b) Radyatörle ısıtılan duvar yüzeyinin sıcak tarafı

Pilot çalışma için arka tarafında radyatör bulunan ve bu radyatörle doğrudan ısıtılan bir duvar seçilmiştir. Radyatörün denk geldiği bölge bu çalışmada duvar yüzeyi için sıcak tarafı temsil etmektedir. Sıcak taraf duvar yüzeyini ısıtan radyatörün ısısının çevreye yayılmasını engellemek amacıyla radyatörün çevresini tamamen kapatacak şekilde sıcak kutu deney setinin görevini üstlenen yalıtkan bir odacık oluşturulmuştur (Şekil 3.9 ve Resim 3.12). Bu yalıtkan odacık için yaklaşık 5 mm kalınlığında bir karton kutu ile oluşturulmuştur. Karton kutunun ısı geçirimsizliğini azaltmak için kutunun iç tarafı tamamen yalıtım şiltesi ile kaplanmıştır. Bunun için 10 cm kalınlığında dış tarafı alüminyum folyo kaplı cam yünü levha kullanılmıştır. Yalıtkan odacığın ısı geçirgenlik katsayısı (U) $0,37 \text{ W/m}^2\text{K}$ ve ısı direnç değeri (R) $2,67 \text{ m}^2\text{K/W}$ olarak hesaplanmıştır. Deney düzeneği için oluşturulan bu yalıtkan odacık Resim 3.12’de gösterilmiştir.



Resim 3.12. Mevcut duvarın sıcak tarafında bulunan radyatörün ısısının muhafaza etmek için oluşturulan yalıtkan odacık ($U= 0,37 \text{ W/m}^2\text{K}$ ve $R= 2,67 \text{ m}^2\text{K/W}$)

Mevcut duvar yüzeyinde, radyatörün tam arka tarafına denk gelen duvar yüzeyi soğuk taraf çalışma alanı olarak belirlenmiştir. Çalışmada kullanılan soğuk taraf duvar yüzeyinin sadece radyatörden iletilen ısı ile etkileşim halinde olması istenmektedir. Çalışma alanında sadece arkadan iletilen ısıнын yüzeyde tespit edilmesi önemlidir. Bunun için yüzeye gelerek yüzey ısısını etkileyebilecek tüm ısı yollarının engellenmesi gerekmektedir. Bunun için çalışma duvarında radyatörle ısıtılan bölgenin çevresi polistren köpük levha ile kaplanmış ve çalışılan alanın yüzeyden ısı ile teması sınırlandırılmıştır. Resim 3.13’ de mevcut duvarın ısı yayınlılık değerini belirlemek için oluşturulan deney düzeneği gösterilmiştir. Deney düzeneğinde görüldüğü üzere duvar üzerinde sınırları belirlenmiş çalışma alanının ısı takibi termal/infrared kamera (IR) kullanılarak 2 dk aralıklara ardışık ısı görüntüleme yöntemi ile yapılmıştır. Sıcak-soğuk taraf iklim verileri veri toplayıcılar ile kayıt edilmiştir.

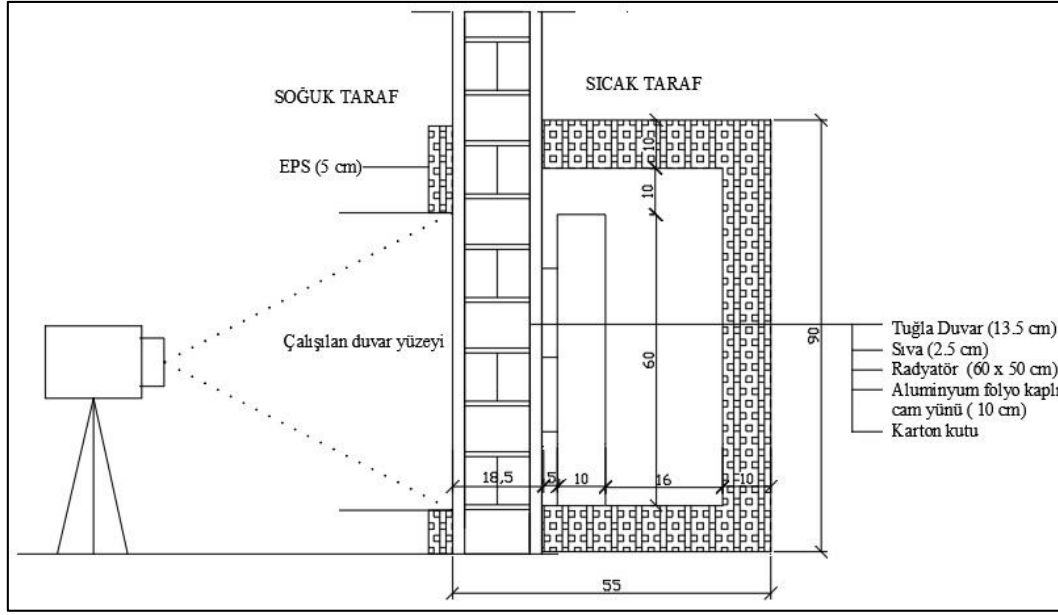


(a)

(b)

Resim 3.13. Mevcut yapı duvarının ısı yayınlılık değeri belirlendiği IRT-HB yöntemi ile oluşturulan deney düzeneğinin; (a) önden (IR kamera ile ısı takibin yapıldığı soğuk tarafı) ve (b) diğerleriadan (yalıtkan odacıkla kapatılmış radyatörle ısıtılan sıcak tarafı) görünüşü.

IRT-HB yönteminin yapı duvarlarında yerinde kullanıldığı bu deney düzeneğinde IR kamera ve yalıtkan odacık arasında bulunan duvarın kesitini, sıcak–soğuk taraf çalışma bölgesini ve yalıtkan odacığın kesitini gösteren şematik çizim Şekil 3.10’da verilmiştir.



Şekil 3.10. Mevcut yapı duvarının yerinde IRT-HB yöntemiyle incelendiği deney düzeneğinin şematik çizimi

Bu çalışmada elde edilen ısı görüntüleri IR analiz programı ile incelenmiş ve analizlerle ısı görüntü farkları oluşturulmuştur. Çalışma bölgesinden alınan yüzey sıcaklık ve ortam sıcaklık verileri zamana karşı sıcaklık sıcaklık değişimini gösteren grafik (Bkz. Şekil 3.8) oluşturulmuştur. Bu grafikten elde edilen veriler “Eş. 3.30” da verilen formülde kullanılarak mevcut yapı duvarının ısıl yayınlılık değeri (α_{IRT-HB}) hesaplanmıştır.

Yapılan bu pilot çalışmada amaç yapı duvarlarının yerinde ısıl yayınlılık değerinin IRT-HB yöntemiyle pratik, ekonomik ve hızlı bir şekilde belirlemektir. Bu pilot çalışma ile amaca ulaşılmış ve mevcut yapı duvarının ısıl yayınlılık değeri IRT-HB yöntemiyle yerinde yapılan ölçümlerle belirlenmiştir. Ayrıca bu yöntemle elde edilen verilerin doğruluğunu görmek için TS 825 verileri kullanılarak standart hesaplama metoduyla çalışma duvarına ait ısıl yayınlılık değeri (α_{Teorik}) belirlenmiştir. Mevcut yapı duvarı için elde edilen ısıl yayınlılık değerleri bulgular kısmında verilmiştir.

3.7. Sorunlu ve Sorunsuz Bölgelerin Isınma Hızı ve Sıcaklık İndeksi Ölçütleri ile Tanımlanması

Çalışma duvarının soğuk taraf yüzeylerindeki ısınma sürelerinin analizi için ısıl parametreler kullanılmıştır. Duvar yüzeyinden ardışık ısı görüntüleme yöntemiyle elde edilen sıcaklık

verileri ile duvardaki sorunlu sorunsuz bölgelerin “ısıma hız (R_w)” ve “sıcaklık indeksi (TI)” karakteristikleri ortaya çıkarılmıştır.

Çalışma duvarının sıcak tarafından soğuk tarafına doğru olan ısı akışı, zamanın kareköküne göre sıcak-soğuk taraf yüzey sıcaklığındaki değişimi gösteren grafiklerle incelenmiştir. Bu grafiklere ısınma hızı (R_w) grafikleri denilmektedir. Isınma hızı grafikleri bir yüzeyin ne kadar sürede ısındığını yani ısınma artışının zamana bağlı olarak ne kadar sürede olacağını anlatan ısı karakteristikleridir. Duvar yüzeyinde ki sağlam ve sorunlu bölgelerin (ısı köprüsü, yoğunlaşma, hava kaçağı vb ısı problem olan) tespitinde kullanılmaktadır (Tavukçuoğlu ve diğerleri, 2010; Koçkar, 2012; Tuğla ve diğerleri, 2013; 2016; 2018). Isınma hızı (R_w) “Eş. 3.31” da verilen formül ile belirlenmiştir. Isınma hızının birimi “ $^{\circ}\text{C}/\text{s}^{1/2}$ ” dir.

$$R_w = \frac{T_N - T_i}{t^{1/2}} \quad (3.31)$$

Burada; T_N : çalışılan alanın her bir (ardışık alınan) yüzey sıcaklığını ($^{\circ}\text{C}$), T_i : çalışılan alanın her bir yüzey sıcaklığının ilk değerini ($^{\circ}\text{C}$), $t^{1/2}$: Zamanın karekökünü ($\text{s}^{1/2}$) ifade eder.

Yapı duvarlarının ısı performansının tanımlamak, duvarlarda bulunan/bulunabilecek ısı sorunları tespit edecek ve duvarın yüzey sıcaklığı homojenliğini incelemek için ASTM STP 718 (1980) standartında kullanılan “sıcaklık indeksi (TI)” parametresi çalışmamız da kullanılmıştır. Sıcaklık indeksinde “bir (1)” referans değerdir. TI değeri 1’e yaklaştıkça duvar yüzeyinde ısının homojen yayıldığı yani sorunsuz/sağlam bölge olduğu, 1’in altına doğru indikçe ısı köprülerinin/ısı kaçaklarının olduğu, 1’in üstüne çıktıkça nem/yoğuşma probleminin olduğu anlaşılmaktadır (Koçkar, 2012). Çalışma duvarının sıcak ve soğuk taraf yüzeyleri arasındaki ısı akışının kararlı duruma geldiği andaki yüzey ve ortam sıcaklık verileri ile sıcaklık indeksi belirlenmiştir. TI, hem duvar yüzeleri için hem de derzler için hesaplanmıştır. Sıcaklık indeksi hesaplamalarında “Eş. 3.32” de verilen formülen faydalanılmıştır (ASTM STP 718, 1980) Sıcaklık indeksi (TI), *birimsiz*’dir.

$$TI = \frac{R_e + R_w}{R_i + R_w + R_e} = \frac{T_{so} - T_{ao}}{T_{ai} - T_{ao}} \quad (3.32)$$

Burada; R_e : Dış yüzey ısı direnci (m^2K/W), R_i : İç yüzey ısı direnci (m^2K/W), R_w : Duvarın ısı direnci, (m^2K/W), T_{so} : Soğuk taraf yüzey sıcaklığı (K) , T_{ao} : Soğuk taraf ortam sıcaklığı (K) , T_{ai} : Sıcak taraf ortam sıcaklığı (K)'dır.

Çalışma sonucunda elde edilen veriler bulgular kısmında detaylıca anlatılmıştır.

4. BULGULAR

Bu tez çalışmasında; kagir malzemelerin termofiziksel özellikleri, yapı duvarlarının ısı geçiririmsilik özellikleri, örnek/pilot uygulamada incelenen mevcut yapı duvarının ısı yayınlılık özelliği ve duvarların sorunlu ve sorunsuz bölgelerine ait ısınma hızı ile sıcaklık indeksi verileri değerlendirilmiştir. Elde edilen veriler ilgili başlıklar altında detaylıca anlatılmıştır.

4.1. Duvar Malzemelerin Termofiziksel Özellikleri

Bu tez kapsamında üç farklı duvar dolgu malzemesi olan izo tuğla, bims blokve gaz beton kagir malzemelerin birim hacim ağırlık (ρ , g/m³), özgül ısı (c , J/kgK) ve ısı iletkenlik hesap değeri (λ , W/mK) laboratuvar ortamında belirlenmiş elde edilen veriler ile ısı yayınlılık (α , m²/s) değeri, özgül ısı depolama kapasitesi (VHC, J/m³K) ve ısı nüfuz katsayısı (e , W/s^{1/2}m²K) hesaplanmıştır. Çalışma sonuçları *Uluslararası Birim Sistemine (SI)* göre Çizelge 4.1’de verilmiştir.

Laboratuvar ortamında yapılan deney sonucunda izo tuğla, bims blokve gaz betonun birim hacim ağırlıkları (ρ_{Ref}) sırasıyla 623 kg/m³, 384 kg/m³, 634 kg/m³ olarak belirlenmiştir. TS 825 (2008) standartında kullıma sunulan listelerde izo tuğla ve bims blok için birim hacim ağırlık (ρ_{Teorik}) 700 kg/m³, gaz beton için ise 400 kg/m³ olarak verilmiştir. Kagir malzemelerin deneysel yöntemle elde edilen ρ_{Ref} değerleri, TS 825 (2008) standartında verilen ρ_{Teorik} değerleri ile benzer bulunmuştur. Hem TS 825’de verilen hem de deneysel olarak elde edilen birim hacim ağırlıklarına bakıldığı zaman izo tuğla ve bims blok malzemeye göre en düşük birim hacim ağırlığına sahip olan malzeme gaz betondur. Bunun nedeni gaz betonun diğer iki kagir malzemeye göre daha fazla gözenekli bir yapıya sahip olmasıdır (Çizelge 4.1).

TS 4048 (2013) standartında tariflenen deney düzeneği ile laboratuvar ortamında izo tuğla, bims blokve gaz beton malzemeler için özgül ısı deneyi yapılmıştır. Yapılan deneyde duvar yapımında kullanılan kagir malzemelerden alınan kesit örnekleri kullanılmıştır. İzo tuğla ve bims blokiçin hazırlanan numunelerde kagir malzeme boşlukları da dahildir. Deney sonuçlarından elde edilen özgül ısı değerleri (c_{Ref}) izo tuğla, bims blokve gaz beton kagir

malzemeleri için sırasıyla 651 J/kgK, 798 J/kgK ve 990 J/kgK olarak bulunmuştur. (Çizelge 4.1). Literatürde özgül ısı değerini tuğla için 900 J/kgK (Engineering tool box, 2019), gaz beton için 1000 J/kgK (Wakili ve diğerleri, 2015; Greenspec, 2019) ve 1005 J/kgK (Kosny, 1994) ve pomza için 870 J/kgK (Celik ve diğerleri, 2016) olarak genel anlamda bir bilgi verilmiştir. Ayrıca TS EN 1745 (2004) standartında neredeyse tüm kagir malzemeler (tuğla, bims ve gaz beton) için özgül ısı değeri 1000 J/kgK olarak verilmiştir. Ancak yapılan araştırma kadarıyla standart ve literatürde bu çalışmada kullanılan malzemelerle birebir benzer özelliklere sahip malzemelerin özgül ısı değerlerine rastlanmamıştır.

Duvar örneklerinin gerçek ısı iletkenlik hesap değeri hizmet alımı yoluyla mahfazalı sıcak kutu deney yöntemi ile belirlenmiştir. Burada; İD (izo tuğla duvar), BD (bimskagir duvar) ve GD (gaz beton duvar) kodlu duvarlar için elde edilen ısı iletkenlik hesap değeri (λ_{Ref}) referans değer olarak kabul edilmiştir. TS 825 (2008) verilerinden alınan ısı iletkenlik hesap değeri (λ_{Teorik}) ile karşılaştırılmıştır. Çalışmada İD kodlu duvarın, λ_{Ref} değeri 0,17 W/mK olarak ölçülmüş ve aynı duvarın λ_{Teorik} değeri 0,24 W/mK olarak TS 825 (2008) standartından alınmıştır. BD kodlu duvarın λ_{Ref} değeri 0, 0,19 W/mK olarak ölçülmüş ve λ_{Teorik} değeri 0,25 W/mK olarak belirlenmiştir. GD kodlu duvarın ise λ_{Ref} değeri 0,11 W/mK ve λ_{Teorik} değeri 0,13 W/mK olarak bulunmuştur (Çizelge 4.1).

Birim hacim ağırlıkları, özgül ısıları ve ısı iletkenlik hesap değerleri belirlenen kagir malzemelerin ısı yayınlılık değeri (α_{Ref}) sırasıyla izo tuğla için $4,19 \times 10^{-7}$ m²/s, bims blok için $3,76 \times 10^{-7}$ m²/s, ve gaz beton için $3,16 \times 10^{-7}$ m²/s olarak bulunmuştur. α_{Ref} verileri ile literatürden elde edilen ısı yayınlılık değeri ($\alpha_{Literatür}$) verileri karşılaştırıldığında sonuçların benzer çıktığı görülmüştür (Çizelge 4.1).

Gerçek birim hacim ağırlıkları ve özgül ısı değerler elde edilen kagir malzemelerin özgül ısı depolama kapasitesi değerleri (VHC_{Ref}) belirlenmiştir (Çizelge 4.1). Belirlenen bu değerler ile ısı nüfuz katsayısı (e_{Ref}) elde edilmiştir. Elde edilen e_{Ref} değeri teorik ısı nüfuz katsayısı izo tuğla, bims blok ve gaz beton malzeme için sırasıyla 262,54 W/s^{1/2}m²K, 309,98 W/s^{1/2}m²K, ve 213,588 W/s^{1/2}m²K olarak elde edilmiştir. Her üç malzeme için de e_{Ref} değerleri e_{teorik} değerlere göre düşük bulunmuştur (Çizelge 4.1).

Çizelge 4.1. Çalışmada kullanılan kagir malzemelerin deneysel olarak elde edilen ve literatürden alınan birim hacim ağırlık, özgül ısı ve ısıl yayınlılık değerleri

Malzemeler	Birim hacim ağırlık (kg/m ³)		Özgül ısı (J/kgK)		Isıl iletkenlik hesap değeri (W/mK)		Isıl yayınlılık değeri (m ² /s)		Özgül ısı depolama kapasitesi (J/m ³ K)		Isıl nüfuz katsayısı (W/s ^{1/2} m ² K)	
	ρ_{Ref}	ρ_{Teorik}	C_{Ref}	C_{Teorik}	λ_{Ref}	$\lambda_{Teorik*}$	α_{Ref}	α_{Lit}	VHC_{Ref}	VHC_{Teorik}	e_{Ref}	e_{Teorik}
İzo tuğla	623	700	651	700	0,17	0,24	$4,19 \times 10^{-7}$	$5,2 \times 10^{-7(2)}$	405459	490000	262,54	342,93
Bims blok	634	700	798	837 ⁽⁵⁾	0,19	0,25	$3,76 \times 10^{-7}$	$4,5 \times 10^{-7(3)}$	505727	585900	309,98	382,72
Gaz beton	384	400	990	1000 ⁽¹⁾	0,11	0,13	$3,16 \times 10^{-7}$	$3,6 \times 10^{-7(4)}$	380160	400000	213,59	228,15
1: Wakili ve diğerleri. (2015); Azhary ve diğerleri. (2018) 2: Holman (2002) 3: ρ_{teorik} ve C_{teorik} verileri ile hesaplanmıştır. 4: Bonacina (2011) (5):IESVE (2019) * :TS 825 (2008)'de verilen değerler alınmıştır.												

Deney sonuçlarına göre duvarların referans ısıl iletkenlik hesap değerleri (λ_{Ref}), TS 825'de verilen λ_{Teorik} değerlerinden düşük bulunmuştur. Bu beklenen bir durumdur. Bunun nedeni, deneyin daha kuru ortamda yapılmasıdır. TS 825 (2008) standardında, malzemelerin 23°C sıcaklık ve % 80 bağıl nem ortamındaki ısıl iletkenlik değerleri verilmektedir. Oysa ki bu çalışmada duvarlar, bağıl nemi yaklaşık %45 olan ortamlarda test edilmiş ve yani ısıl geçirimsilik özellikleri daha kuru ortamlardan elde edilen veriler ile belirlenmiştir. Bu sebeple λ_{Ref} verileri kullanılarak elde edilen ısıl geçirimsilik özellikleri, TS 825 standardından alınan λ_{Teorik} değerleri kullanılarak elde edilen ısıl geçirimsilik özelliklerine göre daha iyi sonuçlar göstermiştir.

4.2. Duvar Örneklerinin Isıl Geçirimsilik Özellikleri: Isıl Geçirgenlik Katsayısı (U), Isıl Direnç Değeri (R) Isıl İletkenlik Hesap Değeri (λ) ve Isı Akış Yoğunluğu (q)

Her bir örnek duvarın (İD, BD ve GD) ısıl geçirgenlik katsayısı (U, W/m²K), TS EN ISO 8990 (2002) standartında tariflenen mahfazalı sıcak kutu/ısı kabini (hot box) yöntemi ile ölçülmüştür. Isı kabini ile ölçülen U değeri, duvarların mevcut durumdaki ısıl geçirgenlik performansını göstermektedir ve referans veri (U_{Ref}) kabul edilmiştir. U_{Ref} değeri esas alınarak duvarların referans ısıl iletkenlik hesap değeri (λ_{REF} , W/mK), referans ısıl direnç değeri (R_{Ref} , m²K/W) ve referans ısı akış yoğunluğu (q_{Ref} , W/m²) belirlenmiştir. Örnek duvarların referans alınan ısıl geçirimsilik özellikleri Çizelge 4.2'de özetlenmiştir.

Çizelge 4.2. Örnek duvarların referans ısıl geçirimsizlik özellikleri

Isıl Parametreler	İzo tuğla duvar (İD)	Bims blok duvar (BD)	Gaz beton duvar (GD)
$U_{Ref}, W/m^2K$	0,74	0,84	0,50
$R_{Ref}, m^2K/W$	1,18	1,02	1,84
$\lambda_{Ref}, W/mK$	0,17	0,19	0,11
$q_{Ref}, W/m^2$	16,21	17,96	10,99

Sıcak kutu yöntemine IRT'nin uyarlandığı, böylece IRT ve sıcak kutu yönteminin birleşik kullanıldığı düzenek ile üç örnek duvarın (İD, BD ve GD) ısıl geçirgenlik katsayısı (U değeri) tekrar ölçülmüştür. Bu düzenek ile sıcaktan soğuya doğru duvardan geçen ısı akışı peşpeşe alınan ısı görüntüleri ile takip edilmiş; bu görüntülerden elde edilen yüzey sıcaklık verileri ile Eş. 3.27 denklemi kullanılarak duvarların U_{IRT-HB} değerleri elde edilmiştir. Bu değerler, düzende mevcut olan yanal ısı akışları (Φ_Y) dahil edilerek U_{IRT-HB} değerleri tekrar hesaplanmıştır. Kalibre edilen U değerleri, referans U değerleri ile denktir ($U_{IRT-HB} = U_{Ref}$) (Çizelge 4.3)

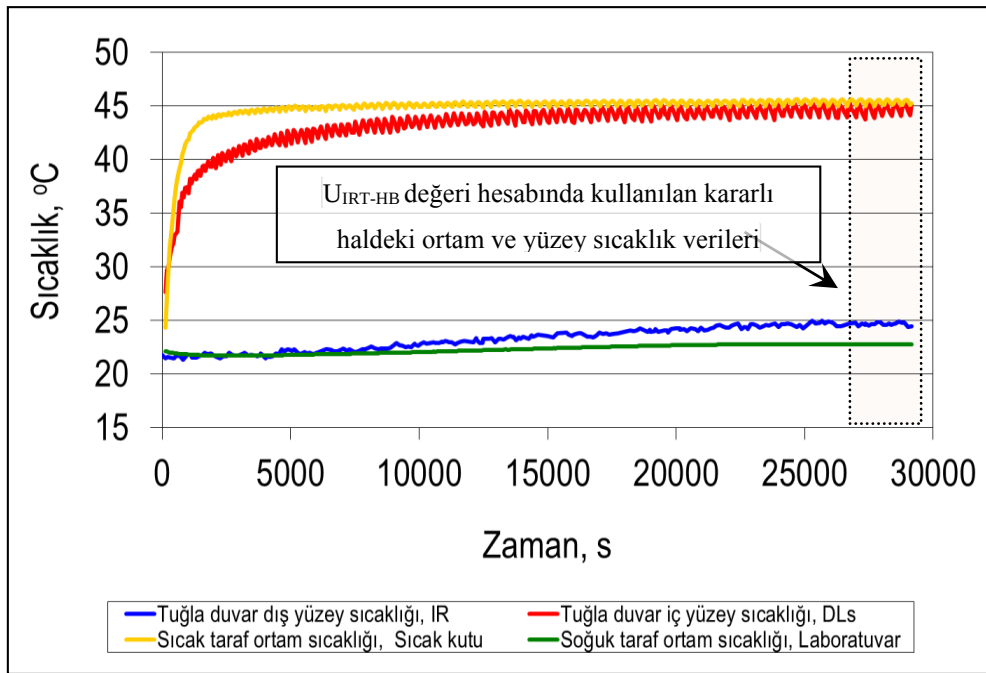
Çizelge 4.3. Örnek duvarların IRT-HB ile ölçülmüş ve yanal ısı akışları ile kalibre edilmiş U değerleri ve referans U değerleri

	$U_{IRT-HB-\Phi_Y=0}$ (W/m^2K)	Φ_Y (W)	U_{IRT-HB} (W/m^2K)	U_{Ref} (W/m^2K)
İD (izo tuğla duvar)	1,20	11,40	0,74	0,74
BD (bims blok duvar)	1,58	15,77	0,84	0,84
GD (gaz beton duvar)	1,63	23,52	0,50	0,50
U_{IRT-HB} : IRT-HB yöntemi ile ölçülmüş ve Φ_Y değerleri ile kalibre edilmiş U değerleri				

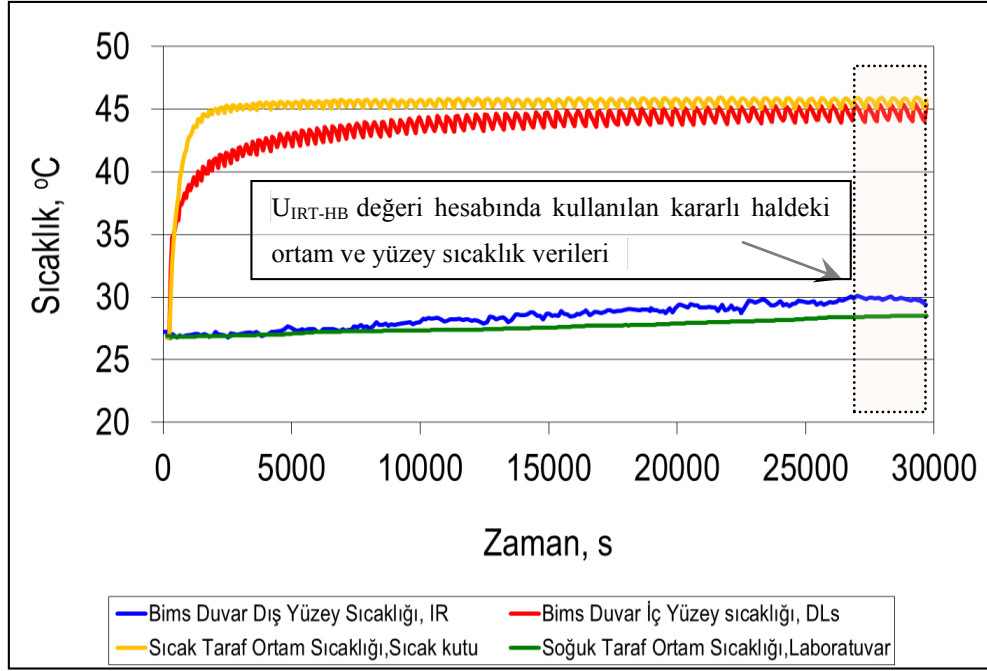
Oluşturulan yeni deney düzeneği (IRT-HB) ile her bir duvar örneğinden ardışık ısıl görüntüleme ile ısıl görüntüler alınmış ve deney süresince ortam ile yüzey sıcaklıkları kayıt edilmiştir. Yapılan deneyde ortam ve yüzey sıcaklık koşulları ile ısınmadaki artışın olduğu dönem ve kararlı durum hali her üç duvar örneği için sırasıyla Şekil 4.1, Şekil 4.2 ve Şekil 4.3'de gösterilmiştir. Bu deney kapalı bir laboratuvar ortamında yapılmıştır. Çalışma duvarının soğuk tarafı (dış taraf) laboratuvar ortamının sıcaklık ve bağıl nem gibi mikroklimatik verilerinden doğrudan etkilenmektedir. Bu nedenle laboratuvar ortamındaki sıcaklık ve bağıl nem deney süresince hassasiyetle takip edilmiştir. Duvarların ısıl geçirgenlik özelliklerinden değerlerini belirlemek için ortam ve yüzey sıcaklıklarının kararlı haldeki verileri kullanılmıştır. Deneyisel çalışmada sıcak ve soğuk ortamının kararlı hale

geldiği zaman dilimi, sıcak ve soğuk taraftaki yüzey sıcaklık farkının sabitlendiği süreç esas alınarak belirlenmiştir.

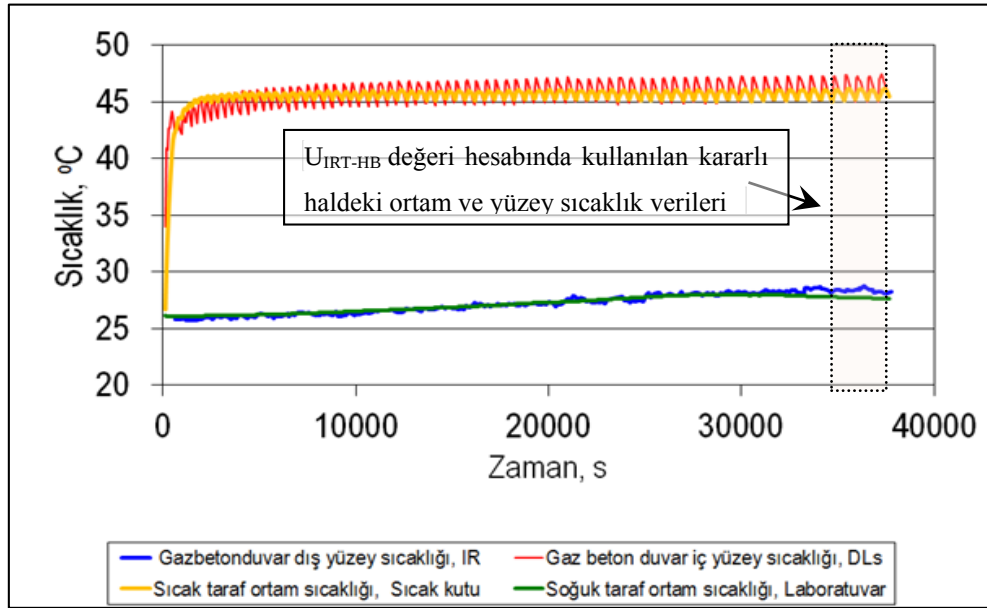
Isıl geçirgenlik özelliklerinin belirlenmesi ile ilgili hesaplamalar için, İD kodlu izo tuğla duvarın, kararlı durumdaki yaklaşık 1500 s süresince elde edilen verilerin ortalaması kullanılmıştır (Şekil 4.1). BD kodlu bims blokduvarın dış yüzey sıcaklığının ortamlara dengeye gelmesi de İD kodlu duvar ile yaklaşık aynı sürededir (Şekil 4.2). GD kodlu gaz beton gözenekli bir malzeme olmasından dolayı yalıtım niteliği diğer iki duvara göre daha iyidir. Bu nedenle GD kodlu duvarın diğer iki duvara göre ortamlara dengeye gelmesi daha uzun zaman almıştır. Gaz beton duvar için deney süresi daha uzun tutulmuştur (Şekil 4.3).



Şekil 4.1. İD kodlu izo tuğla duvarın deney süresince zamana karşı duvarın sıcak ve soğuk tarafındaki ortam ve yüzey sıcaklığındaki değişimi gösteren grafik.



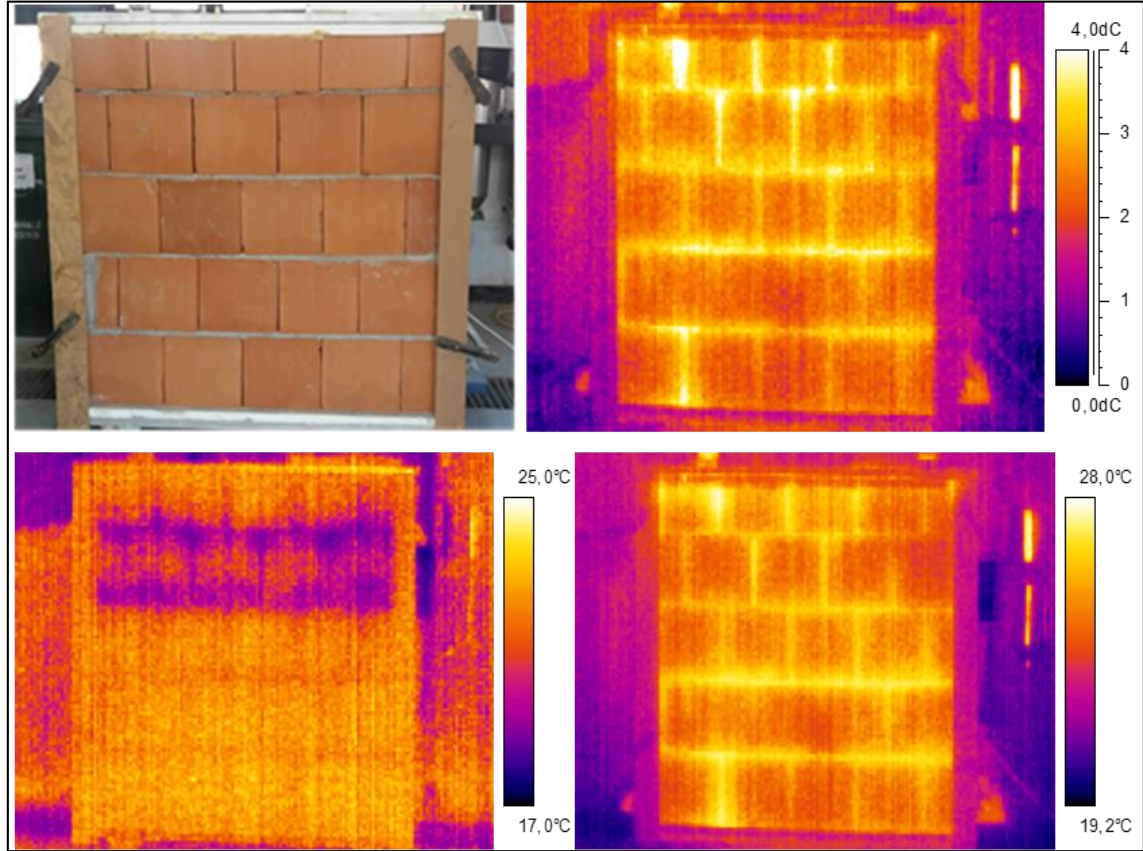
Şekil 4.2. BD kodlu bims blokdüvarın deney süresince zamana karşı duvarın sıcak ve soğuk tarafındaki ortam ve yüzey sıcaklığındaki değişimi gösteren grafik.



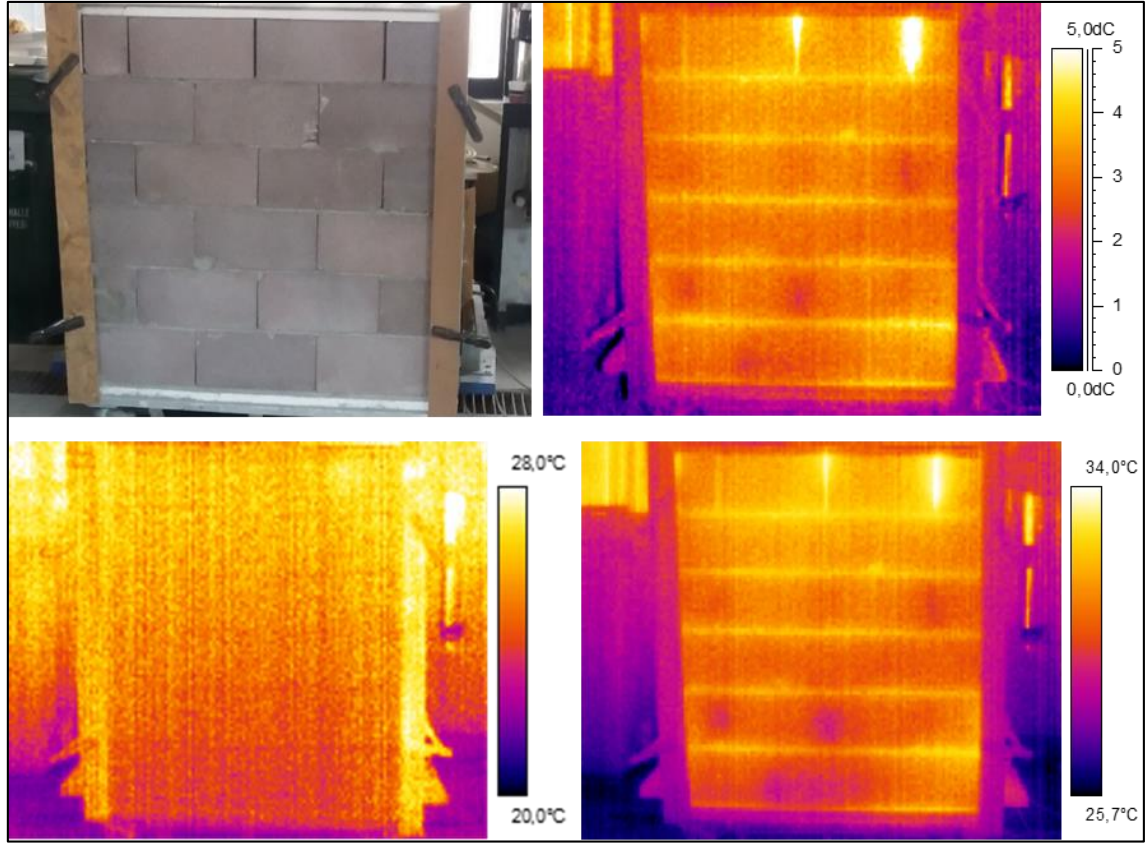
Şekil 4.3. GD kodlu gaz beton duvarın deney süresince zamana karşı duvarın sıcak ve soğuk tarafındaki ortam ve yüzey sıcaklığındaki değişimi gösteren grafik.

Çalışma duvarlarının soğuk taraf yüzey sıcaklıkları termal kamera ile takip edilmiş; ısınmanın başlaması ile birlikte alınan ilk yüzey sıcaklıkları ile kararlı durumu temsil eden son yüzey sıcaklıkları arasındaki sayısal farkı gösteren ısı görüntüleri oluşturulmuştur. Bu ısı görüntülere diferansiyel ısı görüntüleri denmektedir. İD, BD ve GD kodlu farklı ısı

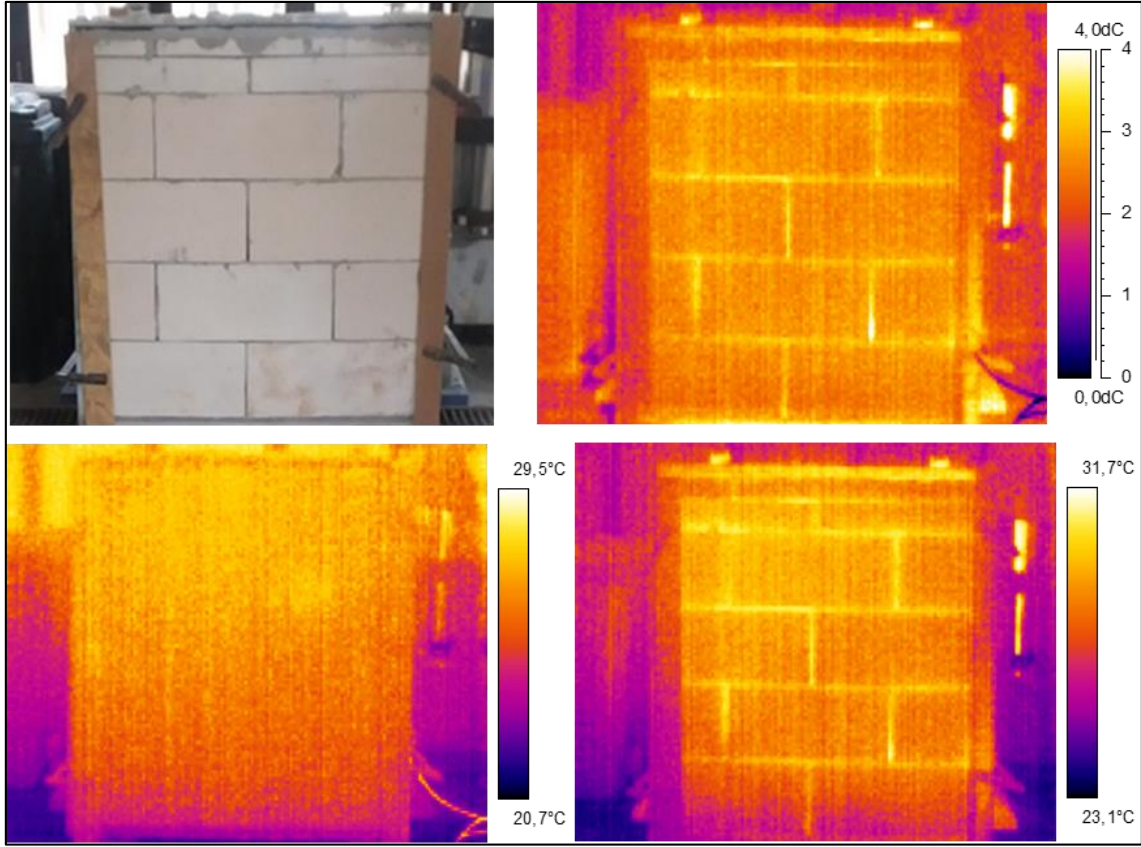
geçirimlilik özelliklerine sahip duvarlara ait ilk ve son ısı görüntüleri ve duvar yüzeyindeki sıcaklık artışını sayısal olarak ifade eden sıcaklık farkı görüntüleri, sırasıyla Resim 4.1, Resim 4.2 ve Resim 4.3’de verilmiştir.



Resim 4.1. İD kodlu izo tuğla duvara ait ısı görüntüleri: duvarın görünüşü (sol üstte), sıcak kutu tarafından ısıtılmaya başlanan duvardan alınan ilk IR görüntü (sol altta), zaman periyodu 29145s (7 saat) ısıtma sürecindeki son IR görüntü (sağ altta), sıcak kutunun ortam sıcaklığı 45,4 °C ile bağıl nemi % 20 ve soğuk tarafın ortam sıcaklığı 22,6 °C ile bağıl nemi % 33, ilk IR görüntü ile son IR görüntü arasındaki fark (sağ üstte).



Resim 4.2. BD kodlu bims blokduvara ait ısı görüntüleri: duvarın görünüşü (sol üstte), sıcak kutu tarafından ısıtmaya başlanan duvardan alınan ilk IR görüntü (sol altta), zaman periyodu 30959 s (8,5 saat) ısıtma sürecindeki son IR görüntü (sağ altta), sıcak kutunun ortam sıcaklığı 45,7 °C ile bağıl nemi % 25,3 ve soğuk tarafın ortam sıcaklığı 27,1 °C ile bağıl nemi % 44,4, ilk IR görüntü ile son IR görüntü arasındaki fark (sağ üstte).



Resim 4.3. GD kodlu gaz beton duvara ait ısı görüntüleri: duvarın görünüşü (sol üstte), sıcak kutu tarafından ısıtmaya başlanan duvardan alınan ilk IR görüntü (sol altta), zaman periyodu 83255 s ısıtma sürecindeki son IR görüntü (sağ altta), sıcak kutunun ortam sıcaklığı 45,7 °C ile bağıl nemi % 25 ve soğuk tarafın ortam sıcaklığı 26,7 °C ile bağıl nemi % 43, ilk IR görüntü ile son IR görüntü arasındaki fark (sağ üstte).

IRT-HB düzeneği ile elde edilen yüzey sıcaklık verileri kullanılarak duvarların “IRT-HB ısı geçirirmlilik değerleri (U_{IRT-HB} , R_{IRT-HB} ve λ_{IRT-HB})” belirlenmiştir. Bu değerler, duvarların Yapı ARGE firmasında yaptırılan, mahfazalı sıcak kutu deney yöntemiyle belirlenen ve referans kabul edilen gerçek ısı geçirirmlilik değerleri (U_{REF} , R_{REF} , λ_{REF} ve q_{REF}) ve TS 825 (2008) standartında verilen ısı iletkenlik hesap değeri (λ_{teorik}) kullanılarak hesaplanan ısı geçirirmlilik özellikleri (U_{Teorik} , R_{Teorik} ve λ_{Teorik}) karşılaştırılmıştır. Çalışmada üç farklı şekilde elde edilen ısı geçirirmlilik özellikleri Çizelge 4.4’de özetlenmiştir. İD, BD ve GD kodlu duvarlar için elde edilen sonuçlar aşağıda detaylıca anlatılmıştır:

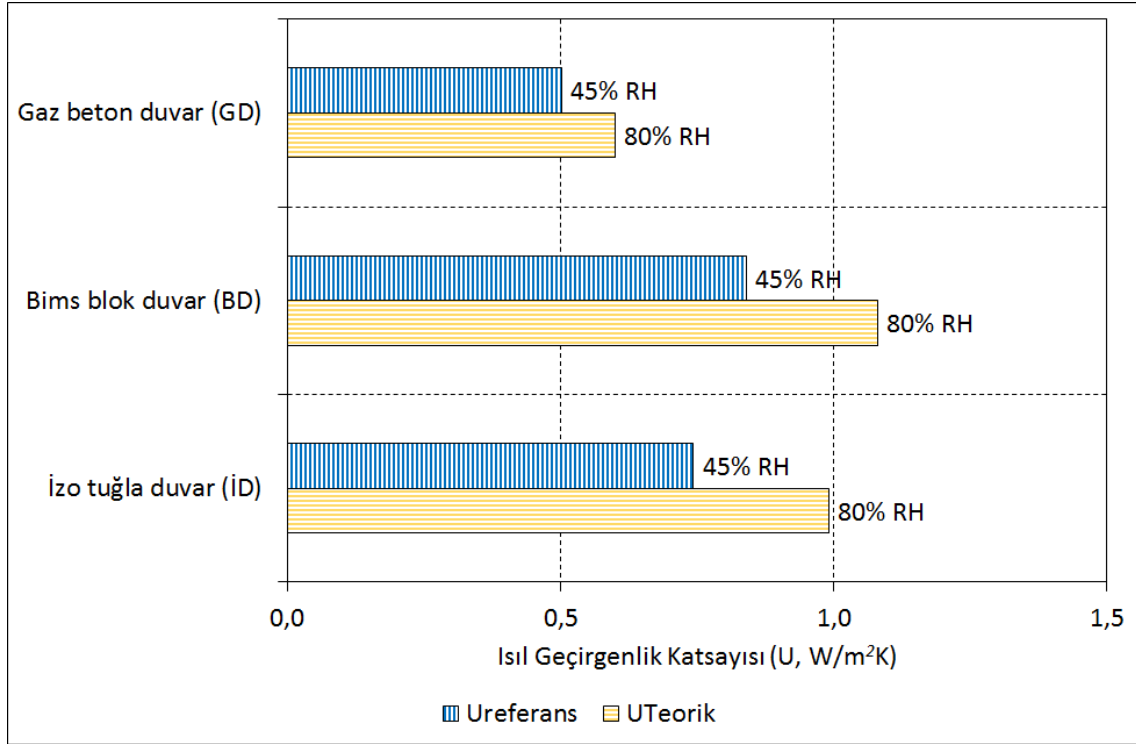
- İD kodlu izo tuğla duvarın, sıcak kutu deney sonucuna göre hesaplanan ısı geçirirmlilik katsayısı (U_{REF}) 0,74 W/m²K, ısı direnç değeri (R_{REF}) 1,18 m²K/W, ısı iletkenlik hesap değeri (λ_{REF}) 0,17 W/mK ve ısı akış yoğunluğu (q_{REF}) 16,21 W/m²’dir. TS 825 (2008)’de verilen λ_{Teorik} 0,24 W/mK değeri kullanılarak U_{teorik} değeri 0,99 W/m²K ve R_{teorik} değeri 0,83 m²K/W olarak hesaplanmıştır (Çizelge 4.4).

- BD kodlu bims blokduvarın, sıcak kutu deney sonucuna göre hesaplanan ısıl geçirimsilik katsayısı (U_{Ref}) $0,84 \text{ W/m}^2\text{K}$, ısıl direnç değeri (R_{Ref}) $1,02 \text{ m}^2\text{K/W}$, ısı iletkenlik hesap değeri (λ_{Ref}) $0,19 \text{ W/mK}$ ve ısı akış yoğunluğu (q_{Ref}) $17,96 \text{ W/m}^2$ 'dir. TS 825 (2008)'de verilen λ_{Teorik} $0,25 \text{ W/mK}$ değeri kullanılarak U_{Teorik} $1,08 \text{ W/m}^2\text{K}$ ve R_{Teorik} $0,76 \text{ m}^2\text{K/W}$ olarak hesaplanmıştır (Çizelge 4.4).
- GD kodlu gaz beton duvarın, sıcak kutu deney sonucuna göre hesaplanan ısıl geçirimsilik değeri (U_{Ref}) $0,50 \text{ W/m}^2\text{K}$, ısıl direnç değeri (R_{Ref}) $1,84 \text{ m}^2\text{K/W}$, ısı iletkenlik hesap değeri (λ_{Ref}) $0,11 \text{ W/mK}$ ve ısı akış yoğunluğu (q_{Ref}) $10,99 \text{ W/m}^2$ 'dir. TS 825 (2008)'de verilen λ_{Teorik} $0,13 \text{ W/mK}$ değeri kullanılarak U_{Teorik} $0,59 \text{ W/m}^2\text{K}$ ve R_{Teorik} $1,54 \text{ m}^2\text{K/W}$ olarak hesaplanmıştır. (Çizelge 4.4).

Çizelge 4.4. Çalışılan duvarlara ait referans ve teorik ısıl geçirimsilik özellikleri

Isıl Parametreler	İzo tuğla duvar (İD)		Bims blok duvar (BD)		Gaz beton duvar (GD)	
	Referans	Teorik	Referans	Teorik	Referans	Teorik
$U, \text{W/m}^2\text{K}$	0,74	0,99	0,84	1,08	0,50	0,59
$R, \text{m}^2\text{K/W}$	1,18	0,83	1,02	0,76	1,84	1,54
$\lambda, \text{W/mK}$	0,17	0,24*	0,19	0,25*	0,11	0,13*
$q, \text{W/m}^2$	16,21	-	17,96	-	10,99	-
U: Isıl geçirimsilik katsayısı, R: Isıl geçirgenlik direnci, λ : Isı iletkenlik hesap değeri, q :ısı akış yoğunluğu * :TS 825 (2008)'de verilen değerler alınmıştır.						

Referans U verileri ile teorik U verilerinin birbirlerinden farklı olması dikkat çekicidir (Şekil 4.4.). Teorik verilerin aslında ölçüm yapılarak elde edilmiş gerçek U verilerine yakın çıkması beklenir. Referans veriler % 45 bağıl nem ortamında yapılan ölçümlerden elde edilmiştir. TS825 (2008) standardında, malzemelerin % 80 bağıl nem ortamında ölçüldüğü ısı iletkenlik değerlerinin teorik U değeri hesaplamalarında kullanılması gerektiği belirtilmektedir. Bu durumda, teorik U verileri, referans U verilerine kıyasla, daha yüksek bağıl nem ortamındaki duvarın ısıl geçirimsilik performansını temsil etmektedir. Bu sebeple, referans U verilerinin teorik U verilerinden daha düşük ölçülmüş olması, daha kuru bir bağıl nem ortamında ölçüm yapılmış olmasından kaynaklanmaktadır. Standartlarda verilen teorik λ verileri, duvarların referans U verilerinden hesaplanan referans λ verilerinden yüksek olması, bu çıkarımı desteklemektedir.



Şekil 4.4. % 45 bağıl nem (RH) ortamında ölçülmüş olan referans ısıl geçirgenlik katsayısı (U_{Referans}) ile % 80 bağıl nem ortamına göre hesaplanmış olan teorik ısıl geçirgenlik katsayısı (U_{Teorik}) değerlerini kıyaslayan grafik.

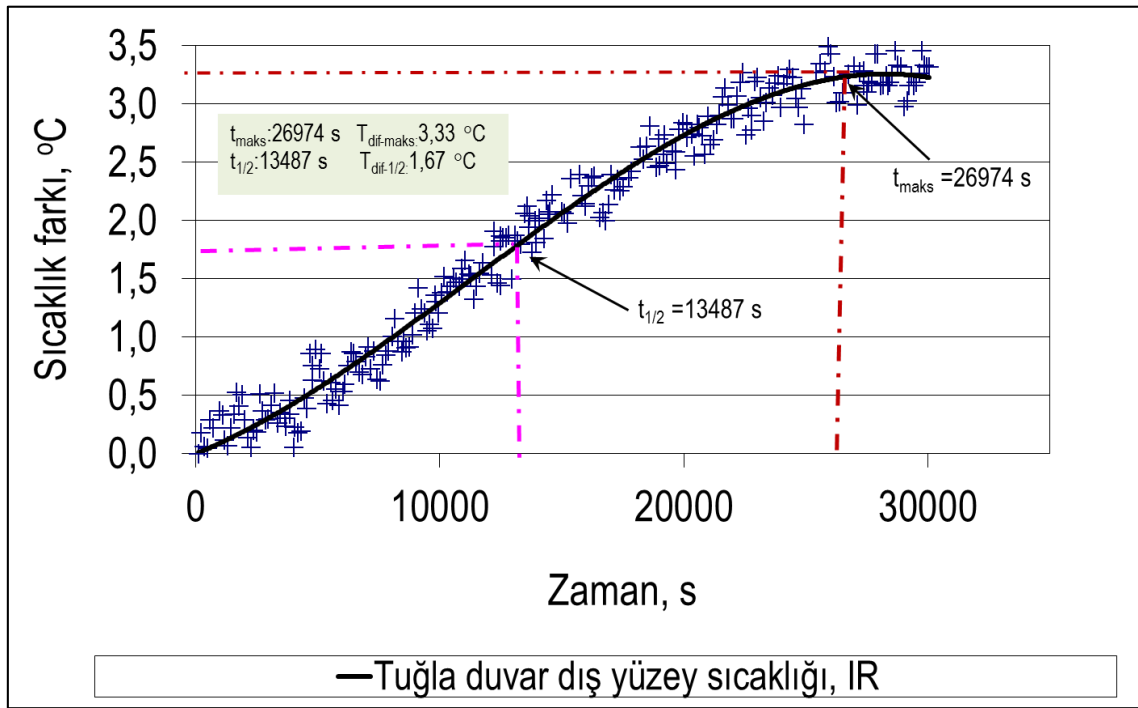
Çalışmada IRT-HB düzeneğinde oluşan ısı kaçaklarının ısıl geçirimsizlik özelliklerini olumsuz etkilediği tespit edilmiştir. Bu nedenle IRT-HB değerleri referans değerlere göre kalibre edilmiştir. Böylece her üç duvar içinde referans ısıl geçirimsizlik değerleri, IRT-HB ısıl geçirimsizlik değerleri ile benzer bulunmuştur. Hesaplanan ısıl geçirimsizlik özellikleri ise referans ve IRT-HB değerlere göre farklı bulunmuştur. Yani kısaca duvarların U_{Ref} ve $U_{\text{IRT-HB}}$ değerleri, TS 825 standardında verilen ısıl iletkenlik (λ_{Teorik}) verileri ile hesaplanan ısıl geçirimsizlik (U_{Teorik}) değerine göre düşük bulunmuştur (Şekil 4.4.). Bu beklenen bir durumdur. Bunun nedeni, deneyin daha kuru ortamda yapılmasıdır. Çalışmada en güçlü ısıl özelliklere sahip olan duvar gaz beton kagir malzeme ile örülmüş GD kodlu duvar olmuştur.

4.3. Duvarların IRT-HB Düzeneği ile Elde Edilen ısıl Yayınlılık Değeri

IRT ve sıcak kutu yönteminin birleşik kullanımı ile oluşturulan deney düzeneği ile yapılan çalışmada incelenen örnek duvarların (İD, BD ve GD) ısıl yayınlılık değeri (α , m^2/s) belirlenmiştir. Çalışılan üç farklı duvar örneğinin (İD, D ve GD) ısıl yayınlılık hesap değeri IRT-HB ve sıcak kutu deney yöntemlerinin birleşik kullanımı ile geliştirilen deney düzeneğinden elde edilen ısınma sürecindeki veriler kullanılarak belirlenmiştir. Bu nedenle

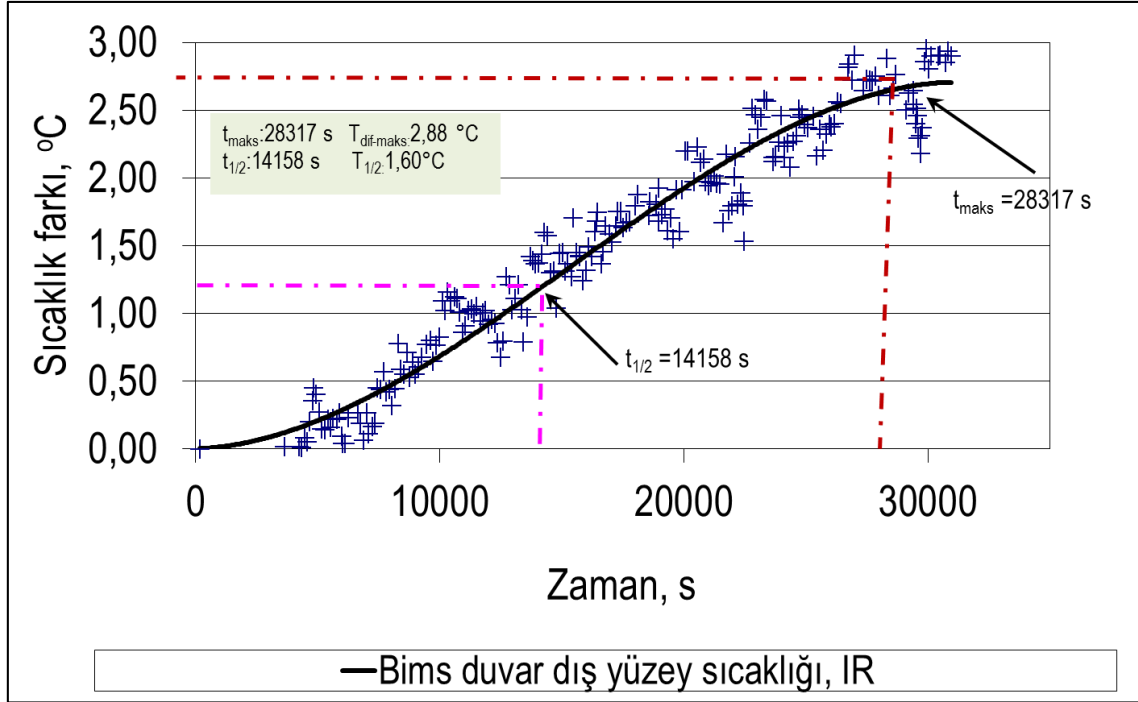
her bir duvar öneği için ısınma süreci grafikleri oluşturulmuştur. Bu grafikler sırasıyla Şekil 4.5, Şekil 4.6 ve Şekil 4.7 'de gösterilmiştir.

İD kodlu izo tuğla duvar için elde edilen en yüksek yüzey sıcaklığı (T_{maks}) 24,79 °C, bu sıcaklığa ulaşıncaya kadar geçen süreç (t_{maks}) 26974 s, bu süreçte tuğla duvardaki yüzey sıcaklık artışı $T_{DIF-MAKS}$ 3,33 °C, bu sıcaklık farkının yarısına ulaşılan süreç ($t_{1/2}$) 13487 s'dir (Şekil 4.5). Bu veriler bkz. Eş.3.16 verilen formülde kullanılarak İD kodlu tuğla duvarın ısıl yayılım değeri (α_{IRT-HB} , m²/s) belirlenmiştir.



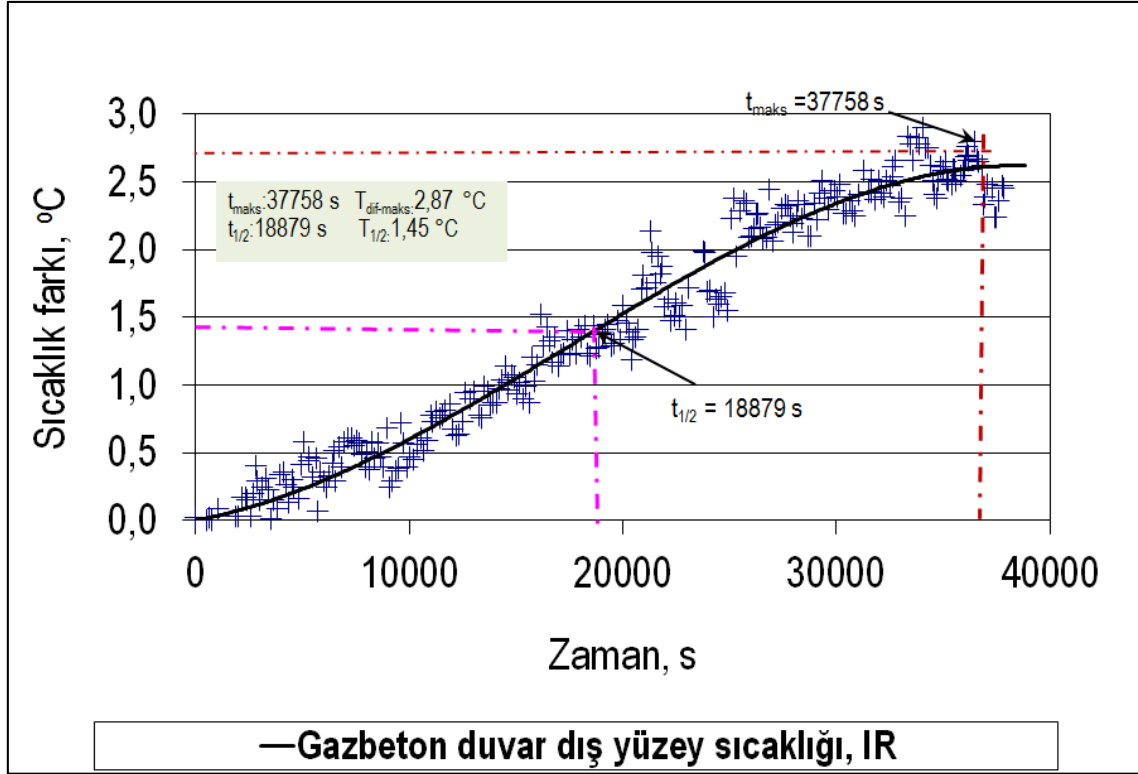
Şekil 4.5. İD kodlu izo tuğla duvarın zamana karşı soğuk tarafındaki yüzey sıcaklık değişimini gösteren grafik

BD kodlu bims blokduvar için elde edilen en yüksek yüzey sıcaklığı (T_{maks}) 30,09 °C, bu sıcaklığa ulaşıncaya kadar geçen süreç (t_{maks}) 28317 s, bu süreçte bims blokduvardaki yüzey sıcaklık artışı $T_{DIF-MAKS}$ 2,88 °C, bu sıcaklık farkının yarısına ulaşılan süreç ($t_{1/2}$) 14158 s'dir (Şekil 4.6). Bu veriler bkz. Eş.3.16 verilen formülde kullanılarak BD kodlu bims blokduvarın ısıl yayılım değeri (α_{IRT-HB} , m²s⁻¹) belirlenmiştir.



Şekil 4.6. BD kodlu bims blokduvarın zamana karşı soğuk tarafındaki yüzey sıcaklık değişimini gösteren grafik

GD kodlu gaz beton duvar için elde edilen en yüksek yüzey sıcaklığı (T_{maks}) 28,49 °C, bu sıcaklığa ulaşıncaya kadar geçen süreç (t_{maks}) 37758 s, bu süreçte gaz beton duvardaki yüzey sıcaklık artışı $T_{DIF-MAKS}$ 2,87 °C, bu sıcaklık farkının yarısına ulaşılan süreç ($t_{1/2}$) 18879 s'dir (Şekil 4.7). Bu veriler Eş.3.16 verilen formülde kullanılarak GD kodlu gaz beton duvarın ısıl yayılım değeri (α_{IRT-HB} , m²/s) belirlenmiştir.



Şekil 4.7. GD kodlu gaz beton duvarın zamana karşı soğuk tarafındaki yüzey sıcaklık değişimini gösteren grafik

Bu çalışmada ayrıca her üç tuğla duvarda kullanılan kagir malzemelerin ısıl yayınlılık değeri teorik (α_{teorik}) ve laboratuvar verileri (α_{Ref}) kullanılarak standart hesaplama yöntemleri ile de belirlenmiştir. IRT-HB yöntemi kullanılarak termo fiziksel özelliklere (λ , c , ρ vb.) ihtiyaç duyulmadan sadece yüzey sıcaklık verileri ile belirlenen ısıl yayınlılık ($\alpha_{\text{IRT-HB}}$) özellikleri ve diğer yöntemlerle belirlenen ısıl yayınlılık değerleri Çizelge 4.5’de verilmiştir. Her bir duvar için elde edilen veriler aşağıda açıklanmıştır:

- İD kodlu 20 cm kalınlığındaki duvarda α_{referans} değeri $4,19 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$, α_{teorik} değeri $4,90 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ ve IRT-HB yöntemi kullanılarak belirlenen izo tuğla duvarın $\alpha_{\text{IRT-HB}}$ değeri $4,12 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ olarak bulunmuştur (Çizelge 4.5).
- BD kodlu 19 cm kalınlığındaki duvarda α_{referans} değeri $3,76 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$, α_{teorik} değeri $4,27 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ ve IRT-HB yöntemi kullanılarak belirlenen izo tuğla duvarın $\alpha_{\text{IRT-HB}}$ değeri $3,57 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ olarak bulunmuştur (Çizelge 4.5).
- GD kodlu 20 cm kalınlığındaki duvarda α_{referans} değeri $3,16 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$, α_{teorik} değeri $3,25 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ ve IRT-HB yöntemi kullanılarak belirlenen izo tuğla duvarın $\alpha_{\text{IRT-HB}}$ değeri $2,94 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ olarak bulunmuştur (Çizelge 4.5).

Çizelge 4.5. Duvarların referans ve teorik ısıl yayınlılık değerleri, bu değerlerin hesaplanmasında kullanılan kagir malzemenin termofiziksel özellikleri ve duvarların IRT-HB yöntemi ile ölçülmüş ısıl yayınlılık değerleri

Duvarlar	Termo Fiziksel Özellikler				Isıl yayınlılık değerleri (α , m ² /s)	
	d (cm)	λ (W/mK)	c (J/kg°C)	ρ (kg/m ³)		
İzo tuğla duvar (İD)	20	0,17	651	623	4,19x10 ⁻⁷	α_{REF}
	20	0,24*	700	700	4,90x10 ⁻⁷	α_{Teorik}
	-	-	-	-	4,12x10 ⁻⁷	α_{IRT-HB}
Bims blok duvar (BD)	19	0,19	798	634	3,76x10 ⁻⁷	α_{REF}
	19	0,25*	837**	700	4,27x10 ⁻⁷	α_{Teorik}
	-	-	-	-	3,57x10 ⁻⁷	α_{IRT-HB}
Gaz beton duvar (GD)	20	0,12	990	384	3,16x10 ⁻⁷	α_{REF}
	20	0,13*	1000**	400	3,25x10 ⁻⁷	α_{Teorik}
	-	-	-	-	2,94x10 ⁻⁷	α_{IRT-HB}
d: kalınlık, λ : ısı iletkenlik hesap değeri, c: özgül ısı, ρ : birim hacim ağırlık *: TS 825 standartından alınmıştır. **: Literatürden alınmıştır (Wakili ve diğerleri, 2015; IESVE, 2019)						

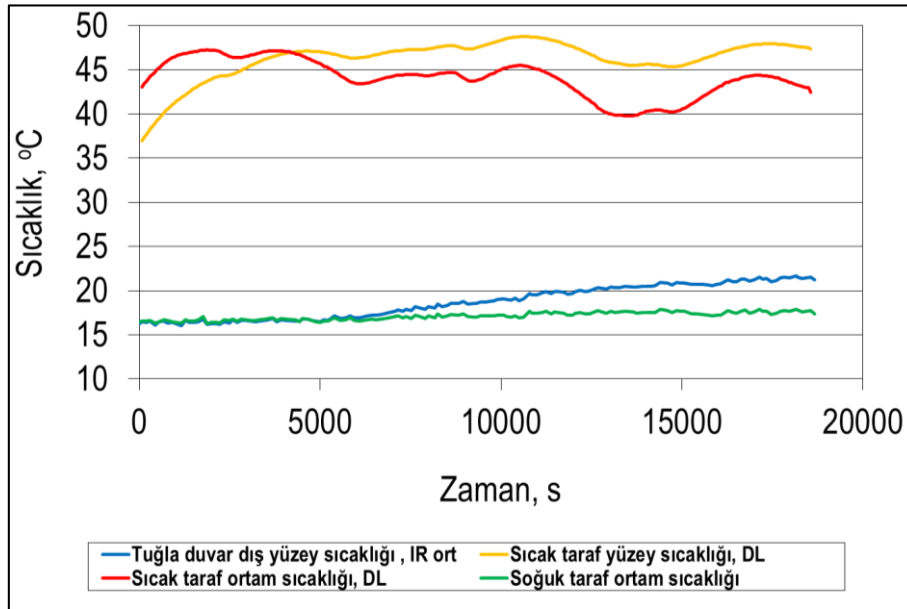
Çalışmada her üç duvar türü için de α_{IRT-HB} değerleri $\alpha_{referans}$ değerlerine yakın çıkmıştır. Teorik olarak hesaplanan α_{teorik} değeri ise $\alpha_{referans}$ değerinden α_{IRT-HB} değerine göre daha uzak bulunmuştur. Bu durum IRT-HB yönteminin kullanıldığı bu deney düzeneğinin yapı duvarlarında ısıl yayınlılık değeri hesaplanmasında işe yarar ve pratik bir yöntem olduğunu göstermiştir. Burada önemli olan ardışık ısıl görüntüleme yönteminde verilerin otomatik olarak daha sık aralıklarla toplanmasını sağlayacak bir deney düzeneğinin oluşturulmasıdır. Böylece sadece yüzey sıcaklık verileriyle duvarların gerçek ısıl yayınlılık değerlerinin belirlenmesi daha kolay bir hale gelmiştir.

4.4. Kızılötesi Isıl Görüntüleme ile Mevcut Duvarın Yerinde Belirlenen Isıl Yayınlılık Değeri (Pilot Çalışma)

Bu çalışmada kızılötesi ısıl görüntüleme yönteminin yerinde yapı duvarlarının ısıl yayınlılık özelliğinin belirlemede kullanılabilirliğini test etmek amacıyla ön araştırma niteliğinde bir pilot uygulama yapılmıştır. Yapılan bu ön çalışmada mevcut bir yapı duvarı üzerinde IRT yöntemiyle yerinde ısıl yayınlılık (α) değerinin belirlenmesi hedeflenmiştir. Bu bölüm kapsamında IRT-HB (IRT ve sıcak kutu birleşik düzenek) yöntemine benzer yerinde bir deney düzeneği kurulmuştur. Kurulan bu deney düzeneği sıcak ve soğuk olmak üzere iki taraf ve bu taraflar arasında bulunan mevcut yapı duvarından oluşmaktadır. Bu çalışmada sıcak (arka) taraf sıcak kutu yerine bir radyatör ile ısıtılmış ve radyatörün ısınısını muhafaza etmek amacıyla iç tarafı alüminyum folyo kaplı cam yünü levha ile yalıtılan küçük bir kutu

kapatılmıştır. Mevcut duvar soğuk (ön) taraftan termal kamera ile ısı takibe alınmıştır (bkz. Resim 3.14 ve Şekil 3.10). Deney süresince ortam ve yüzey sıcaklıkları veri toplayıcılarla kayıt edilmiştir. Isıl yayınlılık hesap değerini (α) belirlemek için ise ısınma sürecindeki veriler kullanılmıştır.

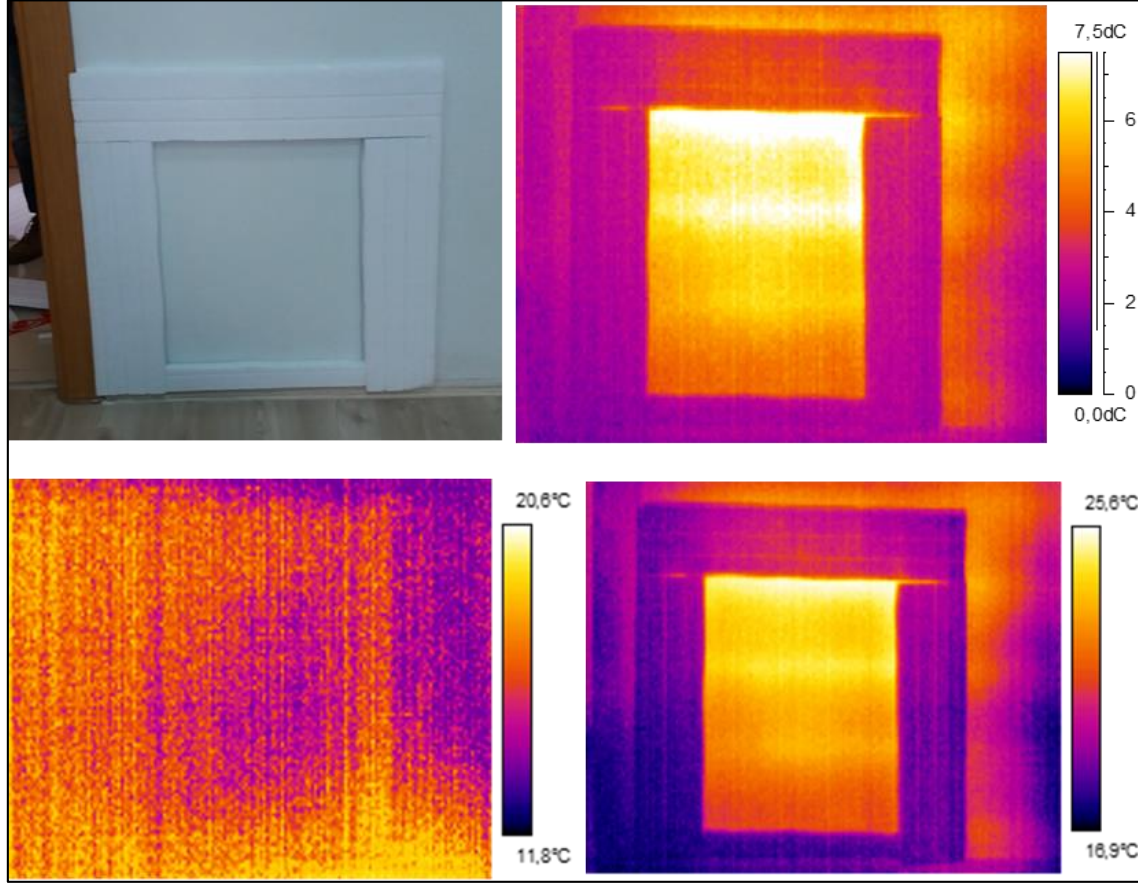
Yapılan bu deneyde ortam sıcaklığı verileri, yüzey sıcaklığı verileri, ısınmadaki artışın olduğu dönem ve kararlı durum hali Şekil 4.8’de gösterilmiştir. Çalışmada kullanılan duvar mevcut bir iç duvar olduğu için deney dış ortama kapalı bir alanda yapılmıştır. Bu nedenle çalışma duvarının soğuk tarafı (ön) mevcut ortamının sıcaklık ve bağıl nem gibi mikroklimatik verilerinden doğrudan etkilenmektedir. Bu sebeple deney ortamındaki sıcaklık ve bağıl nem farklılıkları deney süresince hassasiyetle takip edilmiştir. Deney süresine, düzeneğin kararlı duruma ulaştığı zaman dilimi, sıcak ve soğuk taraftaki yüzey sıcaklık farkının sabitlendiği süreç esas alınarak karar verilmiştir. Mevcut çalışma duvarı ısınmaya başladıktan yaklaşık 17824 s sonra kararlı hale gelmiştir. Bu süre içerisinde duvar yüzeyinde ısınma artışı devam etmiştir. Isıl yayınlılık hesap değerini (α) belirlemek için ise ısınma sürecindeki veriler kullanılmıştır.



Şekil 4.8. Mevcut yapı duvarının deney süresince zamana karşı duvarın sıcak ve soğuk tarafındaki ortam ve yüzey sıcaklığındaki değişimi gösteren grafik.

Çalışma duvarlarının soğuk taraf yüzey sıcaklıkları termal kamera ile takip edilmiş; ısınmanın başlaması ile birlikte alınan ilk yüzey sıcaklıkları ile kararlı durumu temsil eden son yüzey sıcaklıkları arasındaki sayısal farkı gösteren ısı görüntüleri oluşturulmuştur.

Mevcut duvara ait ilk ve son ısı görüntüleri ile duvar yüzeyindeki sıcaklık artışını sayısal olarak ifade eden sıcaklık farkı görüntüleri Resim 4.4’de verilmiştir.



Resim 4.4. Mevcut yapı duvarına ait ısı görüntüleri: duvarın çalışma kapsamında incelenen alanının görünüşü (sol üstte), radyatör ile arka taraftan ısıtılmaya başlanan mevcut duvardan alınan ilk IR görüntü (sol altta), zaman periyodu 19178 s (yaklaşık 5,3 saat) ısıtma sürecindeki son IR görüntü (sağ altta), sıcak tarafın ortam sıcaklığı 43,6 °C ile bağıl nemi % 14,24 ve soğuk tarafın ortam sıcaklığı 17,69 °C ile bağıl nemi % 46 ilk IR görüntü ile son IR görüntü arasındaki fark (sağ üstte).

Elde edilen sıcak ortam (T_{a1})- soğuk ortam (T_{a2}) sıcaklık verileri, duvarın kalınlığı (d) ve TS 825 standartından alınan ısı iletkenlik hesap (λ_{Teorik}) değeri kullanılarak TS 825’ de tariflenen standart hesaplama yöntemi ile elde edilen mevcut tuğla duvarın ısı geçirgenlik (U_{Teorik}) ve ısı direnç ($R_{D\text{Teorik}}$), değerleri Çizelge 4.4’ de verilmiştir. Mevcut duvarda kullanılan delikli tuğla için TS 825’den seçilen ısı iletkenlik hesap değerleri 0,38 W/mK, 0,35 W/mK ve 0,32 W/mK ve kireç-çimento katkılı sıva için ısı iletkenlik hesap değeri 1,0 W/mK’dir. Bu veriler kullanılarak yapılan hesaplamalarda duvarın toplan ısı direnç değeri

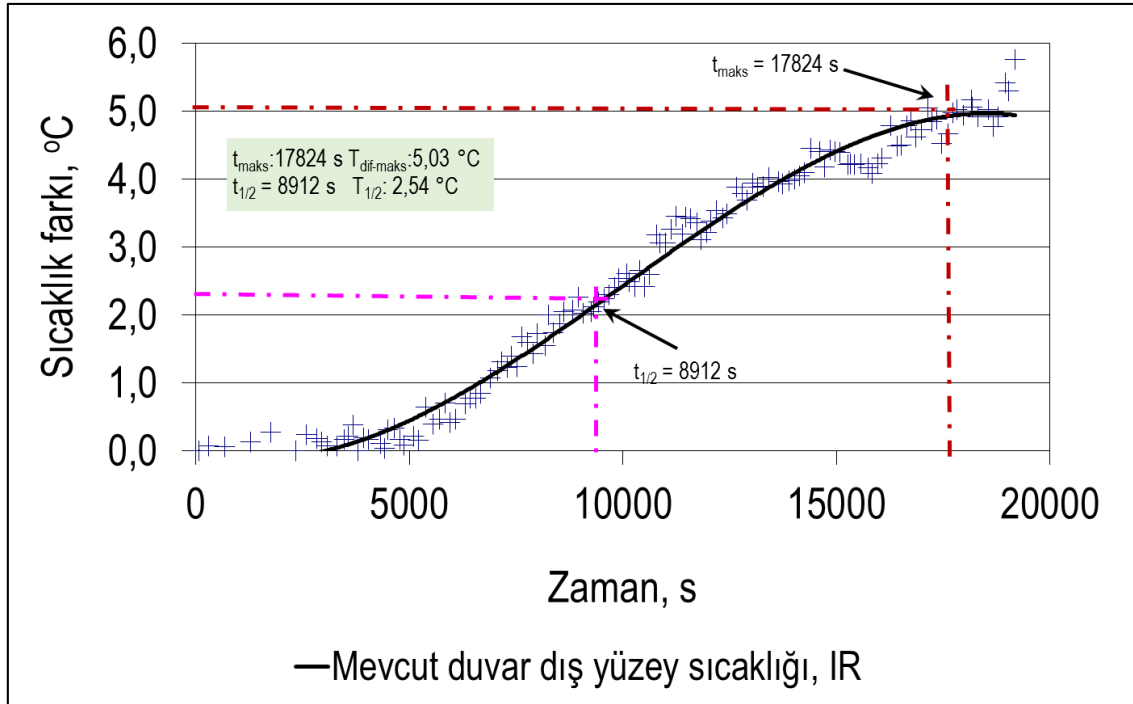
sırasıyla 0,58 m²K/W, 0,60 m²K/W ve 0,64 m²K/W; ısıl geçirgenlik katsayısı 1,74 W/m²K, 1,68 W/m²K ve 1,56 W/m²K olarak hesaplanmıştır (Çizelge 4.6).

Çizelge 4.6. Mevcut tuğla duvar için standartlarda listelenen veriler kullanılarak hesaplanan ısıl geçirimlilik özellikleri

Duvar	Mevcut tuğla duvarın tanımı	Kalınlık	Isıl iletkenlik hesap değeri**			Duvarın toplam ısıl direnç değeri	Duvarın toplam ısıl geçirgenlik katsayısı
		d cm	λ_{Tula} W/mK	$\lambda_{\text{sıva}}$ W/mK	λ_{Duvar} W/mK	$R_{D\text{Teorik}}$ m ² K/W	$U_{D\text{Teorik}}$ W/m ² K
MTD.1	İki yüzeyi 2.5cm kalınlığında kireç-çimento sıva kaplı, 13.5cm kalınlığında delikli tuğla ile çimentolu harç örülmüş duvar	18,5*	0,38	1,0	0,32	0,58	1,74
MTD.2		18,5*	0,35	1,0	0,31	0,60	1,68
MTD.3		18,5*	0,32	1,0	0,29	0,64	1,56

* Tuğla, sıva ve boyanın toplam kalınlığıdır. **: TS 825 (2008)'de verilen değerden alınmıştır

Çalışılan mevcut duvar örneğin ısıl yayınlılık değeri IRT-HB yöntemi ile geliştirilen deney düzeneğinden elde edilen ısınma sürecindeki veriler kullanılarak belirlenmiştir. Bu nedenle mevcut duvar örneği için Şekil 4.9' da gösterilen ısınma süreci grafiği oluşturulmuştur. Bu grafikte mevcut duvar için elde edilen en yüksek yüzey sıcaklığı (T_{maks}) 21,51 °C, bu sıcaklığa ulaşılıncaya kadar geçen süreç (t_{maks}) 17824 s, bu süreçte tuğla duvardaki yüzey sıcaklık artışı $T_{\text{DIF-MAKS}}$ 5,03 °C, bu sıcaklık farkının yarısına ulaşılan süreç ($t_{1/2}$) 8912 s'dir (Şekil 4.9). Bu veriler Eş. 3.16 verilen formülde kullanılarak mevcut tuğla duvarın ısıl yayınlılık değeri ($\alpha_{\text{IRT-HB}}$) bulunmuştur (Çizelge 4.7).



Şekil 4.9. Mevcut çalışma duvarının zamana karşı soğuk tarafındaki yüzey sıcaklık değişimini gösteren grafik

Mevcut tuğla duvarın (MTD) ısı yayınlılık değeri standart hesaplama yöntemi ile de elde edilmiştir. Standart hesaplama yönteminde mevcut yapı duvarının ısı yayınlılık hesap değeri Eş. 3.9’da verilen standart formül kullanılarak elde edilmiştir. Bu çalışmada kullanılan mevcut duvara ait malzeme özellikleri bilinmediği için düşey delikli tuğla duvarlara ait ısı iletkenlik hesap değeri ve yoğunluk verileri TS 825 standartından, özgül ısı değeri ise literatürde verileri kullanılarak “ α_{Teorik} ” tahmini olarak belirlenmiştir. Kullanılan tuğlanın termofiziksel özellikleri tam olarak bilinmediği için günümüzde yaygın olarak kullanıldığı düşünülen üç farklı yoğunluğa sahip tuğlanın ve kireç-çimento harçlı sıvanın TS 825 (2008) standartından alınan ısı iletkenlik hesap değeri ile duvarın ısı geçirimsizlik katsayısı hesaplanış bu değer üzerinden dolaylı olarak duvara ait ısı iletkenlik hesap değerleri belirlenmiştir. Ayrıca literatürde tuğlalar için verilen iki farklı tür 900 J/kgK (Engineering tool box, 2019) ve 1000 J/kgK (TS 1745 (2004); Habib, 2017; Engineering tool box, 2019) özgül ısı verisine rastlanmaktadır. Duvar için elde edilen ısı iletkenlik hesap değerleri bu iki farklı özgül ısı verisi ve yoğunluklar ile bir arada kullanılmış ve duvarın teorik ısı yayınlılık değeri “ α_{Teorik} ” hesaplanmıştır. Belirlenen bu α_{Teorik} değeri literatürde verilen ısı yayınlılık değeri ($\alpha_{\text{literatür}}$) ile de karşılaştırılmıştır. Elde edilen bulgular Çizelge 4.7’de verilmiştir. Burada mevcut duvar için farklı ısı iletkenlik hesap değeri, özgül ısı ve yoğunluk verileri kullanılarak standart hesaplama yöntemiyle elde edilen teorik ısı

yayınırılık (α_{Teorik}) verileri $4,27 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ - $5,85 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ aralığında bulunmuştur. Teorik ısı yayınırılık değerlerinin ortalaması $5,03 \times 10^{-7} \pm 0,56 \times 10^{-7}$ olarak hesaplanmıştır. Literatürde tuğla (T) için verilen ısı yayınırılık değeri ($\alpha_{\text{T.Literatür}}$) $5,2 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ 'dir (Çengel, 2011:23; Holman, 2002). Mevcut duvar için IRT-HB yöntemiyle elde edilen ısı yayınırılık hesap değeri ($\alpha_{\text{IRT-HB}}$) ise $5,33 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ dir. Bu veriler bir arada değerlendirildiğinde sonuçların birbirine yakın çıktığı anlaşılmaktadır. Bu sonuca göre yapı kesiti hakkında bilgiye ihtiyaç duyulmadan ve dolayısıyla termofiziksel özelliklerin belirlenmesine gerek kalmadan yapı duvarlarının ısı yayınırılık değerinin IRT-HB yöntemiyle pratik olarak belirlenebileceği ortaya çıkmıştır.

Çizelge 4.7. Mevcut tuğla duvarın IRT-HB ile ölçülen ($\alpha_{\text{MTD,IRT-HB}}$), standartlarda yer alan ısı veriler ile teorik olarak hesaplanan ($\alpha_{\text{MTD,Teorik}}$) ve literatürde tuğla malzeme için verilmiş olan ($\alpha_{\text{T.Literatür}}$) ısı yayınırılık değerleri

Duvar Kodları	Termofiziksel Özellikler					
	α			$\lambda^{(2)}$ (W/mK)	C (J/kgK)	$\rho^{(5)}$ (kg/m ³)
MTD	$\alpha_{\text{IRT-HB}}$		$5,33 \times 10^{-7}$	-	-	-
MTD.1a	α_{Teorik}	$4,74 \times 10^{-7}$	$5,03 \times 10^{-7}$ $\pm 0,56 \times 10^{-7}$	0,32	$900^{(3)}$	750
MTD.2a		$5,30 \times 10^{-7}$		0,31	$900^{(3)}$	650
MTD.3a		$5,85 \times 10^{-7}$		0,29	$900^{(3)}$	550
MTD.1b		$4,27 \times 10^{-7}$		0,32	$1000^{(4)}$	750
MTD.2b		$4,77 \times 10^{-7}$		0,31	$1000^{(4)}$	650
MTD.3b		$5,27 \times 10^{-7}$		0,29	$1000^{(4)}$	550
T	$\alpha_{\text{Literatür}}$		$5,2 \times 10^{-7(1)}$	Bulunamadı (N/A)		
(1):Çengel, 2011:23; Holman, 2002			(2): Duvarın hesaplanan ısı iletkenlik hesap değeri			
(3): Engineering tool box, 2019			(4):.TS 1745 (2004); Habib, 2017		(5) TS 825 (2008)	

Burada mevcut yapı duvarınının IRT-HB yöntemi ile yerinde ölçüm alınarak belirlenen ısı yayınırılık değerinin, standart hesaplama yöntemi ve literatür verileri ile oldukça yakın çıktığı görülmüştür. Bu sonuç IRT-HB yönteminin arazi ortamında/yerinde yapı duvarlarının ısı yayınırılık değerini belirlemeye yönelik yapılacak çalışmalar için kullanılabilirliğini artırmaktadır.

4.5. Duvarların Sorunlu-Sorunsuz Bölgelerine Ait Isınma Hızı ve Sıcaklık İndeksi Verileri

Üç farklı ısı geçirimsizlik özelliğine sahip çalışma duvarlarının sorunlu ve sorunsuz bölgeleri, ısınma hızı (R_w) ve sıcaklık indeksi (TI) gibi ısı parametrelerle incelenmiştir. Bunun için çalışılan duvarın soğuk tarafındaki yüzey sıcaklıklarının zamana karşı artışı takip edilmiş ve yüzey sıcaklıkları kararlı hale gelinceye kadar kaydedilmiştir. Her iki süreçte elde edilen veriler ısı parametrelerin belirlenmesinde kullanılmıştır. Buna göre;

1. Çalışılan duvarların soğuk taraf yüzey sıcaklığının zamana karşı artışını gösteren veriler kullanılarak sorunlu ve sorunsuz duvar yüzeylerin:

- ısınma süreci boyunca yüzey sıcaklığındaki artış (ısınma süreci sonunda ulaşılan son yüzey sıcaklığı ile ısınma başlamadan önceki ilk yüzey sıcaklığı arasındaki fark, $\Delta T = T_{\text{SON}} - T_{\text{İLK}}$),
- ısınma hızları (R_w), ve
- sorunlu yüzeylerin ısınma hızlarının referans alınan sorunsuz yüzeyin ısınma hızına oranı ($R_{w\text{-SORUN}} / R_{w\text{-REF}}$) hesaplanmıştır.

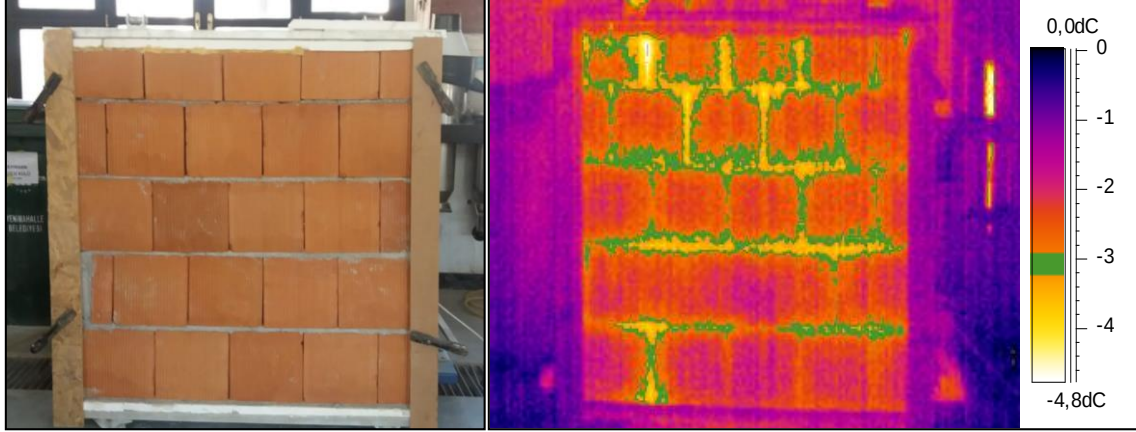
2. Çalışılan duvarlarda ısı sorunlu bölgelerin tespitine yönelik yüzey sıcaklıklarındaki değişim takip edilmiş; bu kapsamda, farklı malzemeden üretilen üç tür duvarın kendilerine özgü TI karakteristikleri ortaya çıkarılmıştır. Bu amaçla çalışılan duvarların sorunsuz bölgelerinin ve özellikle derz bölgelerde tespit edilen ısı sorunların:

- sıcaklık indeksi (TI) karakteristikleri
- soğuk taraf yüzey sıcaklık verileri (T_{so})
- referans alana göre yüzey sıcaklık farklılıkları (ΔT_{sorun}) ile birlikte değerlendirilmiştir.

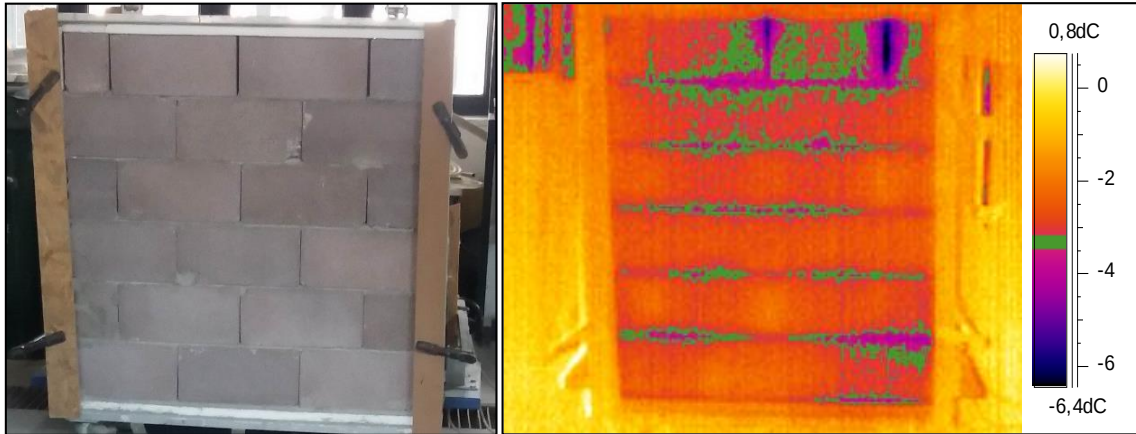
Böylece duvarda ısı sorunlar olan bölgelerin (derzler) TI, T_{so} ve ΔT_{sorun} gibi ısı karakteristikleri belirlenmiş; duvarın sorunsuz bölgesinin ısı özellikleriyle ilişkilendirilmiştir.

Çalışmada incelenen İD, BD ve GD kodlu kagir duvarlardaki sorunlu-sorunsuz bölgeler ve bu bölgelerin yüzey sıcaklıklarındaki artış, sırasıyla Şekil 4.10, Şekil 4.11 ve Şekil 4.12’de gösterilmiştir. Bu resimlerde, yüzey sıcaklık dağılımındaki artışı gösteren ısı görüntüleri, sorunlu-sorunsuz bölgeye ait karakteristik ısınma davranışını göstermektedir. Isınmadaki artışın fazla olduğu yerler, ısı geçirimsizliğin fazla olduğu (ısı direncin az olduğu) bölgeleri işaret etmektedir. Bu çalışma duvarlarında derzli bölgelerin ısı direncinin kagir duvar dolgu

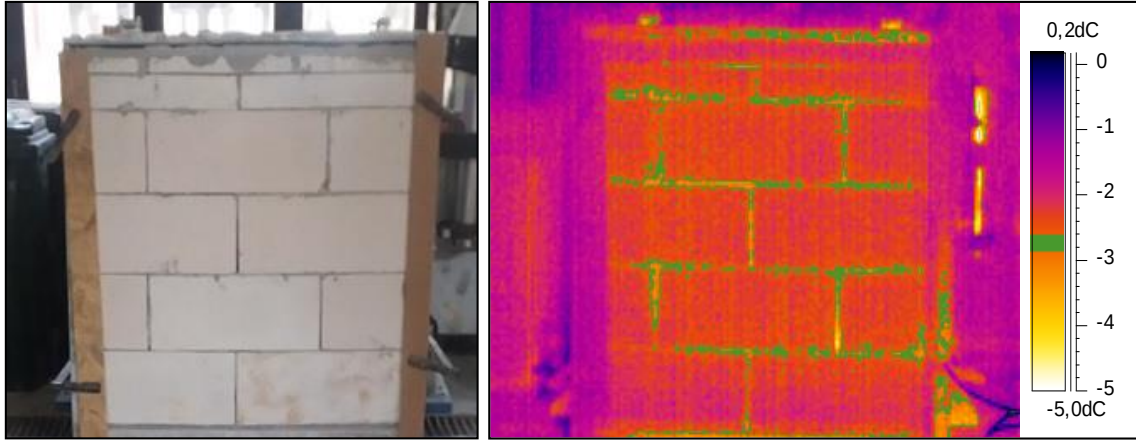
birimlerine göre daha düşük olduğu görülmektedir. Özellikler harçlı derzli bölgelerin ısı köprüsü olarak çalışması duvarların ısıl performansını düşürdüğü görülmektedir.



Şekil 4.10. İD kodlu izo tuğla duvardaki derzli (sorunlu)-kagir birim (sorunsuz) bölgeler ve bu bölgelerin yüzey sıcaklıklarındaki artışı gösteren ısıl görüntü.



Şekil 4.11. BD kodlu bims blokduvardaki derzli (sorunlu)-kagir birim (sorunsuz) bölgeler ve bu bölgelerin yüzey sıcaklıklarındaki artışı gösteren ısıl görüntü.

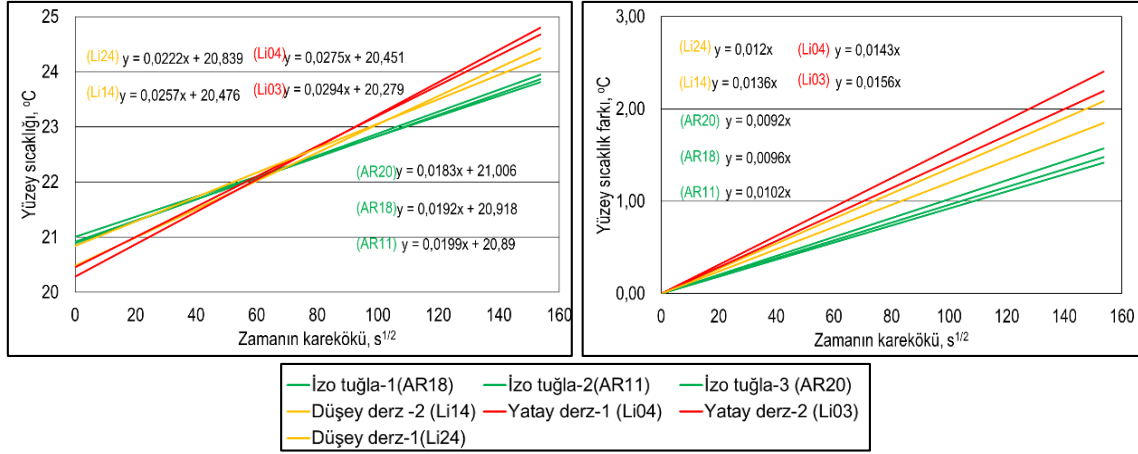


Şekil 4.12. GD kodlu gaz beton duvardaki derzli (sorunlu)-kagir birim (sorunsuz) bölgeler ve bu bölgelerin yüzey sıcaklıklarındaki artışı gösteren ısı görüntü.

Isıl görüntülerden elde edilen verilerle her üç duvar örneğine ait ısınma hızı grafikleri oluşturulmuştur (Şekil 4.13, Şekil 4.14, Şekil 4.15). Bu ısınma hızı grafiklerinde duvarların yüzeydeki sıcaklık artışı gösteren ısı görüntüler, duvarı oluşturan birleşim elemanları düşey derz, yatay derz ve kagir duvar dolgu elemanı (izo tuğla, bims blokve gaz beton) üzerindeki yüzey sıcaklık artışı göstermektedir. Isınma hızı grafiklerinden elde edilen veriler sırasıyla İzo tuğla, Bims blokve gaz beton duvar için aşağıda açıklanmıştır.

– İD kodlu izo tuğla duvarın ısınma hızı özellikleri şöyledir:

İzo tuğla duvar alanında, tuğla yüzeylerin ısınma hızları $0,0183 \text{ }^{\circ}\text{C s}^{-1/2}$ ile $0,0199 \text{ }^{\circ}\text{C s}^{-1/2}$ arasında, sıcaklık farkları $1,98 \text{ }^{\circ}\text{C}$ - $2,21 \text{ }^{\circ}\text{C}$ arasında ve referans ısınma hızına göre oranları da 1,00 ile 1,087 arasında bulunmuştur (Çizelge 4.8). İzo tuğla duvarda bulunan düşey derzin ısınma hızı $0,0222 \text{ }^{\circ}\text{C s}^{-1/2}$ - $0,0257 \text{ }^{\circ}\text{C s}^{-1/2}$ arasında olup sıcaklık farkı $2,51 \text{ }^{\circ}\text{C}$ - $2,84 \text{ }^{\circ}\text{C}$, referans ısınma hızına göre oranı da 1,213 ile 1,404 bulunmuştur (Çizelge 4.8). Yine aynı duvarda bulunan yatay derzlerin ısınma hızı $0,0275 \text{ }^{\circ}\text{C s}^{-1/2}$ - $0,0294 \text{ }^{\circ}\text{C s}^{-1/2}$ arasında olup sıcaklık farkları $2,94 \text{ }^{\circ}\text{C}$ - $3,14 \text{ }^{\circ}\text{C}$ arasında ve referans ısınma hızına göre oranı da 1,503-1,607 arasında bulunmuştur (Çizelge 4.8). Bu verilere göre izo tuğla ile yapılan duvarda derzlerin ısınma hızı tuğlalara göre fazla çıkmıştır. Düşey derzin yatay derze göre ısınma hızı daha düşük çıkmıştır. Düşey derzde birleşim elemanı olarak lamba zıvana geçme kullanılması ısınma hızını harçlı derze oranda düşürmüştür. Yatay derzlerde birleşim elemanı olarak kullanılan harcın tuğla deliklerine dolmasından dolayı ısınma hızında artış gözlenmiştir. Elde edilen bu sonuç literatürde de benzer bulunmuştur (Koçkar 2012).



Şekil 4.13. İD kodlu duvarın derzler ile tuğla yüzeylerde, zamana karşı ısınmadaki artışı gösteren grafikleri

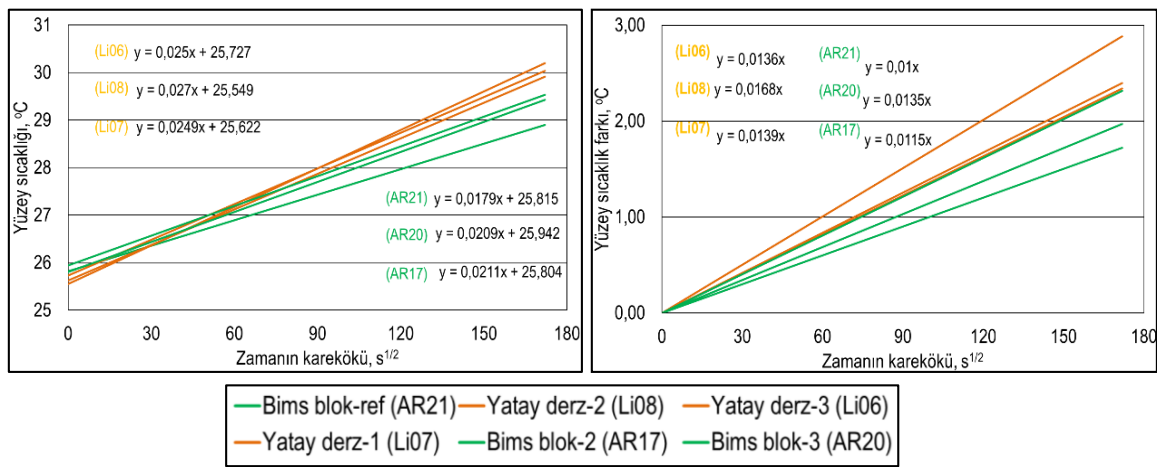
Çizelge 4.8. İD kodlu izo tuğla duvarın ısınma hızı karakteristikleri: ısınma süreci boyunca yüzey sıcaklığındaki artış ($\Delta T = T_{\text{SON}} - T_{\text{ILK}}$), çalışılan alanların ısınma hızları ($R_{W-\text{ALAN}}$) ve referans alınan sorunsuz alana göre oranları ($R_{W-\text{SORUN}}/R_{W-\text{REF}}$)

İD kodlu tuğla duvar ($U_{\text{ID}} = 0,74 \text{ W/m}^2\text{K}$, $R_{\text{ID}} = 1,18 \text{ m}^2\text{K/W}$)				
İD kodlu duvarda bulunan tuğla ve derzli bölgelerin analizi				
Çalışılan alan	Alan tanımı	ΔT	$R_{W-\text{ALAN}}$	$\frac{R_{W-\text{ALAN}}}{R_{W-\text{REF}}}$
		°C	°C s ^{1/2}	(birimsiz)
İzo Tuğla-REF (AR20)	R1B3-İzo tuğla yüzey	1,98	0,0183	1,000
İzo Tuğla-1 (AR18)	R1B1- İzo tuğla yüzey	2,05	0,0192	1,049
İzoTuğla-2 (AR11)	R2B3- İzo tuğla yüzey	2,21	0,0199	1,087
Düşey derz-1 (Li24)	R1B4&R1B5 arası düşey derz	2,51	0,0222	1,213
Düşey derz-2 (Li14)	R3B2&R3B3 arası düşey derz	2,84	0,0257	1,404
Yatay derz-1 (Li04)	R1&R2 arası yatay derz	2,94	0,0275	1,503
Yatay derz-2 (Li03)	R2&R3 arası yatay derz	3,14	0,0294	1,607

– BD kodlu bims blokduvarın ısınma hızı özellikleri şöyledir:

Bims blokduvar alanında, kagir kagırlarda yüzeylerin ısınma hızları $0,0179 \text{ } ^\circ\text{C s}^{-1/2}$ ile $0,0211 \text{ } ^\circ\text{C s}^{-1/2}$ arasında, sıcaklık farkları $1,82 \text{ } ^\circ\text{C}$ - $2,26 \text{ } ^\circ\text{C}$ arasında ve referans ısınma hızına göre oranları da 1,00 ile 1,179 arasında bulunmuştur (Çizelge 4.9). Bims blokduvarda bulunan yatay derzlerin ısınma hızı $0,025 \text{ } ^\circ\text{C s}^{-1/2}$ - $0,027 \text{ } ^\circ\text{C s}^{-1/2}$ arasında olup sıcaklık farkı $2,75 \text{ } ^\circ\text{C}$ -

3,08 °C referans ısınma hızına göre oranı da 1,391-1,508 arasında bulunmuştur (Çizelge 4.9). Aynı duvarda bulunan düşey derzler lamba zıvana geçme olarak birleştirildikleri için ısı görüntülerde bims blokile aynı görüntüyü vermişlerdir yani ısı görüntülerde düşey derzler fark edilememiştir. Bu nedenle düşey derzlerin ısınma hızları bims kagırlarla benzerdir. Elde edilen verilere göre lamba zıvana geçme birleşime sahip düşey derz bims blok için ısı köprüsü oluşturmamıştır. Bims blokile yapılan duvarda yatay derzlerin ısınma hızı bims kagırlara göre fazla çıkmıştır. Bu durumun yatay derzlerde birleşim elemanı olarak kullanılan harcın düşey deliklere dolmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.



Şekil 4.14. BD kodlu duvarın derzler ile kagir bims blokyüzeylerde, zamana karşı ısınmadaki artışı gösteren grafikleri

Çizelge 4.9. BD kodlu bims blokduvarın ısınma hızı karakteristikleri: ısınma süreci boyunca yüzey sıcaklığındaki artış ($\Delta T = T_{SON} - T_{İLK}$), çalışılan alanların ısınma hızları (R_{W-ALAN}) ve referans alınan sorunsuz alana göre oranları ($R_{W-SORUN}/R_{W-REF}$)

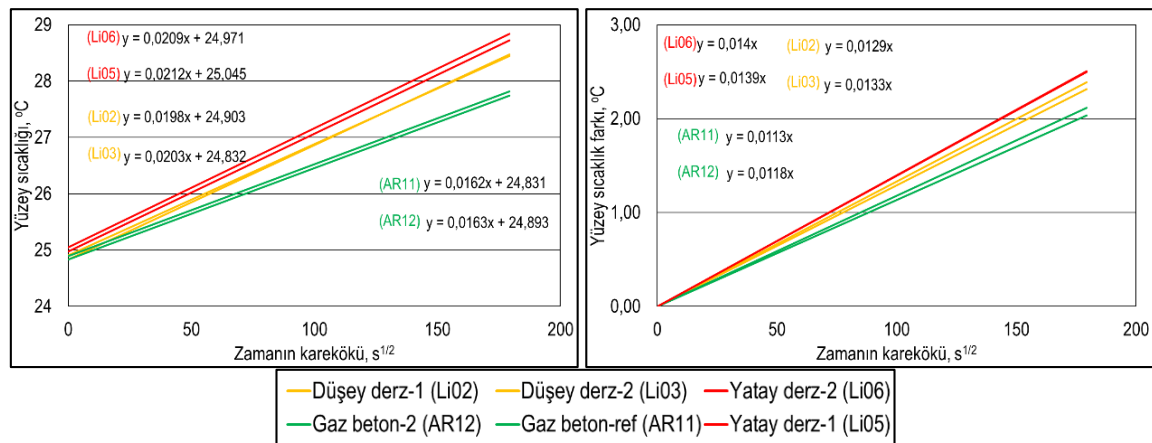
BD kodlu bims blokduvar ($U_{BD} = 0,84 \text{ W/m}^2\text{K}$, $R_{BD} = 1,02 \text{ m}^2\text{K/W}$)					
BD kodlu duvarda bulunan bims blokmalzeme ve derzli bölgelerin analizi					
Çalışılan alan	Alan tanımı	ΔT	R_{W-ALAN}	$\frac{R_{W-ALAN}}{R_{W-REF}}$	
		°C	°C s ^{1/2}	(birimsiz)	
Bims kagir-1 REF (AR21)	R1B2-Bims blokyüzey	1,82	0,0179	1,000	
Bims kagir-2 (AR17)	R1B1- Bims blokyüzey	2,13	0,0209	1,168	
Bims kagir-2 (AR20)	R2B2 – Bims blokyüzey	2,26	0,0211	1,179	

Çizelge 4.9.(devam) BD kodlu bims blokduvarın ısınma hızı karakteristikleri: ısınma süreci boyunca yüzey sıcaklığındaki artış ($\Delta T = T_{SON} - T_{ILK}$), çalışılan alanların ısınma hızları (R_{W-ALAN}) ve referans alınan sorunsuz alana göre oranları ($R_{W-SORUN}/R_{W-REF}$)

Yatay derz-1 (Li07)	R2&R3 arası yatay derz	2,75	0,0249	1,391
Yatay derz-3 (Li06)	R3&R4 arası yatay derz	2,78	0,025	1,397
Yatay derz-2 (Li08)	R1&R2 arası yatay derz	3,08	0,027	1,508

– GD kodlu gaz beton duvarın ısınma hızı özellikleri şöyledir:

Gaz beton duvar alanında, gaz beton yüzeylerin ısınma hızları $0,0162 \text{ } ^\circ\text{C s}^{-1/2}$ ile $0,0163 \text{ } ^\circ\text{C s}^{-1/2}$ arasında, sıcaklık farkları $1,96 \text{ } ^\circ\text{C}$ - $1,98 \text{ } ^\circ\text{C}$ arasında ve referans ısınma hızına göre oranları da 1,00 ile 1,006 arasında bulunmuştur (Çizelge 4.10). Gaz beton duvardaki düşey derzin ısınma hızı $0,0198 \text{ } ^\circ\text{C s}^{-1/2}$ - $0,0203 \text{ } ^\circ\text{C s}^{-1/2}$ arasında olup sıcaklık farkı $2,25 \text{ } ^\circ\text{C}$ - $2,29 \text{ } ^\circ\text{C}$ arasında ve referans ısınma hızına göre oranı da 1,222-1,253 arasında bulunmuştur (Çizelge 4.10). Yine aynı duvarda bulunan yatay derzlerin ısınma hızı $0,0209 \text{ } ^\circ\text{C s}^{-1/2}$ - $0,0212 \text{ } ^\circ\text{C s}^{-1/2}$ arasında olup sıcaklık farkları $2,30 \text{ } ^\circ\text{C}$ - $2,31 \text{ } ^\circ\text{C}$ arasında ve referans ısınma hızına göre oranı da 1,290 - 1,309 arasında bulunmuştur (Çizelge 4.10). Bu verilere göre gaz beton ile yapılan duvarda derzlerin ısınma hızı gaz betonlara göre fazla çıkmıştır. Harcın gaz beton duvarda ısınma hızını artırdığı görülmüştür.



Şekil 4.15. GD kodlu duvarın derzler ile gaz beton yüzeylerde, zamana karşı ısınmadaki artış gösteren grafikleri

Çizelge 4.10. GD kodlu gaz beton duvarın ısınma hızı karakteristikleri: ısınma süreci boyunca yüzey sıcaklığındaki artış ($\Delta T = T_{\text{SON}} - T_{\text{İLK}}$), çalışılan alanların ısınma hızları ($R_{\text{W-ALAN}}$) ve referans alınan sorunsuz alana göre oranları ($R_{\text{W-SORUN}}/R_{\text{W-REF}}$)

GD kodlu gaz beton duvar ($U_{\text{GD}} = 0,50 \text{ W/m}^2\text{K}$, $R_{\text{GD}} = 1,84 \text{ m}^2\text{K/W}$)				
GD kodlu duvarda bulunan gaz beton ve derzli bölgelerin analizi				
Çalışılan alan	Alan tanımı	ΔT	$R_{\text{W-ALAN}}$	$\frac{R_{\text{W-ALAN}}}{R_{\text{W-REF}}}$
		$^{\circ}\text{C}$	$^{\circ}\text{C s}^{1/2}$	(birimsiz)
Gaz beton-1 REF (AR11)	R1B1-Gaz beton yüzey	1,96	0,0162	1,000
Gaz beton-2 (AR12)	R1B2- Gaz beton yüzey	1,98	0,0163	1,006
Düşey derz-1 (Li02)	R4B1&R4B2 arası düşey derz	2,25	0,0198	1,222
Düşey derz-2 (Li03)	R4B2&R4B3 arası düşey derz	2,29	0,0203	1,253
Yatay derz-2 (Li06)	R2&R3 arası yatay derz	2,30	0,0209	1,290
Yatay derz-1 (Li05)	R3&R4 arası yatay derz	2,31	0,0212	1,309

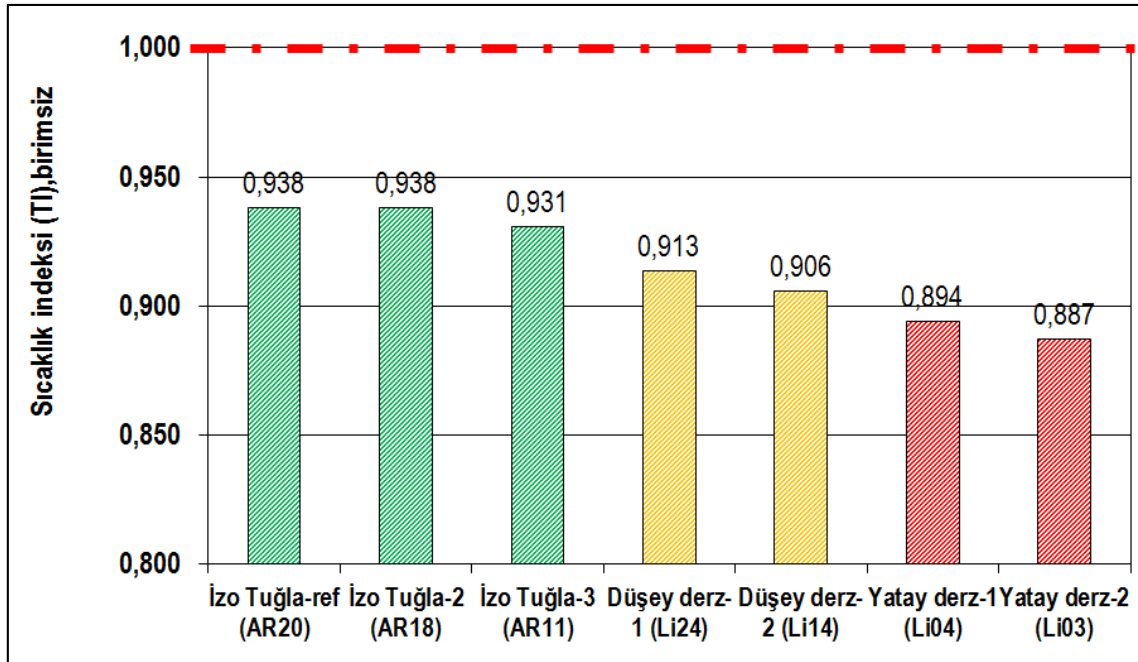
Çalışmamızda elde edilen bir diğer ısı parametre “sıcaklık indeksi (TI)” dir. Isıl görüntülerden elde edilen verilerle her üç duvar örneğine ait sıcaklık indeksi grafikleri oluşturulmuştur (Şekil 4.16, Şekil 4.17, Şekil 4.18). Bu grafikler duvarı oluşturan birleşim elemanları düşey derz, yatay derz ve kagir duvar dolgu elemanı (izo tuğla, bims blokve gaz beton) için sıcaklık indeksi verilerini göstermektedir. Duvarlarda sorunlu ve sorunsuz bölgelerin soğuk taraf yüzey sıcaklık verileri (T_{so}), sıcaklık indeksleri (TI) ve referans alınan sorunsuz tuğla yüzey ile sorunlu yüzey arasındaki sıcaklık farkları ($\Delta T_{\text{SORUN}} = T_{\text{SORUN}} - T_{\text{REF}}$) belirlenmiştir.

Sıcaklık indeksi grafiklerinden elde edilen veriler sırasıyla izo tuğla, bims blokve gaz beton duvar için aşağıda açıklanmıştır.

– İD kodlu izo tuğla duvarın sıcaklık indeksi özellikleri şöyledir:

İD kodlu izo tuğla ile inşa edilen duvarda sorunsuz/sağlam tuğla ve derz yüzeylere ait soğuk taraf yüzey sıcaklık verileri, sıcaklık indeksleri (Şekil 4.16) ve referans alana göre bu tuğlaların yüzey sıcaklıkları farkı Çizelge 4.11’de verilmiştir. Sorunsuz/ referans tuğla yüzeylerin sıcaklık indeksleri 0,938 ile 0,931 arasında, soğuk taraf yüzey sıcaklık değerleri $24,17^{\circ}\text{C}$ ile $24,34^{\circ}\text{C}$ arasında ve referans alana göre bu tuğlaların yüzey sıcaklıkları farkı

0,00 °C ile 0,17 °C arasında bulunmuştur (Çizelge 4.11). Aynı duvarda bulunan lamba zıvana geçme düşey derzin sıcaklık indeksi 0,913-0,916 arasında olup, soğuk taraf yüzey sıcaklığı 24,73°C - 24,90°C arasında ve referans alana göre bu derzin yüzey sıcaklık farkı ise 0,56°C- 0,73°C arasında bulunmuştur (Çizelge 4.11). Yine aynı duvarda bulunan yatay derzin sıcaklık indeksi 0,894-0,897 arasında olup, soğuk taraf yüzey sıcaklık değeri 25,17 °C - 25,32 °C arasında ve referans alana göre bu derzin yüzey sıcaklıkları farkı ise 1,00 °C - 1,15 °C arasında bulunmuştur (Çizelge 4.11). Elde edilen bu verilerden de anlaşılacağı üzere lamba zıvana geçme derzin ısı performansını referans tuğlalara yakın ancak harçlı yatay derze göre daha iyi çıkmıştır (Çizelge 4.11).



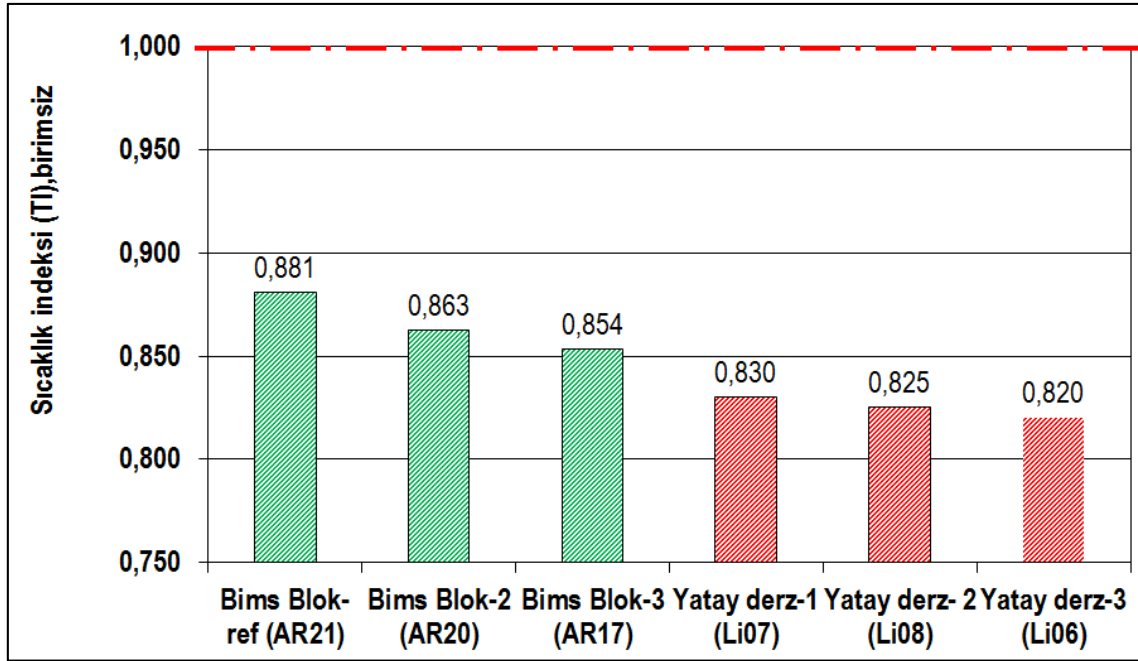
Şekil 4.16. İD kodlu duvarın sağlam/sorunsuz bölgede bulunan derzler ile tuğla yüzeylerde sıcaklık indeksini gösteren grafikler

Çizelge 4.11. İD kodlu izo tuğla duvarın analizi – Soğuk taraf yüzey sıcaklıkları (T_{so}), sıcaklık indeksleri (TI) ve çalışılan alan ile referans alan arasındaki sıcaklık farkı (ΔT_{SORUN})

İD kodlu tuğla duvar ($U_{ID} = 0,74 \text{ W/m}^2\text{K}$, $R_{ID} = 1,18 \text{ m}^2\text{K/ W}$)				
İD kodlu duvarda bulunan tuğla ve derzli bölgelerin analizi				
Çalışılan alan	Alan tanımı	T_{so}	TI	ΔT_{SORUN}
		°C	(birimsiz)	°C
İzo Tuğla-1 REF (AR20)	R1B3-İzo tuğla yüzey	24,17	0,938	0,00
İzo Tuğla-2 (AR18)	R1B1- İzo tuğla yüzey	24,17	0,938	0,00
İzoTuğla-3 (AR11)	R2B3- İzo tuğla yüzey	24,34	0,931	0,17
Düşey derz-1 (Li24)	R1B4&R1B5 arası düşey derz	24,73	0,913	0,56
Düşey derz-2 (Li14)	R3B2&R3B3 arası düşey derz	24,90	0,906	0,73
Yatay derz-1 (Li04)	R1&R2 arası yatay derz	25,17	0,894	1,00
Yatay derz-2 (Li03)	R2&R3 arası yatay derz	25,32	0,887	1,15

– BD kodlu bims blokduvarın sıcaklık indeksi özellikleri şöyledir:

BD kodlu bims blokile inşa edilen duvarda sorunsuz/sağlam bims blokve derz yüzeylere ait soğuk taraf yüzey sıcaklık verileri, sıcaklık indeksleri (Şekil 4.17) ve referans alana göre bu tuğlaların yüzey sıcaklıkları farkı Çizelge 4.12’de verilmiştir. Sorunsuz/ referans bims blokyüzeylerin sıcaklık indeksleri 0,881 ile 0,854 arasında, soğuk taraf yüzey sıcaklık değerleri 29,31 °C ile 29,82 °C arasında ve referans alana göre bu tuğlaların yüzey sıcaklıkları farkı 0,00°C ile 0,34°C arasında bulunmuştur (Çizelge 4.12). Aynı duvarda bulunan lamba zıvana geçme düşey derzin sıcaklık indeksi bims blokile benzer bulunmuştur. Yine aynı duvarda bulunan yatay derzin sıcaklık indeksi 0,830-0,820 arasında olup, soğuk taraf yüzey sıcaklık değeri 30,25 °C - 30,44 °C arasında ve referans alana göre bu derzin yüzey sıcaklıkları farkı ise 0,94 °C – 1,13 °C arasında bulunmuştur (Çizelge 4.12). Elde edilen bu verilerden de anlaşılacağı üzere lamba zıvana geçme düşey derzin ısıl performansı referans bims kagırla benzer ancak harçlı yatay derze göre daha iyi çıkmıştır (Çizelge 4.11).



Şekil 4.17. BD kodlu duvarın sağlam/sorunsuz bölgede bulunan derzler ile bims blokyüzeylerde sıcaklık indeksini gösteren grafikler

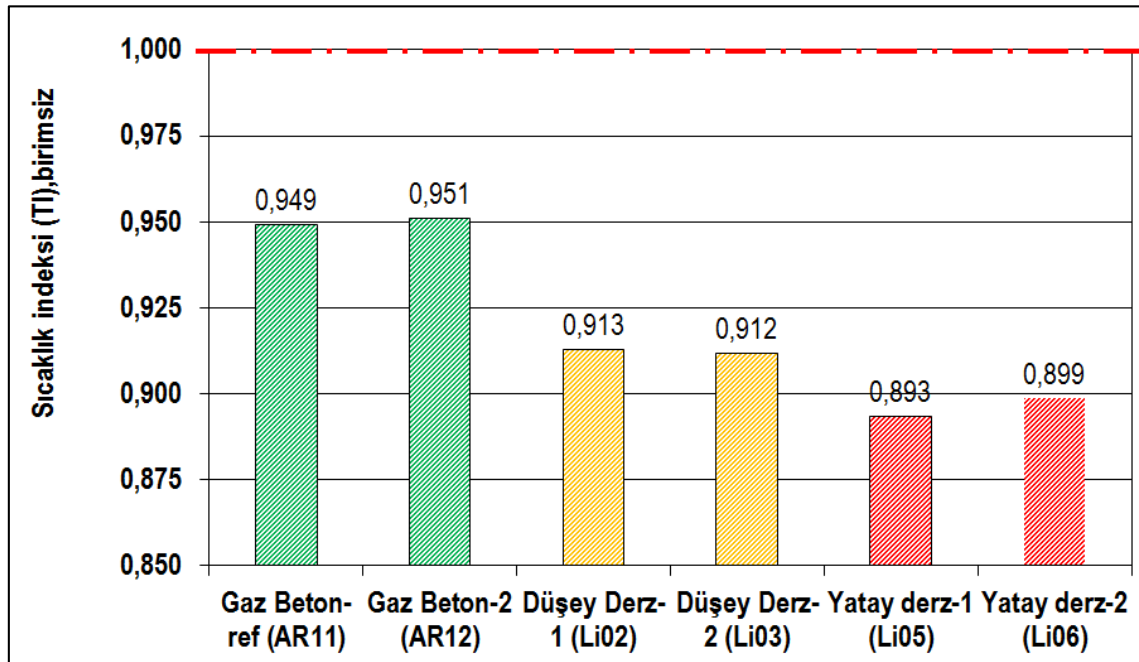
Çizelge 4.12. BD kodlu bims blokduvarın analizi – Soğuk taraf yüzey sıcaklıkları (T_{so}), sıcaklık indeksleri (TI) ve çalışılan alan ile referans alan arasındaki sıcaklık farkı (ΔT_{SORUN})

BD kodlu bims blokduvar ($U_{BD} = 0,84 \text{ W/m}^2\text{K}$, $R_{BD} = 1,02 \text{ m}^2\text{K/W}$)					
BD kodlu duvarda bulunan bims blokmalzeme ve derzli bölgelerin analizi					
Çalışılan alan	Alan tanımı	T_{so}	TI	ΔT_{SORUN}	
		$^{\circ}\text{C}$	(birimsiz)	$^{\circ}\text{C}$	
Bims kagir-1 REF (AR21)	R1B2-Bims blokyüzey	29,31	0,881	0,00	
Bims kagir-2 (AR20)	R1B1- Bims blokyüzey	29,65	0,863	0,34	
Bims kagir-2 (AR17)	R2B2 – Bims blokyüzey	29,82	0,854	0,51	
Yatay derz-1 (Li07)	R2&R3 arası yatay derz	30,25	0,830	0,94	
Yatay derz-2 (Li08)	R1&R2 arası yatay derz	30,35	0,825	1,04	
Yatay derz-3 (Li06)	R3&R4 arası yatay derz	30,44	0,820	1,13	

– GD kodlu gaz beton duvarın sıcaklık indeksi özellikleri şöyledir:

GD kodlu gaz beton ile inşa edilen duvarda sorunsuz/sağlam gaz beton ve derz yüzeylere ait soğuk taraf yüzey sıcaklık verileri, sıcaklık indeksleri (Şekil 4.18) ve referans alana göre bu

tuğlaların yüzey sıcaklıkları farkı Çizelge 4.13’de verilmiştir.. Sorunsuz/ referans gaz beton yüzeylerin sıcaklık indeksleri 0,951 ile 0,949 arasında, soğuk taraf yüzey sıcaklık değerleri 27,63 °C ile 27,66 °C arasında ve referans alana göre bu tuğlaların yüzey sıcaklıkları farkı 0,00 °C ile 0,03 °C arasında bulunmuştur (Çizelge 4.13). Aynı duvarda bulunan düşey derzin sıcaklık indeksi 0,913-0,912 arasında olup, soğuk taraf yüzey sıcaklığı 28,35 °C – 28,37 °C arasında ve referans alana göre bu derzin yüzey sıcaklık farkı ise 0,14°C - 0,16 °C arasında bulunmuştur (Çizelge 4.13). Yine duvarda bulunan yatay derzin sıcaklık indeksi 0,899-0,893 arasında olup, soğuk taraf yüzey sıcaklık değeri 28,62 °C - 28,72 °C arasında ve referans alana göre bu derzin yüzey sıcaklıkları farkı ise 0,41 °C - 0,51 °C bulunmuştur (Çizelge 4.13). Elde edilen bu verilerden de anlaşılacağı üzere düşey derzin ısıl performansı referans gaz betona yakın ancak yatay derze göre daha iyi çıkmıştır (Çizelge 4.13).



Şekil 4.18. GD kodlu duvarın sağlam/sorunsuz bölgede bulunan derzler ile gaz beton yüzeylerde sıcaklık indeksini gösteren grafikler

Çizelge 4.13. GD kodlu gaz beton duvarın analizi – Soğuk taraf yüzey sıcaklıkları (T_{so}), sıcaklık indeksleri (TI) ve çalışılan alan ile referans alan arasındaki sıcaklık farkı (ΔT_{SORUN})

GD kodlu gaz beton duvar ($U_{GD}= 0,50 \text{ W/m}^2\text{K}$, $R_{GD} = 1,84 \text{ m}^2\text{K/ W}$)				
GD kodlu duvarda bulunan gaz beton ve derzli bölgelerin analizi				
Çalışılan alan	Alan tanımı	T_{so}	TI	ΔT_{SORUN}
		$^{\circ}\text{C}$	(birimsiz)	$^{\circ}\text{C}$
Gaz beton-1 REF (AR11)	R1B1-Gaz beton yüzey	27,63	0,949	0,00
Gaz beton-2 (AR12)	R1B2- Gaz beton yüzey	27,66	0,951	0,03
Düşey derz-1 (Li02)	R4B1&R4B2 arası düşey derz	28,35	0,913	0,14
Düşey derz-2 (Li03)	R4B2&R4B3 arası düşey derz	28,37	0,912	0,16
Yatay derz-2 (Li06)	R2&R3 arası yatay derz	28,62	0,899	0,41
Yatay derz-1 (Li05)	R3&R4 arası yatay derz	28,72	0,893	0,51

Bu çalışmada hem ısınma hızı verileri hem de sıcaklık indeksi değerleri kagir malzemelere göre derzlerde daha çok ısı köprüsü oluştuğunu göstermiştir. Çalışmada kullanılan duvarların tamamında bu durum tespit edilmiştir. Harçlı derzler ve lamba zıvana geçmeli derzler ısıl performans yönünden farklılıklar saptanmıştır. Harçlı derzlerin ısıl performansı harçsız derzlere göre daha düşük bulunmuştur. Harçlı derzler duvarın toplam ısıl performansına olumsuz yönde etki etmiş ve bu durum duvarda ısı akışını artırmıştır.

5. TARTIŞMA

Çalışmanın bu kısmında elde edilen bulgular bir arada değerlendirilmiş; incelenen duvarların ısıl geçirimsilik özellikleri, IRT-HB deney düzeneğinin ısıl yayımlılık değerini belirlemede ki başarısı ve IRT-HB yönteminin enerji verimliliği ile ilgili çalışma alanlarına sağladığı faydalar ve katkıları alt başlıklarda tartışılmıştır.

5.1. İncelenen Yapı Duvarlarının Isıl Geçirimsilik Özellikleri Bakımından Değerlendirilmesi

Her bir örnek duvarın ısıl geçirimsilik özellikleri üç farklı yöntemle belirlenmiştir. Bu üç yöntem ve ölçülen ısıl geçirimsilik özelliklerinin tanımı aşağıda sıralanmıştır:

- TS 825’de verilen ısıl iletkenlik hesap değerlerinin (λ_{Teorik}) hesaplamalarda kullanılmasıyla elde edilen “*teorik ısıl geçirimsilik*” (U_{Teorik} , R_{Teorik} , λ_{Teorik} , q_{Teorik}) özellikleri;
- ısıl iletkenlik hesap değerinin mahfazalı sıcak kutu yöntemiyle belirlenmesi sonucunda elde edilen “*referans ısıl geçirimsilik*” (U_{Ref} , R_{Ref} , λ_{Ref} , q_{Ref}) özellikleri ve
- kızıl ötesi ısıl görüntüleme (IRT) yöntemi ve sıcak kutu (HB) deney yönteminin birleşik kullanımı ile geliştirilen IRT-HB deney düzeneğinde yapılan çalışmalar sonucu elde edilen “*IRT-HB ısıl geçirimsilik*” ($U_{\text{IRT-HB}}$, $R_{\text{IRT-HB}}$, $\lambda_{\text{IRT-HB}}$, $q_{\text{KIÖG}}$) özellikleridir.

Referans U değerleri, IRT ve sıcak kutunun birarada kullanıldığı yöntemle elde edilen IRT-HB ısıl geçirimsilik değerleri karşılaştırılmış; U değerleri arasındaki fark kullanılarak laboratuvar ortamında kurulmuş olan sıcak kutu düzeneğindeki yanal ısı kayıpları (Φ_Y : yanal ısı akışını, W) tespit edilmiş; U_{Ref} ve $U_{\text{IRT-HB}}$ değerleri denkleştirilerek IRT-HB düzeneği kalibre edilmiştir. Sonuç olarak:

- IRT ve sıcak kutu deney yönteminin birleşik kullanımı ile duvar kesitinden sıcaktan soğuğa ısı geçişinin kararlı durumda takip edilebildiği anlaşılmış;
- ancak ısıl geçirimsilik ile ilgili güvenilir veriler elde edebilmek için düzeneğin kalibre edilmesi gerektiği ortaya çıkmış;
- bu amaçla düzeneğin yanal ısı kayıplarına neden olan sorunların (örneğin, sıcak kutuda mevcut olan hava kaçaklarının veya ısı yalıtım sorunlarının) ortadan kaldırılmasının, diğer bir deyişle yanal ısı akışının (Φ_Y) “0”a eşitlenmesinin;
- ya da düzeneğin, referans U değerleri ile kalibre edilmesinin şart olduğu görülmüştür.

Örnek duvarların referans ısıl geçirimsizlik özellikleri ile teorik olarak hesaplanan ısıl geçirimsizlik özellikleri birbirleriyle karşılaştırılmış ve sonuçlar tartışılmıştır.

Referans ısıl iletkenlik hesap değerleri (λ_{Ref}) izo tuğla için 0,17 W/mK, bims blok için 0,19 W/mK ve gaz beton için 0,11 W/mK'dir. TS 825 (2008) standartında bu kagir malzemeler için verilen teorik ısıl iletkenlik hesap değerlerinin (λ_{Teorik}) ise referans olan ısıl iletkenlik hesap değerlerinden (λ_{Ref}) daha yüksek olduğu görülmektedir (Çizelge 4.4). Kagir malzemelerin ısıl geçirimsizlik özelliklerinin ölçüldüğü mahfazalı sıcak kutu deneyi, %45 bağıl nem ortamında yapılmıştır. Oysaki, TS 825 (2008) standardında verilen λ_{Teorik} değerlerinin, %80 bağıl nem ortamında bulunan örneklerle ait olduğu belirtilmektedir. Elde edilen λ_{Ref} verilerinin λ_{Teorik} değerlerinden düşük olmasının sebebi bu şekilde açıklanabilir.

İzo tuğla ve bims blok malzemelerinin yüksek bağıl nemde ısıl iletkenliklerindeki artış farkedilir düzeydedir. Diğer taraftan, su buharı geçirimsizliği, gözenekliliği ve nem tutma kapasitesi çok yüksek bir malzeme olan gaz betonun, yüksek bağıl nem ortamında tuğla ve bims bloğa nazaran daha fazla nem tutması beklenmekte; dolayısıyla kuru durumuna kıyasla ısıl iletkenliğinin %80 bağıl nem ortamında daha fazla artması beklenmektedir. Son dönemde yapılan bir araştırma, 400 kg/m³ birim hacim ağırlığına sahip gazbetonun %10 bağıl nemde ısıl iletkenlik hesap değerinin (λ) yaklaşık 0,15 W/mK iken bu değer %80 bağıl nemde 0,37 W/mK olduğu; 600 kg/m³ birim hacim ağırlığına sahip gaz betonun %10 bağıl nemde 0,25 W/mK iken bu değer %80 bağıl nemde yaklaşık 0,53 W/mK olduğunu göstermiştir (Jin ve diğerleri, 2016). Oysaki TS 825 standartındaki listede yer alan 400 kg/m³ birim hacim ağırlığına sahip gazbetonun ısıl iletkenlik hesap değerinin 0,13 W/mK olması düşündürücüdür. Başka bir araştırma, EPS kaplı gazbeton dış duvarların yoğuşma sebebiyle nem sorunlarından sıkıntı yaşadığını ve bu duvarların hesaplanandan iki katı kadar daha fazla ısı geçirdiğini ortaya koymuştur (Sayın ve diğerleri, 2015; 2016; Sayın, 2019). Bu duvarlarda, ayrık yerleştirilmiş EPS levhaların birleşim yerlerinde oluşan ısı köprüleri nem oluşumuna sebebiyet vermekte; nefes alma seviyesi çok düşük olan EPS levhalar ile gazbeton yüzeylerin kaplanmış olmasından ötürü bu nem, hapsolmuş nem sorununa dönüşmektedir. Bu sebeple duvarın ısıl geçirgenlik katsayısı artmaktadır. Bu tür çalışmalar, gerçek koşullarda özellikle gözenekli malzemelerin nemli olma ihtimalinin yüksek olduğunu desteklemektedir. TS 825 (2008) listesinde yer alan λ değerlerinin %80 bağıl nem ile dengede olan malzemelere ait olup olmadıkları gözden geçirilip standart listelerinin revize edilmesi gerektiği düşünülmektedir.

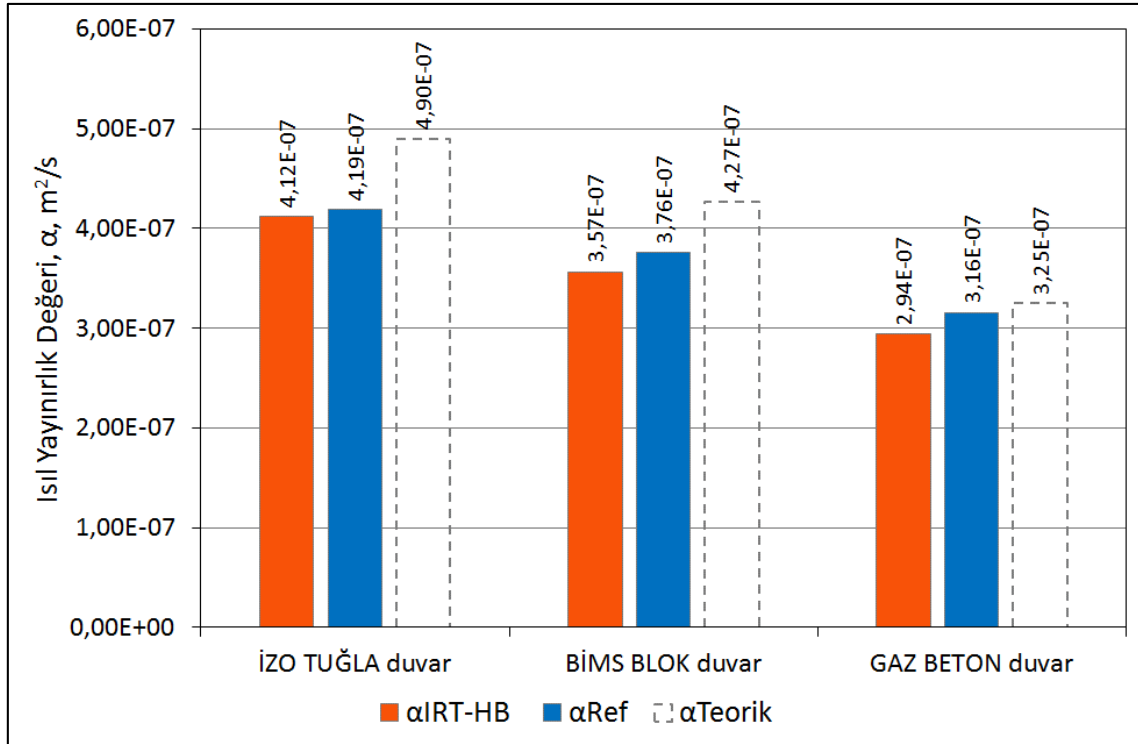
Bu çalışma ile, kagir bir yapı malzemesinin ısıl geçirirmlilik özelliklerini belirlemek için sadece standart veriler kullanılarak yapılan hesaplamaların yeterli olmadığı anlaşılmıştır. Standartlardan elde edilen verilerle yapılan teorik hesaplamalar yapı duvarının ısıl performansı hakkında gerçek bilgi yerine yaklaşık bilgi vermektedir. Bu nedenle yapıların ısıl geçirirmlilik özelliklerinin doğrudan yapıda kullanılan malzeme özellikleri ve malzemenin bulunduğu ortam koşulları dikkate alınarak belirlenmesi önemli ve gereklidir. Bu çalışmada elde edilen ısıl geçirirmlilik değerleri IRT-HB yöntemiyle elde edilen yüzey sıcaklık verilerinin duvarda oluşan ısı kayıpları engellendiği ya da en aza indirildiği takdirde duvarın gerçek ısıl özelliklerinin tayininde kullanılabileceğini göstermiştir. Sonuç olarak geliştirilmiş IRT-HB deney düzeneğiyle, farklı sıcaklığa sahip ortamların etkisinde olan duvar yüzeylerinin ardışık ısıl görüntüleme ile takibinin, duvardaki ısı akışının ölçülebilir parametrelerle analizinde kullanılabileceği anlaşılmıştır.

5.2. Laboratuvar Ortamında ve Yerinde Duvarların Isıl Yayınlılık Değerini Ölçen IRT-HB Deney Düzeneginin Değerlendirmesi

Her bir örnek duvarın ısıl yayınlılık değeri (α , m²/s) geçirirmlilik özellikleri üç farklı yöntemle belirlenmiştir. Sırasıyla:

- Kagir malzemelerin, referans birim hacim ağırlık (ρ_{Ref}), referans özgül ısı (C_{Ref}) ve referans ısıl iletkenlik hesap değeri (λ_{Ref}) verileri Eş. 3.22 denkleminde kullanılarak “referans ısıl yayınlılık değeri (α_{Ref})” hesaplanmıştır.
- Literatür ve standartlarda aynı nitelikte tanımlı kagir malzemeler için tayin edilmiş birim hacim ağırlık (ρ_{Teorik}), özgül ısı (C_{Teorik}) ve ısıl iletkenlik hesap değeri (λ_{Teorik}) verileri, Eş. 3.21 denkleminde kullanılarak “teorik ısıl yayınlılık değeri (α_{Teorik})” hesaplanmıştır.
- kızıl ötesi ısıl görüntüleme (IRT) yöntemi ve sıcak kutu deney yönteminin birleşik kullanımı ile geliştirilen IRT-HB deney düzeneği ile örnek kagir duvarların ısıl yayınlılık değeri (α_{IRT-HB}) ölçülmüştür.

Elde edilen ısıl yayınlılık değerleri, Şekil 5.1’de özetlenmiştir.



Şekil 5.1. İzo tuğla, bims blok ve gaz beton duvarların üç farklı yöntem ile belirlenmiş ısıl yayınlılık değerleri

İncelenen gaz beton malzemenin literatürde kuru durumdaki hali için tanımlanmış olan termofiziksel özellikleri ile laboratuvar analizleri ile ölçülerek belirlenmiş olan referans termofiziksel özellikleri neredeyse aynıdır. Bu değerlerin denk düşmesi, isabetli bir durumdur; teorik verilerin ve çalışmada esas kabul edilen referans verilerin birbirleriyle uyumluluğunu teyit etmiştir. Bu bakımdan referans veriler ile elde edilen α_{Ref} değerleri ve tez kapsamında geliştirilen IRT-HB deney düzeneği ile ölçülen α_{IRT-HB} değerlerinin birbirleriyle benzer çıkması (Şekil 5.1, tüm örneklerde $\alpha_{Ref} \cong \alpha_{IRT-HB}$), deney düzeneğinin hassas ve doğru ölçüm yapabildiğinin göstergesidir.

Referans veriler ve IRT-HB düzeneği ile ölçülen veriler, %45 bağıl nem ortamındaki malzemenin ve duvarın mevcut durumdaki ısıl özelliklerini temsil etmektedirler. Gaz beton, izo tuğla ve bims blok duvarların α_{Ref} değerleri ile α_{IRT-HB} değerleri birbirlerine benzer bulunmuştur. Farklı malzemelerin, kendilerine özgü referans verileri ile elde edilen α_{Ref} değerleri ve tez kapsamında geliştirilen IRT-HB deney düzeneği ile ölçülen α_{IRT-HB} değerlerinin birbirleriyle benzer çıkması, deney düzeneğinin doğru ölçüm yapabildiğini desteklemiştir.

İzo tuğla ve bims blok malzemelerin teorik ısı iletkenlik verileri, %80 bağıl nem ortamı ile dengeye gelmiş malzemelerin özelliklerini temsil etmektedir (TS 825: 2008). Isıl iletkenliği artan nemli malzemelerin ısıl yayınlırlıklarının artması beklenir. Bu veriler kullanılarak hesaplanan teorik ısıl yayınlırlık değerleri (α_{Teorik}), bizzat ölçülerek elde edilen referans verileri ile hesaplanan ve IRT-HB düzeneği ile ölçülen ısıl yayınlırlık değerlerinden yüksek bulunmuştur (Şekil 5.1, izo tuğla ve bims blok ürünler için $\alpha_{\text{Teorik}} > \alpha_{\text{IRT-HB}}, \alpha_{\text{Ref}}$). Jin ve diğerleri (2016) tarafından 400kg/m^3 birim hacim ağırlığına sahip gaz beton malzemenin ısıl iletkenliğinin %80 bağıl nem ortamında $0,37\text{ W/mK}$ seviyelerine ulaştığı belirtilmiştir. Standartta $0,13\text{W/mK}$ olarak listede yer alan ısıl iletkenlik verileri güncellendiği takdirde, gazbetonun α_{Teorik} değerinde de izotuğla ve bims beton da olduğu gibi, belirgin bir artış beklenmelidir.

IRT-HB deney düzeneğinde yalıtımlı ve mahfazalı sıcak kutu kullanıldığı halde, sıcak kutu ile duvar numunenin birleşim yerlerinden $11,40\text{-}23,52\text{ W}$ aralıkta yanal ısı kayıplarının (Φ_Y) mevcut olduğu tespit edilmiş; bu durumun örnek duvarların U değerlerinin ölçümünde etkili olduğu görülmüş; bu ısı kayıpları Eş.3.23 denklemindeki hesaplamalara dahil edilmiştir. Ancak tespit edilen bu türden ısı kayıplarının, duvarların ısıl yayınlırlık ölçümlerine etki etmediği anlaşılmıştır. Bu durum, IRT-HB deney düzeneğinde esas alınan ölçüm tekniğinin yapı duvarlarında yerinde de uygulanabileceği hakkında bir ipucu vermiştir.

IRT-HB düzeneği, pilot çalışma olarak mevcut bir yapı duvarının ısıl yayınlırlık değerini belirlemek için arazi ortamına uyarlanmıştır. Yerinde ölçüm ile $13,5\text{ cm}$ kalınlığında delikli tuğla ile örülmüş ve iki tarafı kireç-çimento katkılı takviyeli harç ile sıvanmış mevcut yapı duvarının toplan ısıl direnci (R_{duvar}) ve ısıl geçirgenlik katsayısı (U_{duvar}) hesaplanmıştır. Bunun için TS 825 standartında delikli tuğla için verilen üç farklı ısı iletkenlik hesap değeri ($0,38\text{-}0,35\text{-}0,32\text{ W/mK}$) kullanılarak mevcut duvar için üç farklı R_{duvar} hesaplanmıştır. Bu R_{duvar} değerleri kullanılarak dolaylı yoldan mevcut yapı duvarı için üç farklı ısıl iletkenlik hesap değeri belirlenmiştir. Duvar için belirlenen bu ısı iletkenlik hesap değerleri ile birlikte TS 825’de tuğlalar için verilen yoğunluk verileri ve literatürde tuğlalar için verilen farklı (900 ve 1000) özgül ısı değerleri kullanılarak mevcut duvar için teorik ısıl yayınlırlık değeri (α_{Teorik}) hesaplanmıştır. Ortalama $\alpha_{\text{Teorik}} 5,03 \times 10^{-7} \pm 0,56 \times 10^{-7}$ olarak bulunmuştur. Mevcut duvar için IRT-HB yöntemiyle elde edilen ısıl yayınlırlık değeri ($\alpha_{\text{IRT-HB}}$) $5,33 \times 10^{-7}\text{ m}^2/\text{s}$ dir. Bu değer literatürde (Çengel, 2011:23; Holman, 2002) tuğla için verilen ısıl yayınlırlık değeri ($\alpha_{\text{literatür}}$) $5,2 \times 10^{-7}\text{ m}^2/\text{s}$ ile de yakın bulunmuştur. IRT-HB yönteminin laboratuvar ortamında

yapı duvarlarının gerçek ısı yayınlılık değerini belirlemede başarılı bir yöntem olduğu elde edilen sonuçlardan anlaşılmıştır. Elde edilen ilk veriler yapıda ölçüm için geliştirilmiş olan IRT-HB düzeneğinin, yapı duvarlarının yerinde ısı yayınlılık değerlerinin belirlenmesinde umut vadeden bir yöntem olduğunu göstermiştir. Ancak bu ölçüm tekniğinin geliştirilmesi için çaba sarfedilmelidir.

Sonuç olarak:

IRT-HB yöntemiyle belirlenen ısı yayınlılık değerlerinin (α_{IRT-HB}), referans ısı yayınlılık değerlerine ($\alpha_{referans}$) oldukça yakın çıkmaktadır. Bu demektir ki, IRT-HB yöntemi ile duvarların mevcut durumdaki ısı yayınlılık değeri ölçülebilmektedir. Birim hacim ağırlık, ısı iletkenlik hesap değeri ve özgül ısılarının ölçülmesine gerek kalmadan, bir duvarın ya da malzemenin ısı yayınlılık değerinin ölçülebilmesi, özellikle ısı iletkenlik ölçümü için çok pahalı ölçüm teknikleri kullanılmakta olduğundan, önemlidir. Bu çalışma, IRT-HB deney düzeneği, veri toplama ve değerlendirme aşamalarının geliştirilmesi bakımından yol gösterici niteliğindedir. Ayrıca, IRT-HB düzeneğinde esas alınan ölçüm tekniği, yapılarda ölçüm yapabilecek şekilde uyarlanabilecek basitliktedir. Ancak bu deney düzeneğinin standartlaşması ve hem laboratuvar ortamı hem de yapılarda enerji verimliliği ile ilgili çalışmalar kapsamında yaygınlaşması amacıyla ayrıntılı çalışmaların yapılmasına ihtiyaç vardır.

5.3. IRT-HB Deney Düzeneğinin Enerji Verimliliği ile İlgili Çalışmalarda Yararlı Olabildiği Sahalar

Bu çalışma da iki farklı yöntemin birleşik kullanımı ile bir deney düzeneği oluşturulmuştur. IRT yöntemi ve sıcak kutu deney yönteminin birleşik kullanımı (IRT-HB) ile oluşturulan bu yeni yöntemle yapı duvarlarının ısı geçirimsizlik özellikleri (U , R , λ , q ve α) incelenmiştir. Bu çalışmada laboratuvar ortamında kullanılan bu deney düzeneği, aslında iç tarafta sıcak ve dış tarafta soğuk ortam koşullarına maruz olan bir dış duvarın IRT-HB ile dışardan (soğuk taraftan) takibini temsil etmektedir. Bu yöntemle laboratuvar ortamında elde edilen veriler, kesiti hakkında bilgi sahibi olmadığımız mevcut bir dış duvarın ısı geçirimsizlik özelliklerinin belirlenebileceğini göstermiştir. IRT-HB yöntemiyle elde edilen deney verileri ilk etapta TS 825 (2008) standart verileri kullanılarak hesaplanan ısı geçirimsizlik değerlerine göre oldukça düşük bulunmuştur. Sıcak kutu deney düzeneği ile ısı geçirimsizlik özellikleri çoğunlukla hazırlanan deney numunesinin kendisine ve taşıdığı özellikler ile sınır şartlarına,

boyutlarına, ısı transferinin yönüne, sıcaklıklara, sıcaklık farklarına, hava akım hızlarına ve bulunduğu ortamın bağıl nemine bağlı olduğu bilinmektedir (BS EN ISO 8990, 1996). Tüm bu farklar hesaplama yapılırken göz önünde bulundurulmalıdır. Bu deneyde de ortam koşulları her ne kadar kayıt altında olsa da duvarlardan ve sıcak kutu birleşim noktalarında oluşan ısı kayıpları kontrol altında tutulamıştır. Bu sebeple yine BS EN ISO 8990,1996 standartında tariflenen kalibrasyon uygulanmıştır. Kalibrasyon için referans ısıl geçirimsilik değerleri kullanılarak her bir duvar için yanal ısı kayıpları (Φ_Y) hesaplanmıştır. Tespit edilen bu ısı kayıpları ile her bir duvar için belirlenen kalibre edilmiş ısıl geçirimsilik özellikleri (U_{IRT-HB} , R_{IRT-HB} ve λ_{IRT-HB}) ile referans ısıl geçirimsilik özellikleri ($U_{Referans}$, $R_{Referans}$, $\lambda_{Referans}$ ve $q_{Referans}$) yakın bulunmuştur. IRT-HB yöntemi ile elde edilen sıcaklık verileri kullanılarak duvarın ısıl geçirimsilik özellikleri ancak ısı kayıpları tespit edilebildiği ya da engellenebildiği ($\Phi_Y = 0$) takdirde belirlenebilmektedir.

IRT-HB deney yönteminde elde edilen yüzey sıcaklık verileri iki farklı şekilde değerlendirilmiştir. Bunlardan ilki duvarın ısınma sürecinde, ikincisi ise ısındıktan sonra kararlı durumda geldiği anda elde edilen yüzey sıcaklık verileridir. Isınma sürecine ait zamana bağlı yüzey sıcaklığındaki değişimi gösteren grafiklerde, soğuk tarafta kalan duvar yüzeyindeki ısınma takip edilmiş ve bu ısınmayı temsil eden doğrunun eğimi ile çalışılan duvar kesitinin ısıl geçirimsiliğiyle doğrudan ilişkili sayısal bir veri verilmiştir.

Geliştirilen bu IRT-HB düzeneği aşağıdaki ısıl geçirimsilik özelliklerinin ve bazı ısıl parametrelerin belirlenmesinde kullanılmıştır:

– Düzeneğin kararlı durumda olduğu süreçte elde edilen yüzey sıcaklık verileri ile günümüzde dış duvarlarda yaygın olarak kullanılan duvar dolgu malzemeleri ile yapılan duvarların aşağıdaki bazı ısıl geçirimsilik özellikleri ve ısıl sorunları tespit edici bazı ısıl parametreler belirlenmiştir. Bunlar :

- ısıl geçirgenlik katsayısı (U , W/m^2K)
- ısıl direnç değeri (R , m^2K/W)
- ısı akış yoğunluğu (q , W/m^2)
- ısıl iletkenlik hesap değeri (λ , W/mK)
- ısıl sorunları için sıcaklık indeksi (TI, birimsiz)
- sorunlu bölgenin yüzey sıcaklığı ile referans alınan sorunsuz bölgenin yüzey sıcaklıkları arasındaki fark ($\Delta T_{SORUN} = T_{SORUNLU YÜZEY} - T_{REFERANS YÜZEY}$, $^{\circ}C$)

– Isınma sürecinde elde edilen yüzey sıcaklık verileri ile duvarların aşağıdaki bazı ısıl geçirimsizlik özellikleri ve sağlam ve ısıl sorunlu bölgelerini tanımlamak için geliştirilen bazı ısıl parametreler belirlenmiştir. Bu parametreler:

- ısıl yayınlılık değeri ($\alpha = 0,1388 \frac{L^2}{t_{1/2}}$, m²/s)
- ısınma süreci boyunca yüzey sıcaklığındaki artış (ısınma süreci sonunda ulaşılan son yüzey sıcaklığı ile ısınma başlamadan önceki ilk yüzey sıcaklığı arasındaki fark, ($\Delta T = T_{SON} - T_{ILK}$, °C),
- ısınma hızı (R_w , °C/s^{1/2}),
- sorunlu bölgedeki ısınma hızının, referans alınan sorunsuz tuğla yüzeyinkine oranı ($R_{w-SORUN}/R_{w-REF}$).

Bu çalışmada duvar kesitlerinde bulunan yatay ve/veya düşey derzlerde oluşan ısı köprüsü sorunu infared görüntüler ile tespit edilmiş ve ısıl parametrelerle sayısal analizleri yapılmıştır.

IRT-HB yöntemiyle yapı duvarların ısıl geçirimsizlik özellikleri (U, R, λ ve q) belirlenirken sıcak soğuk taraf ortamın karalı hale gelmiş olmasına dikkat edilmesi gerekmektedir. Ayrıca duvar yüzeyinde ve deney düzeneğinde oluşan ısı kaçaklarının engellenmesi ya da en aza indirilmesi sağlanmalıdır. Çünkü ısıl geçirimsizlik özellikleri değerleri ısı kayıplarından etkilenmektedir. Bu nedenle ısıl geçirimsizlik özelliklerini belirleme çalışmalarında daha hassas deney düzeneğine ihtiyaç duyulmaktadır. Ancak bu durumun tam tersine IRT-HB yöntemiyle hem laboratuvar ortamında hem de yerinde yapılan çalışmalarda ısı kaçaklarının oluşturduğu ısı kayıpları ısıl yayınlılık değerinin (α) belirlenmesinde, olumsuz bir durum oluşturmamıştır. Bunun nedeni olarak sıcak kutunun ortamın ısısını dengede tutabilmek için sürekli enerji harcayarak ısıyı sabit tutmaya çalışması gösterilebilir. Bu durum IRT-HB yönteminin yapılarda yerinde ısıl yayınlılık değerinin belirlenmesinde çok daha kullanışlı bir yöntem olduğunu göstermiştir.

IRT-HB yöntemi ile elde edilen birçok ısıl parametre ile yapıların ısıl performansının nicel olarak belirlenebileceği anlaşılmıştır. Bu yöntem ile malzeme özellikleri bilinmeyen mevcut yapılarda dahi yapıya zarar vermeden, doğrudan yapının mevcut durumu (varsa ısıl sorunları dahil) üzerinden yapılacak nicel ısıl geçirimsizlik özelliklerini belirleme ve değerlendirme

süreçlerinde kullanılabileceğini göstermiştir. Bu durum özellikle enerji kimlik belgesi (EKB) uygulamalarında yapının yerinde alınacak ölçümleri ile gerçek ısı performans karnesinin hazırlanması ve enerji tüketim sınıfının doğru tespit edilmesi açısından önemlidir.

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada günümüzde yaygın olarak kullanılan kagir malzemeler kullanılarak duvarlar örülmüş; kızılötesi ısı görüntüleme (IRT) ve sıcak kutu (HB) birleşik yöntemi (IRT-HB) kullanılarak, bu duvarlarının ısı yayınlılık değeri, geçirimsilik özellikleri ve duvarlardaki derzlerde görülen ısı köprüleri laboratuvar analizleri ile incelenmiştir. Bu analizlerle, farklı duvarların ısı geçirimsilik özellikleri nicel olarak belirlenmiş; bu duvarlarda bulunan kagir malzeme yüzeyleri ve derzli bölgeler ısınma hızı ve sıcaklık indeksi gibi ısı parametrelerle incelenmiş; böylece sağlam/sorunsuz ile ısı sorunlu bölgeleri tarifleyen yüzey sıcaklık karakteristikleri ortaya çıkarılmıştır. Bu veriler, yapıların ısı geçirimsilik özelliklerinin yerinde tahribatsız bir yöntem olan IRT-HB yöntemi ile sadece yüzey sıcaklık verileri kullanılarak ölçülebilir parametrelerle belirlenmesi için standart bir yöntemin oluşturulmasının mümkün olduğunu göstermiştir. Özellikle bu çalışma kagir malzemelerin ve duvarların ısı yayınlılık değerinin IRT-HB deney düzeneği ile belirlenmesi için veri toplama ve değerlendirme aşamalarının geliştirilmesi bakımından yol gösterici niteliğindedir. Bu tez çalışmasında elde edilen sonuçlar kısaca:

- Farklı kagir duvar dolgu malzemeleri ile inşa edilen duvarların ısı yayınlılık ve ısı geçirimsilik özellikleri “teorik veriler”, “referans verileri (laboratuvar verileri)” ve “IRT-HB verileri” olmak üzere üç farklı şekilde belirlenmiştir.
- IRT-HB deney düzeneği ile hem laboratuvar ortamında hem de yerinde yapılan ölçümlerde yapı duvarlarının ısı yayınlılık değeri tespitinde başarılı olduğu anlaşılmıştır.
- Ancak IRT-HB deney düzeneği duvarların ısı geçirimsilik özelliklerinin belirlenmesinde yanıl ısı kayıplarından olumsuz etkilenmektedir. Bu nedenle yanıl ısı kayıplarını en aza indirecek daha hassas düzenekler kurulmalıdır.
- Geliştirilmiş deney düzeneğiyle (IRT-HB) laboratuvar ortamında yapılan deneylerin arazi ortamına adapte edilmesiyle de yapıların yerinde ısı yayınlılık değerinin belirlenmesi için tahribatsız bir analiz yöntemi geliştirilmesinin yolu açılmıştır.
- Bu çalışma farklı sıcaklığa sahip ortamların etkisinde olan duvar yüzeylerinin ardışık ısı görüntüleme ile takibinin mümkün olduğunu ve duvardaki ısı akışının ölçülebilir parametrelerle analiz edilebileceğini göstermiştir.
- Çalışma duvarlarında kagir malzemelere göre derzli bölgelerde ısı köprüsü sorunu tespit edilmiştir. Bu derzler arasında da harçlı yatay derzlerin, lamba zıvana geçme düşey derzlere

göre daha fazla ısı köprüsü sorunu oluşturduğu ve bu durumun duvarın ısıl performansını olumsuz etkilediği görülmüştür.

Mevcut ve yeni yapıların yapıların ısı yalıtımlılık niteliklerinin belirlenmesine ve ısıl performanslarının ölçülebilir, tahribatsız ve pratik yöntemlerle tespit edilmesine yönelik çalışmalara ihtiyaç olduğu literatür çalışmalarından bilinmektedir. IRT-HB yönteminin yapı denetimi sahasında özellikle nicel sonuçlar verecek şekilde kullanımı önemlidir. Yerinde analiz ve takibin geliştirilmesi ve yaygınlaştırılması için farklı yapı malzemeleri kullanılarak yapılacak bu türden çalışmalara ihtiyaç vardır. Bu tür çalışmalar, Türkiye’de yapı denetimi sahasında IRT-HB yöntemini doğru kullanabilecek uzmanların yetişmesine de vesile olacaktır.

Bu tez çalışması bilim dünyasına yeni bir yöntem kazandırması ve yapıların ısıl performans tespitinin nicel, ölçülebilir parametrelerle yapılabilmesine yol gösterici olması bakımından oldukça önemlidir. Özellikle ısıl yayınlılık değerinin (α) başka parametrelere ihtiyaç duymadan, doğrudan yüzey sıcaklık verileriyle belirlenmesine imkan veren IRT-HB yönteminin, standart bir analiz yöntemi haline getirilmesi gerekmektedir. Bunun için hassas deney düzenekleri kurulmalı, termal görüntüler otomatik olarak ve daha sık aralıklarla kayıt edilmelidir. Deney süreleri kullanılan malzemenin özellikleri göz önünde bulundurularak her bir malzeme için özel ayarlanmalıdır. Verilerin analizi için bu tez çalışmasında elde edilen bilgilerden ve deneyimden faydalanılarak bir yazılım geliştirilmelidir. Böylece standart bir analiz yöntemi geliştirilebilir ve çalışma çıktıları daha hızlı ve seri bir şekilde kullanıma sunulabilir. Ayrıca bu çalışmada geliştirilen düzenek ile elde edilen veriler, enerji verimli yapıların tespiti ve onların denetimi için pratik, yerinde ölçüme imkân veren taşınabilir bir cihazın üretiminin yapılabileceği fikrini doğurmuştur. Böylece binaların enerji performansını yerinde değerlendirilmiş; EKB’ne mevcut yapıların gerçek enerji performans durumunu gösteren ölçülebilir, doğru veriler yazılmış ve binaların enerji sınıfları hali hazırdaki durumlarına göre belirlenmiş olacaktır. Çalışmanın bu hedefle ilerlemesi, deney düzeneğinin standart bir yöntem haline gelmesi ve bu alanda uzmanların yetişmesi önemsenmektedir. Özellikle IRT-HB düzeneğinin, yapı duvarlarının yerinde ısıl yayınlılık değerlerinin belirlenmesinde kullanılması ve bu alanda ayrıntılı çalışmaların yapılması önerilmektedir.

KAYNAKLAR

- Albatici, R., and Tonelli, A. M. (2010). Infrared thermovision technique for the assessment of thermal transmittance value of opaque building elements on site. *Energy and Buildings*, 42(11), 2177–2183.
- Altınışik, K. (2003). *Uygulamalarla ısı transferi*. Ankara: Nobel Yayın Dağıtım, 1-70.
- Altun, Ö. (2008, Ekim). Lazer flaş yöntemini kullanarak malzemelerin ısı iletim katsayısının deneysel olarak tayini ve örnek bir uygulama. *VII. Ulusal Ölçümbilim Kongresi*, 375 – 380.
- Asdrubali, F., and Baldinelli, G. (2011). Thermal transmittance measurements with the hot box method: Calibration, experimental procedures and uncertainty analyses of three different approaches. *Energy and Buildings*, 43(7), 1618–1626.
- Arslan, M. (2008). *Yapı Teknolojileri 2*. Ankara: Seçkin Yayınevi, 25-44.
- ASTM C714-72. (1972). Standard test method for thermal diffusivity of carbon and graphite by a thermal pulse method. *American Society for Testing and Materials*, USA.
- ASTM C177-197. (2000a). Standart test method for steadystate heat flux measurement and thermal transmission properties by means of guarded hot plate apparatus. *American Society for Testing and Materials*, USA.
- ASTM C236-289. (2000b). Standart test method for steadystate thermal performance of building assemblies by means of guarded hot box. *American Society for Testing and Materials*, USA.
- ASTM E1461. (2014). Standard test method for thermal diffusivity by the flash method 1. *American Society for Testing and Materials*, USA.
- Aversa, P., Palumbo, D., Donatelli, A., Tamborrino, R., Ancona, F., Galietti, U., and Luprano, V. A. M. (2017). Infrared thermography for the investigation of dynamic thermal behaviour of opaque building elements: Comparison between empty and filled with hemp fibres prototype walls. *Energy and Buildings*, 152, 264–272.
- Avdelidis, N. P., and Moropoulou, A. (2003). Emissivity considerations in building thermography. *Energy and Buildings*, 35, 663-667.
- Avdelidis, N. P., and Moropoulou, A. (2004). Applications of infrared thermography for the investigation of historic structures. *Journal of Cultural Heritage*, 5, 119–127.
- Azhary, K. E., Raefat, S., Laaroussi, N., and Garoum, M. (2018). Energy performance and thermal proprieties of three types of unfired clay bricks. *Energy Procedia*, 147, 495–502.
- Balaras, C. A., and Argiriou, A. A. (2002). Infrared thermography for building diagnostics. *Energy and Buildings*, 34, 171-183.
- Bayer, G. (2006). *Binalarda uygulanan ısı yalıtım sistemleri ve örnek bir projede ısı yalıtım*

maliyet analizleri. Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.

- Barreira, E., Almeida, R. M. S. F., and Moreira, M. (2017). An infrared thermography passive approach to assess the effect of leakage points in buildings. *Energy and Buildings*, 140, 224–235.
- Basak, C. K., Mitra, D., Ghosh, A., Sarkar, G., and Neogi, S. (2015). Performance evaluation of a guarded hot box test facility using fuzzy logic controller for different building material samples. *Energy Procedia*, 90, 185–190.
- Binalarda Enerji Performansı Yönetmeliği. (2008). T.C. Bayındırlık İskan Bakanlığı, *Resmi Gazete*, 27075, 45.
- Bison, P. G., Marinetti, S., Mazzoldi, A., Grinzato, E., and Bressan, C. (2002). Cross-comparison of thermal diffusivity measurements by thermal methods. *Infrared Phys Technol*, 43, 127–32.
- Bison P. G., Cernuschi, F., and Grinzato, E. (2008). In-depth and in-plane thermal diffusivity measurements of thermal barrier coatings by IR camera: evaluation of ageing. *International Journal of Thermophys*, 29, 2149–2161.
- Bonacina, C. (2011, July). Experimental evaluation of thermal properties of autoclaved aerated concrete at high temperature. *8th International Conference on Heat Transfer, Fluid Mechanics and Thermodynamics*, 621–625.
- Boué, C., and Fournier, D. (2009). Infrared thermography measurement of the thermal parameters (effusivity, diffusivity and conductivity) of materials. *Quantitative InfraRed Thermography Journal*, 6(2), 175–188.
- BS EN 1745. (2002). Masonry and masonry products methods for determining design thermal values. *British Standards Institution*, 13-15.
- BS EN 12664. (2001). 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. *British Standards Institution*, 29-31.
- BS EN ISO 8990. (1996). Thermal insulation determination of steady-state thermal transmission properties calibrated and guarded hot box. *British Standards Institution*, 1-26.
- Burch, D. M., Licitra, B. A., and Zarr, R. R. (1990). A dynamic test method for determining transfer function coefficients for a wall specimen using a calibrated hot box. *Insulation Materials, Testing and Applications*, ASTM STP 1030, 345–361.
- Candan, N. (2007). *Isı yalıtım sistemleri ve özelliklerinin karşılaştırılması*. Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya, 2-10.
- Carslaw, H. S., and Jaeger, J. C. (1959). *Conduction of heat in solids*, Clarendon.
- Celik, S., Family, R., and Menguc, M. P. (2016). Analysis of perlite and pumice based

- building insulation materials. *Journal of Building Engineering*, 6, 105–111.
- CEN EN 13187. (1998). Thermal performance of buildings –qualitative detection of thermal irregularities in building envelopes–infrared method. *CEN–European Committee for Standardization*, Brussels.
- Cook, H. K. (1978). Thermal properties in significance of oest and properties of concrete and concrete making materials. *American Society for Testing and Materials*, ASTM STP 169B-EB/Dec, 39, 695-707.
- Çengel, Y. (2011). *Isı ve kütle transferi pratik bir yaklaşım* (Üçüncü Baskı). İzmir: Güven Kitapevi, 1-70.
- Çiçek, E. (2002). *Pişmiş toprak tuğla, bims beton, gaz beton ve perilitli yapı malzemelerinin fiziksel, kimyasal ve mekanik özelliklerinin karşılaştırmalı olarak incelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 0–112.
- Çiçek, P. (2009). *Thermal performance assessment of historical Turkish baths*. Yüksek Lisans Tezi, Orta Doğu Teknk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 1-160.
- Çimentaş. (1998). *Gazbeton tasarım ve uygulama el kitabı*. Çimentaş Gazbeton İşletmeleri, İzmir.
- Danielski, I., and Froling, M. (2015). Diagnosis of buildings thermal performance-a quantitative method using thermography under non-steady state heat flow. *Energy Procedia*, 83.
- Edis, E., Flores-Colen, I., and Brito, J. (2015). Quasi-quantitative infrared thermographic detection of moisture variation in facades with adhered ceramic cladding using principal component analysis. *Building and Environment*, 94, 97-108.
- EN ISO 13786. (2007). *Thermal performance of building component–dynamic thermal characteristics–calculation methods*. Organisation for International Standardisation.
- EN ISO 14683. (2000). *Thermal bridges in buildings construction–linear thermal transmittance–simlified methods and default values*. Organisation for International Standardisation.
- Ferrarini, G., Bison, P., Bortolin, A., and Cadelano, G. (2016). Thermal response measurement of building insulating materials by infrared thermography. *Energy and Buildings*, 133, 559–564.
- Flir. (2001). *ThermaCAM PM695 operator’s manual, emissivity tables*. Flir Systems AB 1, 454-557.
- Fox, M., Coley, D., Goodhew, S., and Wilde, P. (2015). Time-lapse thermography for building defect detection. *Energy and Buildings*, 92, 95-106.
- Gao, Y., Roux, J. J., Teodosiu, C., and Zhao, L. H. (2004). Reduced linear state model of hollow blocks walls, validation using hot box measurements. *Energy and Buildings*, 36, 1107–1115.

- Ghosh, A., Ghosh, S., and Neogi, S. (2014). Performance evaluation of a guarded hot box U-value measurement facility under different software based temperature control strategies. *Energy Procedia*, 54(033), 448–454.
- Glavas, H., Hadzima-Nyarko, M., Buljan, I. H., and Baric, T. (2019). Locating hidden elements in walls of cultural heritage buildings by using infrared thermography. *Buildings*, 9(2), 32.
- Geoola, F., Kashti, Y., Levi, A., and Brickman, R. (2009). A study of the overall heat transfer coefficient of greenhouse cladding materials with thermal screens using the hot box method. *Polymer Testing*, 28, 470–474.
- Grinzato, E., Vavilov, V., and Kauppinen, T. (1998). Quantitative infrared thermography in buildings. *Energy and Buildings*, 29, 1-9.
- Goulart, S.V.G. (2004). *Thermal inertia and natural ventilation – optimisation of thermal storage as a cooling technique for residential buildings in Southern Brazil*. Unpublished Phd. Thesis, Architectural Association School of Architecture, Graduate School.
- Grinzato, E., G. Cadelano, P. G. Bison and Petracca, A. (2009). Seismic risk evaluation aided by IR thermography, *Proceedings SPIE*, Thermosense XXX, Orlando, USA.
- Grinzato, E., Bison, P.G., and Marinetti, S. (2002a). Monitoring of the ancient buildings by the thermal method. *Journal of Cultural Heritage*, 3, 21–29.
- Grinzato, E., Vavilov, V., and Kauppinen, T. (1998). Quantitative infrared thermography in buildings. *Energy and Buildings*, 29, 1-9.
- Grinzato, E., Bressan, C., Marinetti, S., Bison, P.G., and Bonacina, C. (2002b). Monitoring of the scrovegni chapel by IR thermography: Giotto at infrared. *Infrared Physics & Technology*, 43, 65-169.
- Hall, F. (1994). *Building Services & Equipment (3rd edition): Heat Losses*. Longman Group UK Limited, 1(4).
- Hall, F. (1994). *Building Services & Equipment (3rd edition): Heating*. Longman Group UK Limited, 1(7).
- Habib, E., Cianfrini, M., and De Lieto Vollaro, R. (2017). Definition of parameters useful to describe dynamic thermal behavior of hollow bricks. *Energy Procedia*, 126, 50–57.
- Hens, H. (2007). *Building physics-heat, air and moisture*. Ernst&Sohn A Wiley Company, Berlin, Germany.
- Hoffmann, D. and Niesel, K. (1996). Relationship between pore structure and other physico-technical characteristics of stone. *Proceedings of the 8th International Congress on Deterioration and Conservation of Stone*, 1, 461-470.
- Holman, J.P. (2002). *Heat Transfer (9th edition)*. McGraw-Hill.
- ISO 12567-1. (2010). *Thermal performance of windows and doors determination of thermal*

transmittance by the hot-box method part 1:complete windows and doors. International Organization for Standardization, 2, 1-60.

ISO 9869. (2014). *Thermal insulation building elements, in-situ measurement of thermal resistance and thermal transmittance part 1: heat flow meter method.* International Organization for Standardization, 1, 1-36.

ISO 6781-3 (2015). *Performance of buildings—detection of heat, air and moisture irregularities in buildings by infrared methods.* International Organization for Standardization, 1, 1-18.

İnternet: Açık bilim. *Elektromanyetik spektrum.* URL: <http://www.acikbilim.com/2013/11/dosyalar/elektromanyetik-spektrum-bize-ne-anlatiyor.html>, Son Erişim Tarihi: 01.09.2019.

İnternet: AKG. *Gaz beton.* URL: <http://www.akg-gazbeton.com/gazbeton-nedir,2019>, Son Erişim Tarihi: 01.09.2019.

İnternet: Kudret Tuğla. *Tuğla türleri ve izo tuğla.* URL: https://www.kudret.com/wp-content/uploads/2018/04/kudret_katalog.pdf, Son Erişim Tarihi: 01.09.2019.

İnternet: Engineering Tool Box. *Solid materials specific heat.* URL: https://www.engineeringtoolbox.com/specific-heat-solids-d_154.html, Son Erişim Tarihi: 02.09.2019.

İnternet: Greenspec. *Thermal mass.* URL: www.greenspec.co.uk/building-design/thermal-mass, Son Erişim Tarihi 05.11.2019.

İnternet: IESVE. *Specific heat capacity.* URL: https://help.iesve.com/ve2018/table_6_thermal_conductivity__specific_heat_capacity_and_density.htm?ms=IQAAEAI%3D&st=MA%3D%3D&sct=NDgz&mw=MjQw, Son Erişim Tarihi: 16.10.2019.

İnternet: RESNET. *Residential energy services network, RESNET interim guideline for thermographic inspections of buildings.* URL: http://www.resnet.us/standards/RESNET_IR_interim_guidelines.pdf, Son Erişim Tarihi: 04.11.2016.

İnternet: Wilson, J. *Materials Data.* URL: <https://www.electronics-cooling.com/?s=diffusivity>, Son Erişim Tarihi: 01.09.2019.

İnternet: Wikipedia. *Thermal diffusivity value.* URL: <http://en.wikipedia.org/wiki>, Son Erişim Tarihi: 01.09.2019.

İnternet: Yapı ARGE. *Mahfazalı sıcak kutu.* URL: <http://yapiarge.com/wp-content/uploads/2018/10/TS-EN-ISO-8990.pdf>, Son Erişim Tarihi: 01.05. 2019.

Jin, H.Q., Yao, X. L., Fan, L. W., Xu, X. and Yu Z. T. (2016). Experimental determination and fractal modeling of the effective thermal conductivity of autoclaved aerated concrete: Effects of moisture content. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 589-602.

- Kakaç, S. (1976). *Isı Transferine Giriş I: Isı İletimi*, Ankara: ODTÜ Mühendislik Fakültesi.
- Kandemir, Y. A., Tavukcuoglu, A., and Saltik, E. N. (2007). In situ assessment of structural timber elements of a historic building by infrared thermography and ultrasonic velocity. *Infrared Physics & Technology*, 49, 243–248.
- Koçkar, R. (2012). *Tuğla duvarlardaki ısı özelliklerinin ve ısı sorunlarının kızılötesi ısı görüntüleme ve sıcak kutu yöntemleriyle incelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 1-117.
- Kosny, J. (1994). Performance analysis of autoclaved aerated concrete; an example of collaboration between industry and a research lab on development of energy efficient. *Building Industry Trends*, 10, 161–172.
- Kreft, O., Hausmann, J., Hubalkova, J., Aneziris, C. G., Sraube, B., and Schoch, T. (2011, September). Pore size distribution effects on the thermal conductivity of light weight autoclaved aerated concrete. *5th International Conference on Autoclaved Aerated Concrete 1*, Bydgoszcz, Poland, 257–264.
- Kus, H., Özkan, E., Göcer, Ö., and Edis, E. (2013). Hot box measurements of pumice aggregate concrete hollow block walls. *Construction and Building Materials*, 38, 837 – 845.
- Langlais, C., Silberstein, A., and Sandberg P. I. (1994). Effects of moisture on the thermal performance of insulating material. *Moisture Control in Buildings*, 4, ed. Heinz R. Trechsel, The American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 54-71.
- Li, J., Meng, X., Gao, Y., Mao, W., Luo, T., and Zhang, L. (2018). Effect of the insulation materials filling on the thermal performance of sintered hollow bricks. *Case Studies in Thermal Engineering*, 11, 62–70.
- Li, R., Wei, X., Li, H., and Zhu, J. (2017). Experimental study on ventilation and thermal performance of exterior sandwich wall based on hot box method. *Procedia Engineering*, 205, 2771–2778.
- Maldague, X. P. V. (2001). Theory and practice of infrared technology for nondestructive testing. *John Wiley and Sons*, New York, 10.
- Martin, K., Campos-Celador, A., Escudero, C., Gomez, I., and Sala, J. M. (2012). Analysis of a thermal bridge in a guarded hot box testing facility. *Energy and Buildings*, 50, 139–149.
- Meng, X., Gao, Y., Wang, Y., Yan, B., Zhang, W., and Long, E. (2015). Feasibility experiment on the simple hot box-heat flow meter method and the optimization based on simulation reproduction. *Applied Thermal Engineering*, 83, 48–56.
- Meng, X., Luo, T., Gao, Y., Zhang, L., Shen, Q., and Long, E. (2017). A new simple method to measure wall thermal transmittance in situ and its adaptability analysis. *Applied Thermal Engineering*, 122, 747–757.
- Mounir, S., Abdelhamid, K., and Maaloufa, Y. (2015). Thermal inertia for composite materials white cement-cork, cement mortar-cork, and plaster-cork. *Energy Procedia*,

74, 991–999.

- Muscio, A., Bison, P. G., Marinetti, S., and Grinzato, E. (2004). Thermal diffusivity measurement in slabs using harmonic and one-dimensional propagation of thermal waves. *International Journal of Thermal Sciences*, 43(5), 453–463.
- Narayanan, N., and Ramamurthy, K. (2000). Structure and properties of aerated autoclaved concrete: a review. *Cement and Concrete Composites*, 22, 321–329.
- Nardi, I., Paoletti, D., Ambrosini, D., De Rubeis, T., and Sfarra, S. (2016). U-value assessment by infrared thermography: a comparison of different calculation methods in a guarded hot box. *Energy and Buildings*, 122, 211–221.
- Nussbaumer, T., Ghazi Wakili, K., and Tanner, C. H. (2006). Experimental and numerical investigation of the thermal performance of a protected vacuum-insulation system applied to a concrete wall. *Applied Energy*, 83, 841–855.
- O’Grady, M., Lechowska, A. A., and Harte, A. M. (2017). Infrared thermography technique as an in-situ method of assessing heat loss through thermal bridging. *Energy and Buildings*, 135, 20–32.
- Ocana, S., Guerrero, M., Canas, I., and Requena, I.G. (2004). Thermographic survey of two rural buildings in Spain. *Energy and Buildings*, 36, 515–523.
- Orhan, M. (1996). *Yapı fiziği temel kavramlar ve binalarda ısı yalıtımı*. Ankara: Tekev Yayınları, 26–36.
- Özkan, Ş. G., and Tuncer, G. (2001, Ekim). An overview of pumice mining. 4. *Endüstriyel Hammaddeler Sempozyumu*. İzmir, Türkiye.
- Parker, W. J., Jenkins, R. J., Butler, C. P., and Abbott, G. L. (1961). Flash method of determining thermal diffusivity, heat capacity, and thermal conductivity. *Journal of Applied Physics*, 32(9), 1679–1684.
- Pruteanu, M., and Vasilache, M. (2013). Thermal conductivity determination for autoclaved aerated concrete elements used in enclosure masonry walls. *Buletinul Institutului Politehnic Din Iași Publicat De Universitatea Tehnică Gheorghe Asachi Din Iași Tomul LIX (LXIII), Secția Construcții Arhitectură*.
- RILEM, (1980). Tentative recommendations, commission –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.
- Sassine, E., Younsi, Z., Cherif, Y., Chauchois, A., and Antczak, E. (2017). Experimental determination of thermal properties of brick wall for existing construction in the north of France. *Journal of Building Engineering*, 15–23.
- Sayın, M., and Tavukçuoğlu, A. (2015, 15–18, May). Quantitative assessment of thermal transmittance in building walls by in-situ infrared thermography. *International Conference on Building Envelope Systems and Technologies*, Istanbul, Turkey, 202–215.

- Sayın, M., and Tavukçuoğlu, A. (2016). Cephelerin ısı yalıtımlılık durumlarının ısı görüntüleme ile değerlendirilmesi. *Yalıtım Dergisi*, İstanbul: B2B Medya, 152, 46-54.
- Sayın, M. (2019). *Thermal transmittance assesment of building walls by using in-situ infrared thermography*, Yüksek Lisans Tezi, ODTÜ, Yapı Bilimleri Yüksek Lisans Programı, Ankara, 138.
- Serra, C., Tadeu, A., and Simões, N. (2017). Heat transfer modeling using analytical solutions for infrared thermography applications in multilayered buildings systems. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 115, 471-478.
- Şimşek, O. (2007). *Yapı malzemeleri II* (Üçüncü Baskı). Ankara: Seçkin Yayınevi, 102-114.
- Taymaz, H. (1992). *Yapı bilgisi 1*. Devlet Kitapları, Çınar Ofset, 8-34.
- Tavukçuoğlu, A., Akevren, S., and Grinzato, E. (2010). 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.
- Tavukçuoğlu, A., Akevren, S., and Grinzato, E. (2009). In-situ examination of structural cracks at historic masonry structures by quantitative infrared thermography and ultrasonic testing. *10th International Workshop on Advanced Infrared Technology and Applications*, Florence, Italy.
- Tavukçuoğlu, A. (2009). Tarihi yapıların tahribatsız yöntemlerle muayenesi. *Kagir Yapılarda Koruma ve Onarım Semineri*, 187-200.
- Tavukcuoglu, A., Cicek, P., and Grinzato, E. (2008). Thermal analysis of an historical turkish bath by quantitaive ır thermography. *Quantitative Infrared Thermography Journal*, 5(2), 151-173.
- Tavukcuoglu, A., Düzgüneş, A., Caner-Saltık, E. N., and Demirci, Ş. (2005). Use of ır thermography for the assessment of surface water drainage problems in an historical building. *NDT & E International*, 38, 402-410.
- Tavukcuoglu, A., Düzgüneş, A., Demirci, Ş., and Caner-Saltık, E.N. (2007). The assessment of a roof drainage system for an historical building. *Building and Environment*, 42, 2699-2709.
- Titman, D. J. (2001). Applications of thermography in non-destructive testing of structures. *NDT & E International*, 34, 149-154.
- Tejedor, B., Casals, M., Gangoells, M., and Roca, X. (2017). Quantitative internal infrared thermography for determinining-in-situ thermal behaviour of façades. *Energy and Buildings*, 151, 187-197.
- Toure, P. M., Sambou, V., Faye, M., and Thiam, A. (2017). Mechanical and thermal characterization of stabilized earth bricks. *Energy Procedia*, 139, 676-681.
- TS 825. (2008). Binalarda ısı yalıtım kuralları. *Türk Standardları Enstitüsü*, Ankara, 1-80.
- TS EN 1745. (2004). Kâgir ve kâgir mamulleri - tasarım ısı değerlerinin tayini metotları.

- Türk Standardları Enstitüsü*, Ankara, 1-51.
- TS EN ISO 6946. (2009). Yapı bileşenleri ve yapı elemanları - ısı direnç ve ısı geçirgenlik -hesaplama yöntemi 1. *Türk Standardları Enstitüsü*, Ankara, 1-41.
- TS EN ISO 10211. (2009). Bina inşaatlarında ısı köprüler ısı akışları ve yüzey sıcaklıkları ayrıntılı hesaplama metotları. *Türk Standardları Enstitüsü*, Ankara, 1-57.
- TS EN 771-1, (2005). Kâgir birimler-özellikler-bölüm 1: kil kâgir birimler (tuğlalar). *Türk Standardları Enstitüsü*, Ankara, 1-49.
- TS 453. (1989). Gaz ve köpük beton yapı malzeme ve elemanları. *Türk Standardları Enstitüsü*, Ankara, 1-18.
- 771-1:2011+A1. (2015). Kâgir birimler-özellikler-bölüm 1: kil kâgir birimler. *Türk Standardları Enstitüsü*, Ankara, 112.
- TS 2511. (2017). Aşıyıcı hafif betonların karışım hesap esasları. *Türk Standardları Enstitüsü*, Ankara, 17.
- TS 4048. (2013). Isı yalıtım malzemesinin özgül ısının tayini, *Türk Standardları Enstitüsü*, Ankara, 1-11.
- TS EN ISO 8990. (2002). Isı yalıtımı- kararlı durum ısı iletim özelliklerinin tayini- kalibre edilmiş ve mahfazalı sıcak kutu. *Türk Standardları Enstitüsü*, Ankara, 36.
- Tuğla, R., ve Tavukçuoğlu A. (2016, 24-26, Kasım). Tuğla duvarlarda ısı sorunlarının kızıl ötesi ısı görüntüleme ile belirlenmesi. 3. *Ulusal Yapı Kongresi ve Sergisi Teknik Tasarım*, Güvenlik ve Erişilebilirlik, Ankara.
- Tuğla, R., Tavukçuoğlu, A., and Arslan, M. (2013, 16-18, September). 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, Turkey, 180-199.
- Tuğla, R., and Tavukçuoğlu, A. (2018, 26-29, April). Thermal performance assessment of jointings in perforated brick walls by the combined use of infrared thermography and guarded hot box. *International Congress on Engineering and Life Science (ICELIS)*, Kastamonu, Turkey, 603.
- Uzun, Ö. (2008). *Bims blok ile örülen dış duvarların yapısal performansının değerlendirilmesi üzerine bir alan araştırması*. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü. 11-18.
- Venkanna, B. K. (2010). *Fundamentals of heat and mass transfer*. New Delhi: PHI Learning, 38.
- Wakili, G. K., Hugi, E., Karvonen, L., Schnewlin, P., and Winnefeld, F. (2015). Thermal behaviour of autoclaved aerated concrete exposed to fire. *Cement and Concrete Composites*, 62, 52–58.

- Wakili, G. K., Tanner, C. H. (2003). U-value of a dried wall made of perforated porous clay bricks hot box measurement versus numerical analysis. *Energy and Buildings*, 35, 675–680.
- Wiggenhauser, H. (2002). Active ır-applications in civil engineering. *Infrared Physics & Technology*, 43, 233–238.
- Yeşilata, B., Turgut, P., ve Işıker, Y. (2004). Kompozit yapı malzemelerinde ısııl özellik ölçümü-1: mevcut ölçüm tekniklerin irdelenmesi. *Mühendis ve Makine*, 48(564), 2–9.

EKLER

EK-1. FLIR ThermaCam E45 Termal Kamera

Görüntüleme Performansı

Odak	Manuel
Başlatma süresi	Yaklaşık 15 saniye
Bekleme Modunda başlatma süresi	<1 saniye @ +25 °C (+77 °F)
Dedektör tipi	Odak düzlem düzeni (FPA), soğutulmamış mikro bolometre
Spektral aralık	7,5-13µm
Resim Sunumu	
Gösterge	2,5" renkli LCD, 16 bit renk
Video çıkışı	Bileşik video CVBS (ITU-R BT.470 PAL/SMPTE 170M NTSC)
Sıcaklık Aralığı	
Sıcaklık Aralığı	Sıcaklık aralığı kullanıcı konfigürasyonuna ve/veya üç basamaklı kamera tür numarasına bağlıdır.
Hassasiyet	$\pm 2\text{ °C} / \pm 3,6\text{ °F}$ veya okunan değer $\pm \%2$
Laser LocatIR	
Sınıflandırma	Sınıf 2
Tipi	Yarı iletken AlGaInP diodlu lazer, 1mW/635 nm
Elektrik Güç Sistemi	
Pil Tipi	Şarj edilebilir Li/Ion pil
Pil Çalışma Süresi	1,5 saat gösterge pil durumunu gösterir.
Pil Şarj Ediliyor	Dahili, AC adaptör veya 12 VDC otomobil adaptörü 2 bölmeli masaüstü şarj cihazı
AC ile Çalıştırma	AC adaptör, 90-260 VAC, 50/60 Hz. 12 VDC çıkış
Gerilim	11-16 VDC
Güç Yönetimi	Otomatik kapanma ve uyku modu (seçilebilir)

EK-1. (Devam) FLIR ThermaCam E45 Termal Kamera

Çevresel Spesifikasyonlar

Çalışma Sıcaklığı Aralığı

Kamera tipi 215 ve 247 için; -15 - +45 °C (+5 - +113 °F)

Kamera tipi 243 için; -15 - +50 °C (+5 - +122 °F)

Üç basamaklı kamera tür numarası kamera S/N'deki ilk üç basamaktır.

Saklama Sıcaklık Aralığı -40 - +70 °C (-40 - +158 °F)

Nem Çalışma ve saklama %10-95, yoğunlaşmayan, IEC 359

Blendaj IP 54

Şok 25 g, IEC 68-2-29

Titreşim 2 g, IEC 68-2-6

EMC Uygulanacak EMC standartları üç basamaklı kamera tip numarasına bağlıdır.

Aşağıdaki standartlardan bir ya da daha fazlası geçerlidir:

EN 61000-6-3:2001, EN 61000-6-2:2001, EN 50081 -2 (emisyon), EN 50082 -2 (bağımsızlık), FCC 47 CFR Bölüm 15 B

Üç basamaklı kamera tür numarası kamera S/N'deki ilk üç basamaktır.

Fiziksel Spesifikasyonlar

Ağırlık 0,7 kg (1,54 lb), pil ve 17 mm mercek dahil

Boyut (U x G x Y) 246 x 80 x 135 mm (9,7 x 3,2 x 5,3 "), 17 mm mercek ile

Üçayak Sehpa Standart 1/4 "-20

Muhafaza Plastik ve kauçuk

Haberleşme Arayüzeyleri

USB PC ye resim aktarımı USB Rev 2,0 (tam hızlı 12 Mbit)

RS-232(opsiyonel) PC'ye resim aktarımı

EK-2. HOBOWarePro Nem/Sıcaklık/2 Dış Giriş Kaydedici

Bağıl nem ölçüm aralığı	%5-%95
Hassasiyet	%2,5
Çözünürlük	%0,03
Sıcaklık ölçüm aralığı	-20 - +70 C
Hassasiyet	0,35 C
Çözünürlük	0,03 C
Dış giriş	2 adet
Pil ömrü	1 yıl (kullanıcı değişebilir)
Ölçüleri	7,4 cm x 5,8 cm x 2,2 cm
Ağırlığı	46 gr
Kayıt kapasitesi	43000 ölçüm
Programlanabilir kayıt başlangıç zamanı	
Programlama sırasında pil ömrü göstergesi	
Pil değiştirilmesinde veya bitiminde silinmeyen bellek	
Çalışmayı gösteren kırmızı led	
Ölçüm sıklığı	1 s- 12 h
Bağlantı programı	HOBOWare Lite, HOBOWare Pro
Pil	1 adet CR 2032 lithium 3V
Bağlantı	USB

EK-3. Kestrel 4000NV Ekran Aydınlatmalı, Veri kayıtlı, Sıcaklık, Nem, Basınç, Yükseklik Ölçümleri (Altimetre) ve Rüzgar Hızı Ölçüm Cihazı (Anenometre)

Ölçümler Barometrik Basınç, Basınç Trendi

Altitude (Yükseklik Ölçümü)

Bağıl Nem

Isınma İndeksi

Yoğunluk Rakımı

Çiğ Noktası

Islak hazne sıcaklığı

Rüzgar soğuğu

Hava, su ve kar sıcaklığı ölçümü

Anlık, ortalama ve maksimum rüzgar hızı ölçümü

Teknik Detaylar

Rüzgar Hızı Ölçüm Aralığı	0.4 ... 60.0 m/s 59 ... 11,948 ft/min 1.0 ... 218.0 km/h 0.8 ... 135.0 mph 0.6 118.3 kt (Knots) 0 ... 12 B (Beaufort)
Sıcaklık Ölçüm Aralığı	-45.0 ... 125.0 °C
Çözünürlük	0.1
Hassasiyet	1.0 °C
Basınç Ölçüm Aralığı	8.86 ... 32.48 inHg 300.0 ... 1100.0 hPa / mb
Nem Ölçüm Aralığı	0...100%
Çözünürlük	0.1%
Hassasiyet	3.0%
Yüksekli	-6000 ... 30000 ft -2000 ... 9000 m

EK-3. (Devam) Kestrel 4000NV Ekran Aydınlatmalı, Veri kayıtlı, Sıcaklık, Nem, Basınç, Yükseklik Ölçümleri (Altimetre) ve Rüzgar Hızı Ölçüm Cihazı (Anemometre)

Çözünürlük	50 ft , 15 m
Otomatik Kapanma	15 dakika veya 60 dakika ayarlanabilir
Pil	2 x AAA (Dahil) Ortalama 400 saat ömür
Ebatları	127 x 45 x 28 mm
Ağırlık	102 gr
Max/Ortalama Rüzgar Hızı – Hava Hızı gösterimi	
Bütün değerler için max/min /ortalama ve hafızaya alma fonksiyonu	
2sn...12 saate kadar istenilen zaman aralığında kayıt yapma	
Suya dayanıklı (IP67)	
Bağlantı	Opsiyonel USB software ve veri aktarım kablosu

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : KOÇKAR TUĞLA, Rukiye
 Uyruğu : T.C.
 Doğum tarihi ve yeri : 09.12.1987, Kars
 Medeni hali : Evli
 Telefon : 0 (506) 415 41 39
 e-mail : rkykockar@gmail.com



Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet Tarihi
Doktora	Gazi Üniversitesi / İnşaat Mühendisliği	Devam ediyor
Yüksek lisans	Gazi Üniversitesi / Yapı Eğitimi	2012
Lisans	Bartın Üniversitesi/ İnşaat Mühendisliği	2016
	Gazi Üniversitesi / Yapı Öğretmenliği	2009
Lise	Kars Anadolu Ticaret Meslek Lisesi	2005

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2012-Halen	Kastamonu Üniversitesi	Öğretim Görevlisi
2011-2012	Türközü Oğuzhan End.Mes.Lisesi	Öğretmen
2019-2011	Mamak Battal Gazi End.Mes.Lisesi	Öğretmen

Yabancı Dil

İngilizce

Yayınlar

- Tuğla, R., Tavukçuoğlu, A., and Arslan, M. (2013). *Examination thermal properties and failures of the brick walls by the use of infrared thermography and hot box method.* Application Of Efficient Renewable Energy Technologies in Low Cost Buildings And Construction, 176-194.
- Tuğla R., Tavukçuoğlu A., and Arslan M. (2013). *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, Turkey, 180-199.
- Cemalgil, S., Tuğla, R., and Demirel, C. (2015). *Investigation of the effects of the stone flour on concrete properties in terms of sustainability.* Renewbuild 2015- 2nd International Sustainable Buildings Symposium.
- Çağlar, A., and Tuğla, R. (2016). *Kamu binalarında mantolama sisteminin enerji tasarrufuna etkisi: abana örneği.* 1. Uluslararası Abana Sempozyumu.
- Tuğla R., ve Tavukçuoğlu A., (2016). *Tuğla duvarlarda ısı sorunlarının kızıl ötesi ısı görüntüleme ile belirlenmesi.* 3. Ulusal Yapi Kongresi ve Sergisi Teknik Tasarım, Güvenlik ve Erişilebilirlik, Ankara.
- Tuğla, R. (2017). *Yapı denetimi programı özelinde meslek yüksekokullarında verilen eğitimin iş dünyasına katkılarının incelenmesi.* IX. International Congress of Educational Research.
- Tuğla, R. (2017). *Türkiye’de meslek yüksekokullarındaki müfredat farklarının öğrenciler üzerindeki etkileri.* IX. International Congress Of Educational Research.
- Zeybek, Ü., ve Tuğla, R. (2017). *Betonarme ve ahşap yapıların enerji performansı bakımından karşılaştırılması: kastamonu ili örneği.* 2. International Conference On Civil And Environmental Engineering.
- Tuğla, R., ve Zeybek, Ü. (2017). *Mevcut ve yeni binalarda enerji kimlik belgesi uygulamasının incelenmesi.* 2. International Conference On Civil And Environmental Engineering.
- Yazıcıoğlu, S., Tuğla, R., Ay, S., and Demirel Bahar (2017). *Effect of high temperature on compressive strength of concrete prepared using different types of aggregates.* 3rd International Sustainable Buildings Symposium.
- Tuğla, R., Kılıç-Demircan, R., and Kaplan, G. (2017). *A study on the use of advanced nondestructive testing methods on historic structures.* 3rd International Sustainable Buildings Symposium
- Tuğla, R., and Tavukçuoğlu, A. (2018) *thermal performance assessment of jointings in perforated brick walls by the combined use of infrared thermography and guarded hot box.* International Congress on Engineering and Life Science, Kastamonu, Turkey.
- Koçkar-Tuğla, R., Tavukçuoğlu, A., and Yazıcıoğlu, S. (2019). *Thermal diffusivity measurement with the combined use of quantitative IRT and hot box method-a*

promising method for in-situ assessment. International Congress on Engineering and Life Science, Kastamonu, Turkey.

Hobiler

Kitap okumak, Doğa yürüyüşü yapmak



GAZİ GELECEKTİR..