



## Hygrothermal performance analysis of traditional timber framed houses' exterior walls: Safranbolu & Zeyrek

Seda Nur Alkan\*<sup>ID</sup>, Fatih Yazıcıoğlu<sup>ID</sup>

Department of Architecture, Faculty Architecture, Istanbul Technical University, 34367, Şişli, İstanbul, Türkiye

### Highlights:

- Hygrothermal performance of traditional timber framed houses
- Experimental Study: Guarded hot box
- Numerical study: DELPHIN

### Keywords:

- Traditional timber framed houses
- Exterior wall
- Hygrothermal performance
- Guarded hot box
- DELPHIN

### Article Info:

Research Article  
Received: 09.12.2022  
Accepted: 18.06.2023

### DOI:

10.17341/gazimmfd.1216640

### Acknowledgement:

This study was supported by Istanbul Technical University Scientific Research Projects Coordination Unit. Project Number: 42955

### Correspondence:

Author: Seda Nur Alkan  
e-mail: alkan.sedanur@gmail.com  
phone: +90 212 293 1300-2206

### Graphical/Tabular Abstract

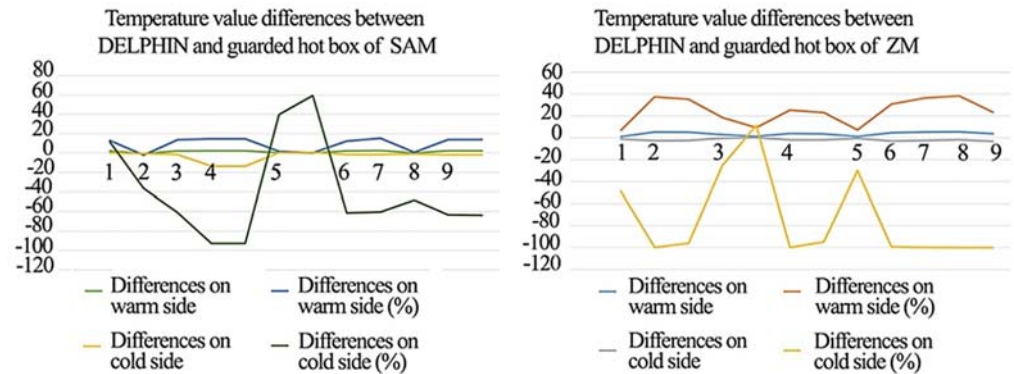


Figure A. Temperature value differences between DELPHIN and guarded hot box of SAM and ZM

**Purpose:** The research goals to investigate hygrothermal performance of traditional timber framed houses' external wall systems in order to contribute to developments of approaches and intervention strategies for performance improvement. Safranbolu (Karabük), where timber framed adobe infill houses are placed, and Zeyrek (Istanbul), where veneered timber framed houses are located, were selected as case studies.

**Theory and Methods:** The method is based on 3 stages including literature review, numerical study, and experimental study. DELPHIN was applied for numerical analysis and guarded hot box apparatus was used for experimental analysis. Material properties analysis of oak, pine, adobe bricks were realized. The data obtained from the experiments were processed by selecting similar material from the DELPHIN library and editing this material. For lime plaster and adobe plaster, similar materials were selected from the DELPHIN library. Under the same conditions (the indoor environment is 20°C, 50% relative humidity, and the outdoor environment is 0°C, 50% relative humidity; initial conditions were set as 20°C and 50% relative humidity), temperature and U values as the results of DELPHIN simulations and hot box tests were compared.

**Results:** For U Value comparison, the difference in ZM is -40.05%, and in SAM it is 71.35%. It is observed that U Value of the wall specimens are not closed to the recommended in TS825. Figure A shows temperature value differences between DELPHIN and guarded hot box of SAM and ZM. According to temperature value data of SAM, the difference between the measured and simulated values on the warm side is negligible compared to the cold side, especially in the wooden parts. On the other hand, while the difference between the measured and simulated values in the adobe parts of the wall specimen is between 12-15% on the warm side. There are points where this difference is more than -60% on the cold side. According to temperature value data of ZM, it can be seen that the points, where the differences between the values are the least on both the warm and cold sides, are the points on the wood. The difference between the values at the points on unfilled is greater on both the warm and cold sides. In this case, it is possible to say that the unfilled parts play an important role on heat movement. Moreover, on the cold side, the difference between the values at these points is close to 100%.

**Conclusion:** According to these results, it is concluded that increase of wall thickness and material variation has directly impacts on the difference between DELPHIN and guarded hot box. Different materials intersections and workmanship are observed as the critical factors. The study may apply as a guide in conservation/restoration/reconstruction projects of traditional timber framed houses to determine negative effects of inefficient hygrothermal performance and suggest improvements for hygrothermal performance.



## Geleneksel ahşap çerçeve sistem konut yapılarında dış duvarların higrotermal performansının değerlendirilmesi: Safranbolu ve Zeyrek örneği

Seda Nur Alkan\*<sup>ID</sup>, Fatih Yazıcıoğlu<sup>ID</sup>

İstanbul Teknik Üniversitesi, Mimarlık Fakültesi, Mimarlık Bölümü, 34367, Şişli, İstanbul, Türkiye

### Ö N E Ç I K A N L A R

- Geleneksel ahşap çerçeve sistem konut yapılarının higrotermal performansı
- Deneysel değerlendirme: mahfazalı sıcak oda
- Sayısal değerlendirme: DELPHIN benzetim çalışması

#### Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi

Geliş: 09.12.2022

Kabul: 18.06.2023

#### DOI:

10.17341/gazimmfd.1216640

#### Anahtar Kelimeler:

Geleneksel ahşap çerçeve sistem konut yapıları, dış duvar, higrotermal performans, mahfazalı sıcak oda, DELPHIN

#### ÖZ

Çalışmanın amacı; Türkiye'deki geleneksel ahşap çerçeve sistem konut yapılarının dış duvar sistemlerinin sayısal ve deneysel yöntemlerle higrotermal performansının değerlendirilerek koruma/restorasyon/rekonstrüksiyon çalışmalarında performans iyileştirme için yapı fiziksel koşulların gözetilerek yaklaşımların ve müdahale stratejilerinin geliştirilmesine katkı sunmaktır. Bu amaçla, kerpiç dolgu ve kaplamalı ahşap çerçeve sistemler seçilmiştir. Belirlenen duvar modellerinin higrotermal performans değerlendirmesinin sayısal değerlendirmesi DELPHIN yazılımı ile, deneysel değerlendirmesi ise TSE Yapı Malzemeleri Yangın ve Akustik Laboratuvarı Müdürlüğü Laboratuvarı'nda bulunan mahfazalı sıcak oda cihazı ile gerçekleştirilmiştir. Higrotermal performans değerlendirmesi için belirlenen tipler üzerinden tasarlanacak duvar modelleri, mahfazalı sıcak oda ölçüleri olan 150 cm x 150 cm deney alanı sınır olarak kabul edilerek tasarlanmıştır. Duvar katmanlaşmalarına göre belirlenen malzemelerin DELPHIN yazılımına işlenmek üzere gerekli özelliklerinin belirlenmesi ile ilgili deneyler İTÜ Mimarlık Fakültesi Yapı Malzemesi Laboratuvarı'nda gerçekleştirilmiştir. Mahfazalı sıcak oda deneylerinden elde edilen sıcaklık ve U değerleri verileri, aynı koşullar altında yapılan DELPHIN simülasyon sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Çalışma, geleneksel ahşap çerçeve sistem konutların koruma/restorasyon/rekonstrüksiyon çalışmalarında kullanılmak üzere; higrotermal performansa bağlı oluşabilecek olumsuzluklar ve iyileştirme önerileri ilgili ön değerlendirme ve tespit noktasında çalışmalara kılavuz olabilecek veri sağlamıştır. Edinilen bilgiler doğrultusunda, DELPHIN yazılımının mevcut durum tespiti ve eğer gerekli ise iyileştirme önerilerinin değerlendirilmesi noktasında bir araç olarak kullanılmasının önemli bir veri sağlayacağı öngörülmektedir.

## Hygrothermal performance analysis of traditional timber framed houses' exterior walls: Safranbolu & Zeyrek

### H I G H L I G H T S

- Hygrothermal performance of traditional timber framed houses
- Experimental study: guarded hot box
- Numerical study: DELPHIN

#### Article Info

Research Article

Received: 09.12.2022

Accepted: 18.06.2023

#### DOI:

10.17341/gazimmfd.1216640

#### Keywords:

Traditional timber framed houses, exterior wall, hygrothermal performance, guarded hot box, DELPHIN

#### ABSTRACT

The study aims to investigate hygrothermal performance of the traditional timber framed houses' external wall systems in Türkiye applying both numerical and experimental methods in order to contribute to developments of approaches and intervention strategies for performance improvement in conservation/restoration/reconstruction projects. For this purpose, adobe infill and veneered timber framed systems were chosen as case study. DELPHIN was applied for the numerical analysis and guarded hot box apparatus in the TSE Building Materials Fire and Acoustic Laboratory Directorate Laboratory was used for the experimental analysis. The wall specimens were designed as 150 cm x 150 cm which is the dimensions of guarded hot. Material properties analysis of the wall layers to be processed into the DELPHIN software was held in ITU Faculty of Architecture Construction Materials Laboratory. Under the same conditions, DELPHIN simulations and hot box tests results of temperature and U values were compared. The study may apply as a guide in conservation/restoration/reconstruction projects of traditional timber framed houses to determine negative effects of inefficient hygrothermal performance and suggest improvements for hygrothermal performance. Depending on the data, it is anticipated that DELPHIN may play significant role to determine the current situation and, if necessary, to investigate performance improvement proposals.

## 1. Giriş (Introduction)

İç ve dış çevreyi birbirinden ayırarak sınır oluşturan dış duvarlar, iç ve dış ortam arasında bir arayüz görevi görerek hem atmosferik koşullara maruz kalmakta hem de iç çevredeki kullanıcı ve kullanım kaynaklı oluşan iç ortam hava koşullarının etkisi altındadır. İç ortamda istenilen iklimsel konfor koşullarının oluşabilmesi için dış duvarın ısı ve nem geçirgenliği, ısı depolama ve hava geçirgenlik özellikleri öncelikli unsurlardandır. Bu durum dikkate alındığında, dış duvarların ısı ve nemsel performansı kritik bir öneme sahiptir. Bu unsurların yapının enerji etkinliğine olan etkisini değerlendirmek için ısı ve nemsel performans analizi kritik bir rol üstlenmektedir. Duvarlardaki ısı ve nem akışının davranışları, maruz kaldıkları iklim koşullarından etkilenir ve enerji tüketimini, iç hava kalitesini ve yaşam döngüsünü etkiler [1]. Isıl ve nemsel performans, en geniş kapsamlı tanımı ile yapının enerji, nem ve hava dengesinin değerlendirilmesi olarak açıklanabilir. Higrotermal performans; ısıma, iletim ve taşıma yolu ile ısı akışımı; buhar difüzyonu ve sıvı taşınımı ile buhar akışımı; doğal, dışsal ve mekanik kuvvetlerle oluşan hava akışımı incelemektedir [2]. Isıl performans gereklilikleri; ısıtma istenen dönemde en az ısı kaybı, soğutma istenen dönemde en az ısı kazancı, ısı depolama özelliği, iç yüzey sıcaklığının istenen düzeyde tutulabilmesi, yüksek ve düşük sıcaklıklara karşı dayanım, ısıl deformasyona karşı dayanım; nemsel performans gereklilikleri; duvar bünyesinde nem birikimi sonucunda meydana gelen fiziksel, kimyasal, biyolojik vb. değişim, bozulma ve hasarların oluşmaması, duvar yüzeyinde nemin birikmesi sonucu görsel bozulmaların olmaması olarak sıralanabilir [3]. Isıl ve nemsel performans; yapı elemanlarının uzun süreli ısı ve neme bağlı performansının değerlendirilmesi ve hizmet süresinin belirlenmesi açısından önemlidir. Isıl kalite ve dayanıklılık açısından yapı performansı; ısı, hava ve nem hareketinden doğrudan etkilenmektedir; ısı kalite U değeri ile değerlendirilirken dayanıklılık biyolojik atak (küf, böcek, çürüme vb.), kimyasal atak (korozyon vb.) ve mekanik bozulmaların (ısı ve nemsel basınç ve gerilmelere, tuz saldırısı, don vb.) tehdidi altındadır [4]. Enerji etkin yapılar için bir kriter olmasının yanında ısı ve nemsel performans, hasta bina konusunda da önemli bir husus olarak karşımıza çıkmaktadır. Yapı kabuğunda zararlı nem birikimi nedeniyle yerel koşullara bağlı olarak biyolojik, kimyasal ve/veya fiziksel bozulmalar meydana gelebilmektedir [15]. Yanı sıra, nem kontrolü ile ilgili bir sorun olması enerji kullanımının artmasına sebep olabilmektedir [6]. Yapı kabuğu ve/veya ısı ve nemsel performansı ile ilgili bir hata olması; enerji kullanımının artması, yapı malzemesinin bozulması ve mantar gibi çeşitli istenmeyen biyolojik yapıların üremesine neden olabilmektedir. Biyolojik büyüme (küf ve odun çürüğü mantarları), korozyon ve duvarda donma-çözülme olayları gibi patolojik durumlar, yapısal bütünlüğü bozarak; aralarında tarihi özelliği olabilen yapı ve yapı malzemelerinde kalıcı kayıplara neden olmakla birlikte kullanıcı sağlığını da etkilemektedir [7]. Kullanıcı sağlık ve konfor koşulları hem kullanılan mekanın hem de yüzeyin bağlı nem değerinin önerilen limit değerlerde kontrol edilmesini gerektirmektedir [8].

Uluslararası literatür incelendiğinde ısı ve nemsel performans ile ilgili çok sayıda çalışma yapıldığı gözlemlenmiştir. Bu çalışmaların ahşap çerçeve sistem yapılarla ilgili olanları genellikle enerji etkin bir yapı kabuğu tasarımı için kullanılan farklı yalıtım malzemelerinin ısı ve nemsel performans analizi üzerine yoğunlaşmaktadır [9-12]. Higrotermal performans üzerine yapılan çalışmalarda deneysel çalışmaların sürelerinin uzun ve zorlu olduğu dikkate alınarak genellikle simülasyon araçları kullanımına ağırlık verildiği [5] bu durumun yanı sıra, pek çok çalışma kapsamında higrotermal simülasyon araçları ile yapılan değerlendirmelerden elde edilen veriler deneysel çalışma verileri ile karşılaştırılarak uygulanabilirliği, güvenilirliği ve doğruluğu araştırılmıştır [10, 13]. Kalamees ve Vinha

[14] farklı yalıtım malzemesi ve buhar kesicilerle tasarlanan 3 farklı ahşap çerçeve dış duvar tipinin ısı ve nemsel performansları, 3 farklı ısı ve nemsel performans değerlendirme aracı (1D-HAM, MATCH, WUFI 2D) ve laboratuvar testleri ile incelemiştir; sonuçları karşılaştırmıştır. Buna göre; bazı durumlarda ölçülen ve hesaplanan değerler arasında farklılıklar olsa dahi kullanılan programların ısı iletimi ve buhar difüzyonu dikkate alınarak yapı elemanlarının nemsel davranışlarının değerlendirilmesinde yararlı araçlar olduğu görülmüştür [14]. Carnonez vd. [15] ahşap çerçeve bir duvardaki su sızıtısının simülasyonu için DELPHIN ve WUFI kullanılarak nem yükü dağılımı karşılaştırılıp deneysel ölçüm sonuçlarıyla doğrulandığı çalışmada, DELPHIN yazılımının yer çekimi etkisini dikkate alması nedeniyle daha gerçekçi bir dağılım gösterdiğini ifade etmişlerdir. Langmans ve Roels [16] çeşitli ahşap çerçeve dış duvar sistemlerinin higrotermal performansını farklı Avrupa iklim koşulları, yalıtım malzemesi, dış duvar hava sızdırmaz malzemeler ve kötü işçilik gibi parametreleri dikkate alarak DELPHIN 5 simülasyon programı ile incelemiştir ve etkilerini açıklamıştır. Martinez [10] yüksek yalıtımlı ahşap çerçeve dış duvarlarda potansiyel higrotermal riskleri ve etkilerini, soğuk iklim koşulları altında DELPHIN bilgisayar benzetimi aracı kullanarak incelemiştir; yapıdaki nem güvenliği ve enerji etkinliği için mühendislerin ve tasarımcıların bilgisayar benzetimi araçlarını kullanmalarının önemini ifade etmiştir. 12 farklı tip ahşap çerçeve sistem duvar örneğinin ısı transfer kapasitesini incelemek amacıyla yapılan araştırma kapsamında teorik hesaplama ve sıcak oda deneyi sonuçlarının verileri karşılaştırılmıştır; deney verileri ile hesaplanan değerlerin birbirine yakın olduğu sonucuna varılmıştır [17]. Fransa'nın Cahors bölgesinde bulunan tarihi yapıların enerji tüketimini azaltmak ve yapılardaki ısı konforu sağlamak amacıyla yapılacak olan iyileştirme çalışması kapsamında farklı yalıtım malzemelerinin uygulanması durumunda ısı ve nemsel performans analizi DELPHIN simülasyon programı ile yapılmıştır; elde edilen sonuçlar doğrultusunda, biyo bazlı yalıtım malzemelerinin mineral yünlere kıyasla ısı ve nemsel performansının daha iyi olduğu kanısına varılmıştır [18]. Bilgisayar benzetimi araçları içerisinde en çok kullanılanlardan biri DELPHIN'dir. Yapılan bir çalışmada, "(program name + hygrothermal)" anahtar kelimesiyle higrotermal analiz yapabilen yazılımlar hakkında Google Scholar, Web of Science, Scopus ve ScienceDirect üzerinde yapılan tarama sonuçlarında en çok kullanılan 2 yazılım olan WUFI 1035, DELPHIN 669 tane İngilizce hakemli dergi çalışmasında yer aldığı açıklanmıştır [19].

Higrotermal performans analizi konusunda ülkemizde yapılan çalışmaların sayısının az olmasının yanı sıra, ısı performans ile ilgili birtakım çalışmalar olmasına rağmen geleneksel ahşap çerçeve sistemlerle ilgili ısı ve nemsel performans değerlendirmesi hakkında detaylı bir çalışmaya rastlanmamıştır. Literatürde yer alan bu çalışmalardan başlıcaları açıklanmıştır. Çiçek [20] yapı düşey dış kabuk bileşenlerinin ısı ve nemsel performansını değerlendirmek üzere, bilgisayar destekli bir deney cihazı geliştirerek yeni bir yöntem önermiştir. Bu noktada, ısı ve nemsel performans değerlendirmesi için deneysel çalışmalara öncü bir yaklaşım sunmuştur. Engin [21] ılıman – nemli iklim bölgelerinde yapı iç ortamında nem etkilerinin belirlenmesinde, mimari tasarım ve inşaa sürecinde kullanılarak tasarımcı ve kullanıcıyı yönlendirebilecek bir bilgisayar programı oluşturmuştur. Yapılarda ısı ve nem etkilerini inceleyen çalışmalar yapılmıştır [22-25]. Alan [26] yalıtım malzemeleri ve bu malzemelerin ısı ve nem etkisi ile ilgili davranışları araştırmak amacıyla nem geçirgenlik özelliklerinin tespiti için ilgili standartlar doğrultusunda bir ölçme cihazı tasarlayıp imal ederek TS-EN 12086 standardına uygun olarak deneyler gerçekleştirmiş ve karşılaştırmalı sonuçları değerlendirmiştir. Sayisal ve deneysel yöntemler uygulanarak higrotermal performans değerlendirilmesi üzerine çalışmalar yapılmıştır [27, 28] olmasına karşın çoğunlukla

araştırmalarda sayısal yöntemle başvurulmuştur [29-32]. Mıhlayanlar ve Umaroğulları [33] geleneksel konutlarda kagir yığma taş duvar kesitinin Edirne meteorolojik verilerini kullanarak, WUFI 2D-3 simülasyon programı ile yıllık sıcaklık, su ve nem değerlerini araştırmıştır. Ahşap iskelet sistemde, farklı özellikteki malzemelerle oluşturulan kesitlerin belirlenen noktalarda ısı ve nem geçişi incelenmiş, bu sistemdeki davranışların değerlendirilmesine katkı sunulmuştur [34]. Samancı [35] ahşap çerçeveli duvar ve çapraz tabakalı masif ahşap duvarların ısı ve nemsel performanslarını incelemek amacıyla İstanbul-Riva’da yapılan alan çalışmasında tespit edilen 5 farklı tip ahşap duvar örneğini WUFI-2D benzetim aracı kullanarak belirlenen parametreler kapsamında incelemiştir. Karadeniz Bölgesi’ndeki geleneksel ahşap yapısı çerçevesinde su ve ısıtan tanımlanarak yapıya girişi ve verdikleri hasarlar açıklanmış; buna yönelik alınması gereken tedbirler incelenmiştir [36]. Tunca [37] geleneksel ahşap konut yapılarında su ve nem kaynaklı bozulmaları irdelemiş, Taraklı geleneksel ahşap konut yapıları hakkında üç adet tescilli ev üzerinden araştırmış ve bunlardan birini seçerek su ve nem kaynaklı bozulmaların nedeni ve çözümüne ilişkin yaklaşımları değerlendirmiştir. Yavan [34] yapı elemanlarında ısı ve nem kaynaklı oluşan bozulmalar ve yalıtım ile ilgili bilgi sunarak tasarımcı, uygulayıcı ve kullanıcı için bu konuların çözümü hakkında izlenebilecek yolları ve çözüm önerilerini değerlendirmiştir.

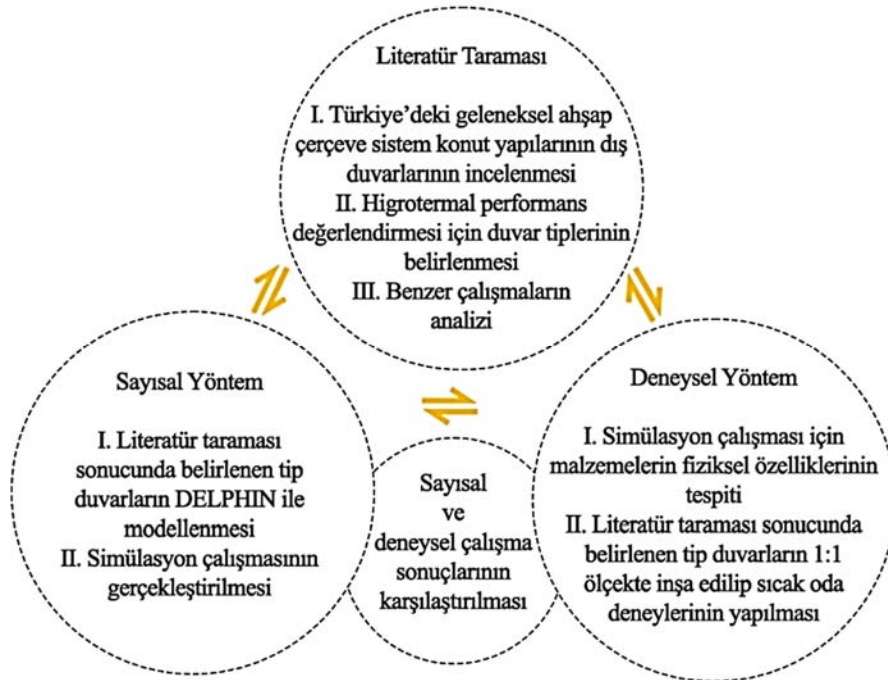
Yukarıda detaylı olarak açıklandığı üzere, ülkemizde ısı ve nemsel performans değerlendirme ile ilgili yapılan çalışmalar oldukça kısıtlı olmakla birlikte araştırmalar; yöntemlerin uygulanması, vaka çalışmaları ile değerlendirmelerin yapılmasına ya da çağdaş malzeme ve/veya yapı örnekleri üzerine yoğunlaşmaktadır. Literatürde, geleneksel ahşap çerçeve sistemlerin ısı ve nemsel performansının değerlendirildiği kapsamlı bir çalışmaya rastlanmamış; Türkiye’deki geleneksel ahşap çerçeve konut yapılarının dış duvar tiplerinin ısı ve nemsel performansını inceleyen çalışmaların eksikliği gerekçesiyle bu çalışmanın literatüre katkı sağlaması amaçlanmıştır. Bu araştırma, Türkiye’deki geleneksel ahşap çerçeve sistem konut yapıları ile ilgili halihazırda devam eden ve/veya yapılması planlanan koruma/restorasyon/rekonstrüksiyon çalışmalarında dış duvarların

ısı ve nemsel performans değerlendirmesi kapsamında başvurulabilecek temel verileri sağlaması öngörüldüğü için önemli bir çalışma olarak ortaya konmaktadır. Yapılan çalışmanın en temel amaçlarından biri, Türkiye’deki geleneksel ahşap çerçeve konut yapılarının dış duvarlarının ısı ve nemsel performanslarını inceleyerek mevcut durumun tespit edilmesidir. Bu sayede; koruma/restorasyon/rekonstrüksiyon projelerinde, elde edilen veriler doğrultusunda yapıların uzun vadede ısı ve nemsel performansını olumsuz etkileyen su buharı yoğunlaşması sonucu oluşabilecek biyolojik, fiziksel, kimyasal bozulmaların önüne geçilerek yapının ömrünün uzamasına katkı sağlanmasının yanı sıra; enerji etkinliğinin değerlendirilmesi ve geliştirilmesi noktasında bilgi sağlayacaktır. Bununla birlikte, ısı ve nem kaynaklı ısı ve nemsel performansı olumsuz etkileyen durumlara maruz kalan yapıların sağlamlığı olumsuz etkilenip deprem yükleri altında beklenen performansı gösteremeyebilir. Özellikle, geleneksel ahşap çerçeve yapıların büyük bölümünde kullanılan malzemenin ahşap olduğu ve bu nedenle ısı ve nemden doğrudan etkilendiği dikkate alındığında; bu konunun koruma/restorasyon/rekonstrüksiyon çalışmaları için önemli olduğu saptanmıştır.

### 1.1. Metodun Uygulanması (Method Application)

Bu çalışmanın metodu; literatür araştırması, sayısal ve deneysel araştırma yöntemlerini kapsayan 3 temel aşamadan oluşmaktadır (Şekil 1).

Literatür taraması, gerekli duyulan teorik bilginin edinilmesine katkı sağlamasının yanı sıra, güncel araştırmaların da takip edilebilmesi için araştırma boyunca süreklilik arz etmektedir. Literatür taraması, genel olarak 3 üst başlık altında yapılmıştır: Türkiye’deki geleneksel ahşap çerçeve konut yapıları, uluslararası literatürde ısı ve nemsel performans araştırmaları ve Türkiye’de ısı ve nemsel performans araştırmaları. Türkiye’deki geleneksel ahşap çerçeve konut yapılarının araştırılması için yapılan literatür taraması çoğunlukla ulusal kaynakların taranmasına yönelik olmakla birlikte bu alanda yazılmış yüksek lisans ve doktora çalışmaları ağırlıklı olarak



Şekil 1. Metodun uygulanması (Method Application)

incelenmiştir. Dış duvarların ısı ve nemsel performans değerlendirilmesi ile ilgili ulusal ve uluslararası çalışmalarda ülkemizde bu alanda yapılan araştırmaların eksikliği dikkat çekmektedir. Buna ek olarak, özellikle ısı ve nemsel performans değerlendirme yöntemlerine yönelik uluslararası kaynaklar incelenerek araştırmanın sağlıklı yürütülmesi için aşamalar detaylı planlanmıştır.

Literatür çalışması kapsamında elde edilen bilgiler çerçevesinde; ısı ve nemsel performans değerlendirmesi için hesaplama, sayısal yöntem, laboratuvar ortamında yapılan deneyler (testler) ve yerinde ölçüm (alan ölçümleri) olmak üzere 4 farklı yöntemin uygulandığı tespit edilmiştir. Bu yöntemler içinde sayısal yöntem (simülasyon/bilgisayar benzetimi); araştırmalarda en çok kullanılan, zaman ve bütçe açısından en avantajlı olduğu belirlenmiş yöntemdir. Laboratuvar ortamında yapılan deneyler ise ikinci olarak en çok kullanılan yöntemdir, zaman açısından yerinde ölçüm metoduna kıyasla daha avantajlı olmasına karşın sayısal yöntemle göre daha maliyetlidir. Literatürde, çoğunlukla laboratuvar ortamında yapılan deneyler, sayısal yöntemle birlikte uygulanarak verilerin kıyaslanıp araştırma sonuçlarının doğruluğu ve güvenilirliği değerlendirilmektedir. Sayısal yöntem ile oluşturulan temsili model verilerini doğrulamak için deneysel ölçümler ile karşılaştırılması gereklidir [39]. Hesaplama yönteminin ise kısıtlı veriler sağlaması nedeniyle kapsamlı bir ısı ve nemsel performans analizi için tek başına yeterli olmadığı literatürde yer alan çalışmalarda vurgulanmıştır. Elde edilen bilgiler ışığında, bu çalışmada ısı ve nemsel performans değerlendirmesi için sayısal ve laboratuvar ortamında yapılan deney yönteminin birlikte kullanılmasına karar verilmiştir. Bu noktada, laboratuvar ortamında elde edilen verilerin önemli ve özgün bir kaynak oluşturacağı öngörülmektedir. Hens [4] hazırladığı raporun kazanımları arasında ısı, hava ve nem ile ilgili deneysel çalışmaların daha iyi altyapı oluşturduğunu belirtmiştir. Bu nedenle, yaygın olarak örneklerinin görüldüğü ahşap çerçeve kerpiç dolgu ve örneklerinin sık görülmeyen ancak dolgu ve dolgu olmayan geleneksel ahşap çerçeve duvarın higrotermal davranışının incelenmesine olanak sağlaması nedeniyle; ahşap çerçeve kaplamalı olmak üzere 2 dış duvar örneği, deneysel yöntem (mahfazalı sıcak oda düzeneği) ve sayısal yöntem (DELPHIN bilgisayarlı benzetim aracı) kullanılarak higrotermal performans değerlendirmesi gerçekleştirilmiştir.

Sıcak oda düzeneği ile ısı ve nemsel performans değerlendirmesi için "TS EN ISO 8990 Isı yalıtımı- Kararlı durum ısı iletim özelliklerinin tayini- Kalibre edilmiş ve mahfazalı sıcak kutu (ISO 8990:1994)" standardı incelenmiştir. Bu standartta iki yöntem belirtilmiştir: kalibre edilmiş sıcak oda (kutu) ve mahfazalı sıcak oda (kutu); bu yöntemlerle homojen ve/veya heterojen duvarlar için gerçek ölçülerinde değerlendirme yapılabileceği belirtilmiştir [40]. Bu çalışma

kapsamında deneylerin gerçekleştirildiği TSE Yapı Malzemeleri Yangın ve Akustik Laboratuvarı Müdürlüğü Laboratuvarı'nda bulunan sıcak oda düzeneği; mahfazalı odadır (Şekil 2).

TSE Yapı Malzemeleri Yangın ve Akustik Laboratuvarı Müdürlüğü Laboratuvarı'nda bulunan mahfazalı sıcak oda düzeneğinde 150 cm x 150 cm bir alanda duvarın higrotermal performans deneyi gerçekleştirilmektedir. Bu nedenle, vaka çalışması kapsamında duvar örneklerinin ölçüleri 150 cm x 150 cm olarak tasarlanmıştır. Higrotermal performans değerlendirmesi yapılacak olan duvar örnekleri opak olarak tasarlanmış, saydam yüzeyler bu çalışmada dikkate alınmamıştır. Bunun gerekçeleri şu şekildedir:

- Buhar difüzyonu, duvarın opak kısımlarında meydana gelmektedir [3].
- Ayrıca, sıcak oda deneyleri için başvuru TS EN ISO 8990 standardında belirtildiği üzere, pencereler özel deney süreçlerine tabii tutulmaları gerektiği için bu çalışma kapsamında tasarlanan deney numunelerinde kapsam dışı bırakılmıştır.

Sayısal ve deneysel yöntem verilerinin karşılaştırılmasının yapılabilmesi için 2 önemli kriter söz konusudur. Bunlardan ilki ölçüm noktalarının belirlenmesi ve her iki yöntemde aynı noktalardan verilerin sağlanmasıdır. Bunun için tasarlanan duvar modelleri üzerinde duvarın iç ve dış yüzeylerinde kritik noktalar tespit edilmiştir. Sayısal yöntemde bu noktalardaki değerlere ilişkin verilerin elde edilmesi için yatay ve düşey düzlemde bu noktalardan geçen kesitlerin DELPHIN yazılımı ile modelleri yapılmıştır. Deneysel yöntem için ise, inşa edilen duvar modelleri üzerinde belirlenen bu noktalara termocouple yerleştirilerek ölçümler yapılmıştır. İkinci önemli kriter ise, sayısal ve deneysel yöntemde malzeme özelliklerinin aynı olmasıdır. Bu durumda, deneysel yöntem için duvar inşasında kullanılan malzeme özelliklerinin sayısal yöntemde bilgisayarlı benzetimde malzeme özellikleri olarak aynı tanımlanması gerekmektedir. Bunun için malzemelerin DELPHIN yazılımında gerekli olan fiziksel özellikleri tespit edilmiş ve bilgisayarlı benzetimde malzeme özellikleri olarak işlenmiştir. Deneysel yöntemde ve sayısal yöntemde kullanılan malzeme özelliklerinin aynı olması, verilerin aynı şartlar altında karşılaştırılmasını sağlamış ve çalışmanın özgünlüğüne katkı sunulmuştur. Aksi takdirde, aynı malzeme özellikleri değerlendirilemeyeceği için farklı yöntemlerden elde edilen sonuçların karşılaştırılması doğru veri sunamayabilirdi. Son olarak, bu iki değerlendirme yönteminden elde edilen verilerin birbirleri ile olan ilişkisi incelenerek sonuçlar değerlendirilmiştir. Yapılan inceleme sonucunda, her iki yöntemden elde edilen veriler arasında yüzdelik fark hesaplanmıştır.

Bu çalışmada sayısal yöntem ve laboratuvar ortamında yapılan deney yöntemi birlikte kullanılmıştır. Literatür çalışması kapsamında incelenen çalışmalarda, sayısal değerlendirme yönteminin



Şekil 2. TSE Yapı Malzemeleri Yangın ve Akustik Laboratuvarı Müdürlüğü Laboratuvarı'nda bulunan mahfazalı sıcak oda düzeneği (Guarded Hot Box Apparatus in Turkish Standards Institution Construction Materials Fire and Acoustic Laboratory)

doğruluğunu gösteren veriler elde edilmiş olsa da genel yaklaşım; sayısal verilerin laboratuvar ortamında yapılan deney ve/veya yerinde ölçüm yöntemiyle elde edilen verilerle karşılaştırılması yönündedir. Bu çalışmada olduğu gibi yapı bileşenleri homojen olmadığında, ısı ve nemsel performansın doğru değerlendirme yapılabilmesi için farklı yaklaşımların kullanılması gerekmektedir. Sayısal değerlendirmeler, bir yanıtı temsil etmekle birlikte bu yöntemlerin deneysel doğrulamalarla tamamlanması gerekmektedir [41].

## 2. Duvar Örneklerinin Tasarlanması (Design Process of Wall Specimens)

Çalışma kapsamında ahşap çerçeve kerpiç dolgu konut örneklerinin ülkemizde en sık görüldüğü başlıca yerlerden biri olan Safranbolu (Karabük) ve ahşap çerçeve kaplamalı konut örneklerinin olduğu Zeyrek (İstanbul) yapılan vaka çalışması kapsamında higrotermal performans değerlendirmesi için seçilmiştir. Bu bağlamda, higrotermal performans analizi için tasarlanacak duvar tipleri belirlenirken, cephe örneklerinin analizleri hakkında kaynak bilgi içeren çalışmalar incelenmiştir. Bunun sonucunda, duvarların dolgulu/dolgunsuz ve ahşap alanları tespit edilmiş; vaka çalışması için duvar modelleri, bu veriler doğrultusunda tasarlanmıştır.

Aktaş [42] "Evaluation of Seismic Resistance of Traditional Ottoman Timber Frame Houses" başlıklı doktora tez çalışmasında "hıms" tekniği ile inşa edilen Safranbolu evlerinden farklı geometrik kurgu ve malzeme örneği olan 1:1 ölçekli 8 adet çerçevenin, dolgunsuz ve dolgulu/kaplamalı şekilde deprem yükü altındaki davranışını araştırmıştır. Çalışma kapsamında oluşturulan 8 adet çerçeveden Şekil 3'te soldan itibaren yer alan sırasıyla Frame 2, Frame 5 ve Frame 8 kodlu 3 tanesi seçilmiştir. Frame 2'nin ahşap alan oranı %36.03, dolgu alan oranı %63.97, Frame 5'in ahşap alan oranı %42.72, dolgu alan oranı %57.28, Frame 8'in ahşap alan oranı %46.60, dolgu alan oranı %53.40 olarak hesaplanmıştır.

Saatci [43] "Türkiye'de Kullanılan Farklı Tipteki Geleneksel Ahşap Taşıyıcı Sistemlerin Yapı Davranışına Etkilerinin Karşılaştırmalı İncelenmesi" başlıklı yüksek lisans tez çalışmasında yer alan ahşap çerçeve kerpiç dolgu tekniği ile inşa edilen Safran Konak (eski adıyla Bağlar Köşkü) kuzeydoğu cephesinin giriş kat ve 1. Kat cephesi incelenmiş, giriş kat cephesinde ahşap alan oranı %39.88, dolgu alan %60.12; 1. Kat cephesinde ahşap alan oranı %43.27, dolgu alan %56.73 olarak tespit edilmiştir (Şekil 4).

Acar [44] "19. Yüzyılın İkinci Yarısında İstanbul'da Ahşap Yapım Sistemlerinin Değişimi: Gelenekselin Rasyonelleştirilmesi" başlıklı doktora tez çalışmasında fotoğrafı yer alan ahşap çerçeve kaplamalı tekniği ile inşa edilen cephe örneği üzerinden kuramsal bilgilerle uyarlanan cephede ahşap alan oranı %25.61, dolgunsuz alan %74.39 olarak tespit edilmiştir (Şekil 5).

Eldem [45] "Yapı" kitabında ahşap çerçeve yapı sistemlerine ait bilgiler incelenmiş, Şekil 6'da soldan itibaren yer alan örneklerde sırasıyla ahşap alan oranı %35.88, dolgunsuz alan %64.12; ahşap alan

oranı %43.63, dolgunsuz alan %56.37, ahşap alan oranı %43.89, dolgunsuz alan %56.11 olarak tespit edilmiştir.



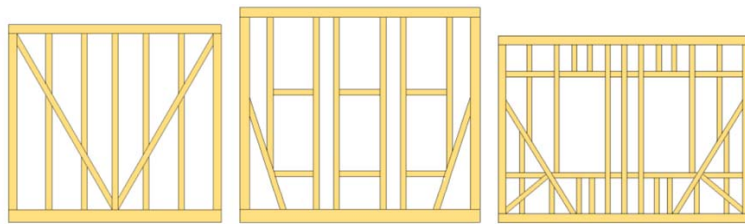
Şekil 4. Safran Konak (Safran Mansion) (Saatci [43])



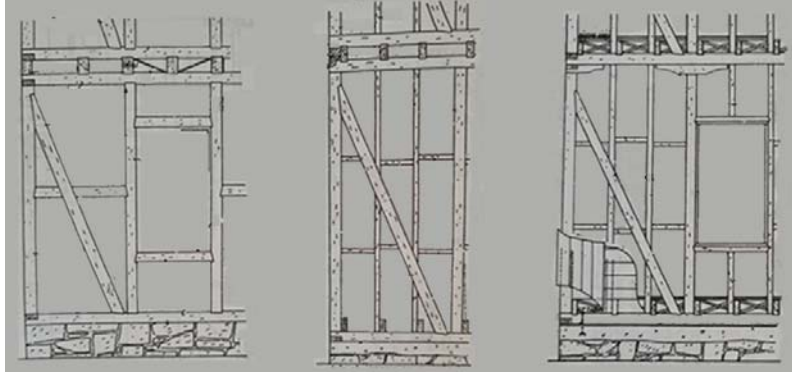
Şekil 5. Zeyrek'te konut duvarı  
(A facade example in Zeyrek) (Acar [44])

İstanbul'da bir cephe örneği, kuramsal bilgilerle uyarlanarak incelenmiş, ahşap alan oranı %32.13, dolgunsuz alan %67.87 olarak tespit edilmiştir (Şekil 7).

Duvar tiplerinin tasarımı üzerine yapılan literatür çalışmasından elde edilen veriler yukarıda açıklanmıştır. Bu veriler doğrultusunda incelenen örneklerin ahşap alan ve dolgu/dolgunsuz alan oranları ile ilgili sonuçlar Tablo 1'de sunulmuştur.



Şekil 3. Safranbolu cephe örnekleri (Façade examples in Safranbolu) (Aktaş [42])



Şekil 6. Ahşap çerçeve yapı sistemleri (Timber framed construction systems) (Eldem [45])



Şekil 7. İstanbul'da bir cephe örneği (A façade example in İstanbul)

Bu çalışmada higrotermal performansı değerlendirilen ahşap çerçeve kerpiç dolgu ve ahşap çerçeve kaplamalı konut dış duvar tipleri; Tablo1'deki oranlar, literatürde tespit edilen duvar katmanlaşmaları, malzeme ve detaylar dikkate alınarak vaka çalışması için TSE Yapı Malzemeleri Yangın ve Akustik Laboratuvarı Müdürlüğü Laboratuvarı'nda bulunan mahfazalı sıcak oda düzeneğinin deney alanı ölçüleri olan 150 cm x 150 cm boyutlarında tasarlanmıştır. Tasarlanan duvar tiplerine ait oranlar Tablo2'de gösterilmiştir.

Safranbolu için tasarlanan duvar modeli SAM, Zeyrek için tasarlanan duvar modeli ZM olarak isimlendirilmiştir. SAM duvar katmanları dıştan içe doğru kireç sıva 3 cm, kerpiç sıva 3 cm, ahşap çerçeve kerpiç dolgu 12 cm, kireç sıva 2 cm, ZM duvar katmanları dıştan içe doğru ahşap kaplama 3 cm, ahşap çerçeve 10 cm, bağdadi çita 1 cm, kireç sıva 2 cm'dir. SAM ve ZM duvar katmanları, ölçüm noktaları ve DELPHIN modeli için kesit çizimleri Şekil 8'de gösterilmiştir.

### 3. Deneysel Çalışma (Experimental Study)

Bu araştırmanın deneysel çalışmaları iki kısımdan oluşmaktadır: (1) malzeme özelliklerinin analizi ve (2) mahfazalı sıcak oda deneyleri. Malzeme özelliklerinin analizi için deneyler, İTÜ Mimarlık Fakültesi Yapı Malzemeleri Laboratuvarı'nda; mahfazalı sıcak oda deneyleri ise TSE Yapı Malzemeleri Yangın ve Akustik Laboratuvarı Müdürlüğü Laboratuvarı'nda gerçekleştirilmiştir. Malzemelerin (meşe, sarıçam ve kerpiç tuğla) ısı iletkenliği Düzce Üniversitesi Bilimsel ve Teknolojik Araştırmalar Uygulama ve Araştırma Merkezi tarafından ölçülmüştür.

#### 3.1. Malzeme Özelliklerinin Analizi (Analysis of Material Properties)

Belirlenen duvar tiplerinin higrotermal performanslarının sayısal ve deneysel yöntemlerle incelenip sağlıklı bir karşılaştırma yapılabilmesi

için inşa edilen duvar modellerindeki malzemelerin özelliklerinin bilgisayarlı benzetimin yapılacağı DELPHIN yazılımına işlenmesi gerekmektedir. Bu noktada malzemelerinin fiziksel özelliklerinin belirlenmesi için laboratuvar koşullarının el verdiği ölçüde deneyler gerçekleştirilmiştir. Çalışma kapsamında vaka çalışması için seçilen geleneksel ahşap çerçeve dış duvar örneklerinde kullanılan malzemeler ahşap (meşe, sarıçam), kerpiç tuğla, bağdadi (çita + sıva), kireç sıva, kerpiç sıva olarak tespit edilmiştir. Bağdadi için kullanılan çita sarıçamdan olacağı için sarıçam özellikleri dikkate alınmıştır. Bağdadi için kullanılan sıva, kireç sıva ile aynıdır. Duvar katmanlaşmasındaki bağdadi sıva, kireç sıva ve kerpiç sıva için DELPHIN kütüphanesinden benzer malzemeler seçilerek tanımlama yapılmıştır. Meşe, sarıçam ve kerpiç tuğla için görünür yoğunluk (birim hacim kütlesi), kılcal su emicilik katsayısı, açık gözeneklilik (görünür porozite), buhar difüzyon direnç faktörü ve higroskopik sorpsiyon (%80 bağıl nemde) değerlerinin belirlenmesi için yapılan deneyler İTÜ Mimarlık Fakültesi Yapı Malzemesi Laboratuvarı'nda gerçekleştirilmiştir. Bunun sonucunda deneylerden elde edilen veriler, DELPHIN kütüphanesinden benzer malzeme seçilerek bu malzemenin düzenlenmesiyle işlenmiştir. Tespit edilen değerler haricinde DELPHIN yazılımında malzeme özelliklerinin düzenlendiği ekranda çıkan malzeme özellikleri, seçilen benzer malzemenin değerleri sabit tutularak işleme alınmıştır. Deneyleri yapılacak olan malzemeler rastgele yöntemle temin edilmiştir. Ahşap elemanlar, rastgele kereste olarak İstanbul'da satış yapan bir keresteciden; kerpiç tuğla için Eskişehir'de üretim yapan bir firmadan, İstanbul'daki bir satıcıdan temin edilmiştir.

Numunelerin görünür yoğunluk değerlerini belirlemek için TS EN 1936 [46] standardından yararlanılmıştır. Görünür yoğunluk değeri tespiti için numuneler, sabit kütleye ulaşana kadar 100°C etüvde kurutma işlemine tabii tutulduktan sonra oda sıcaklığına gelinceye kadar desikatörde soğutulmuştur. Oda sıcaklığına ulaşılacak numunelerin kuru kütlesi ( $m_d$ ), 0.01 grama duyarlı hassas terazide tartılarak, boyutları ise 0.1 mm duyarlılıkta tayin edebilen ölçü aleti ile belirlenerek kaydedilmiştir. Görünür yoğunluk, Eş. 1 yardımı ile hesaplanmıştır.

$$\rho_b = \frac{m_d}{a_d \cdot b_d \cdot l_d} = \frac{m_d}{V_d} \quad (1)$$

Eşitlikte;

$\rho_b$  : Numunenin görünür yoğunluğu ( $\text{kg/m}^3$ ),  
 $a_d, b_d, l_d$  : Kuru deney numunesinin boyutları (m),  
 $m_d$  : Deney numunesinin kuru kütlesi (kg),  
 $V_d$  : Deney numunesinin kuru hacmi ( $\text{m}^3$ ) değerlerini ifade etmektedir.

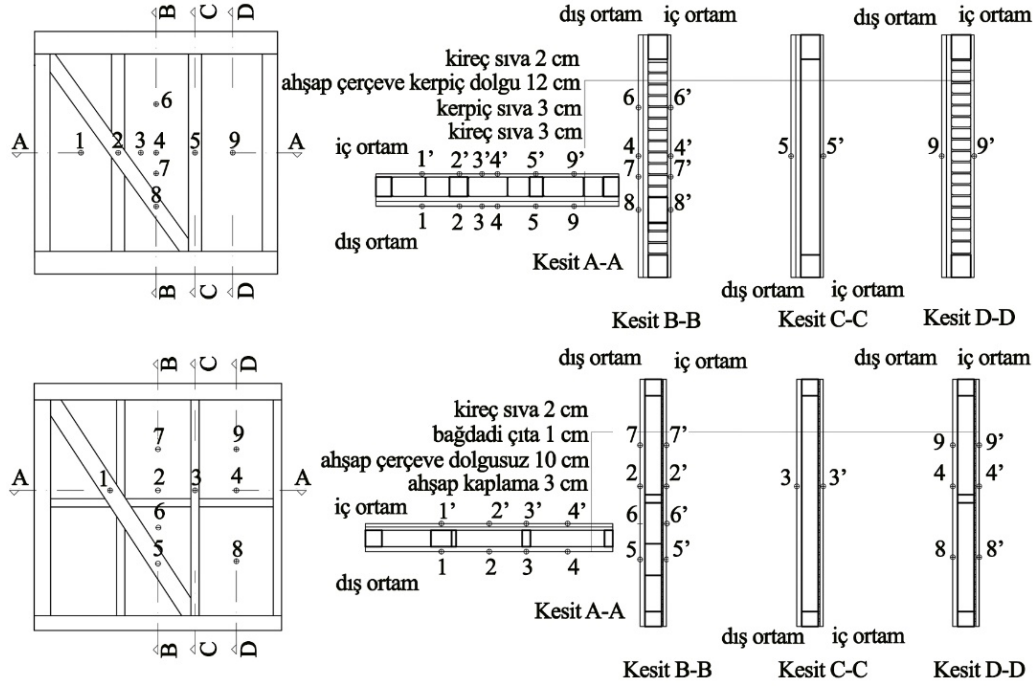
Kılcal su emicilik katsayısını belirlemek için TS EN 1925 [47] standardından yararlanılmıştır. Kılcal su emicilik katsayısının

**Tablo 1.** İncelenen çalışmalara ait sonuçlar (Results of the analysis)

Kaynak	Cephe alanı cm <sup>2</sup>	Penceresiz cephe alanı cm <sup>2</sup>	Dolgu alan / Dolgunsuz alan cm <sup>2</sup>	Ahşap alan cm <sup>2</sup>	Dolgu alan %	Ahşap alan %	
Safranbolu	Aktaş (2011)	120127.18	120127.18	76841.88	43285.3	63.97	36.03
	Aktaş (2011)	122100	100176	57382.82	42793.18	57.28	42.72
	Aktaş (2011)	125972	102572	54777.62	47794.38	53.40	46.60
	Saatci (2020)	170890.08	147613.68	88750.6	58863.08	60.12	39.88
	Saatci (2020)	183150	142200	80668.52	61531.48	56.73	43.27
	<i>Ortalama</i>				<i>Ortalama</i>	<i>58.30</i>	<i>41.70</i>
Zeyrek	Acar (2015)	145250	145250	108054.9	37195.1	74.39	25.61
	Eldem (2016)	102267.8	82127.8	52657.7	29470.1	64.12	35.88
	Eldem (2016)	45892	45892	25868.2	20023.8	56.37	43.63
	Eldem (2016)	69583	58453	32798.45	25654.55	56.11	43.89
	Yazıcıoğlu (2021)	142912	142912	96999.63	45912.37	67.87	32.13
	<i>Ortalama</i>				<i>Ortalama</i>	<i>63.77</i>	<i>36.23</i>

**Tablo 2.** Tasarlanan duvar tiplerine ait oranlar (Percentage of the wall specimens)

Duvar Tipi	Cephe alanı cm <sup>2</sup>	Dolgu alan / Dolgunsuz alan cm <sup>2</sup>	Ahşap alan cm <sup>2</sup>	Dolgu alan %	Ahşap alan %
Safranbolu Model	22500.00	12865.22	9634.78	57.18	42.82
Zeyrek Model	22500.00	14307.01	8192.99	63.59	36.41

**Şekil 8.** SAM ve ZM duvar katmanları, ölçüm noktaları ve DELPHIN modelleri için kesit çizimleri  
(Technical drawings showing wall layers, measurement points and sections for DELPHIN models)

belirlenmesi için numuneler, sabit kütleye ulaşana kadar 100°C etüvde kurutma işlemine tabii tutulduktan sonra oda sıcaklığına gelinceye kadar desikatörde soğutulmuştur. Oda sıcaklığına ulaşıldığında, numunelerin kuru kütlesi ( $m_d$ ) 0.01 grama duyarlı hassas terazide tartılarak kaydedilmiştir. Bir gün süreyle ortama bırakılan numuneler tekrar tartılmıştır. Numuneler, alt yüzeylerine altlarında kısmen mesnet görevi görecek olan dayanakların üzerine yerleştirilerek suyun tam olarak temas edebilmesi için ( $3 \pm 1$ ) mm yüksekliğe kadar su dolu kaba yerleştirilmiş ve kronometre çalıştırılmıştır. Her tartım işleminden önce, numunelerin suyla temas eden yüzeyindeki su

damlacıkları nemli bir bezle alınarak ölçümün sağlıklı yapılması sağlanmıştır. Tartımdan hemen sonra numuneler hızlıca kaba geri konmuş ve belirlenen zamanda aynı işlemler tekrar edilmiştir. Bu işlemler gerçekleştirilirken belirlenen sürelerle uyulabilmesi için numuneler belli bir sıraya konarak işlemler uygulanmıştır. Kılcal su emicilik katsayısının belirlenmesi için yapılan deney sonucunda elde edilen veriler doğrultusunda, kılcal su emicilik katsayısı Eş. 2 ile hesaplanır.

$$N = \frac{m_i - m_d}{A \cdot \sqrt{t_i}} \quad (2)$$



Eşitlikte;

N : Numunenin kılcal su emicilik katsayısı ( $\text{kg/m}^2\text{s}^{1/2}$ ),  
 $m_d$  : Deneysel numunesinin kuru kütlesi (kg),  
 $m_i$  : Deneysel numunesinin deneydeki su emmiş kütlesi (kg),  
 $A$  : Suyu batırılmış yüzeyin alanı ( $\text{m}^2$ ),  
 $t_i$  : Deneysel başlangıcından ardışık  $m_i$  kütlelerinin ölçüldüğü süreler (s) değerlerini ifade etmektedir.

Numunelerin açık gözeneklilik değerlerini belirlemek için TS EN 1936 [46] standardından yararlanılmıştır. Açık gözeneklilik değerinin belirlenmesi için atmosfer basıncı altında su emme deneyi gerçekleştirilmesi gerekmektedir. Numuneler, sabit kütleyle ulaşılan kadar  $100^\circ\text{C}$  etüvde kurutma işlemine tabii tutulduktan sonra oda sıcaklığına gelinceye kadar desikatörde soğutulmuşlardır. Oda sıcaklığına ulaşıldığında, numunelerin kuru kütlesi ( $m_d$ ) 0.01 grama duyarlı hassas terazide tartılarak kaydedilmiştir. Bir gün süreyle ortama bırakılan numuneler tekrar tartılmıştır. Sonrasında numuneler, yavaşça üzeri tamamen su ile örtülecek şekilde kaba yerleştirilmiş ve kronometre çalıştırılmıştır. 24 saat sonunda, numunelerin suya doymuş kütleleri ( $m_s$ ) ve su içindeki kütleleri ( $m_h$ ) 0.01 grama duyarlı hassas terazide tartılarak kaydedilmiştir. Numunelerin açık gözeneklilik değerleri Eş. 3 kullanılarak hesaplanmıştır.

$$P_o = \frac{m_s - m_d}{m_s - m_h} \quad (3)$$

Verilen eşitlikte;

$p_o$  : Numunenin açık gözenekliliği ( $\text{m}^3/\text{m}^3$ ),  
 $m_d$  : Kuru deneysel numunesinin kütlesi ( $\text{m}^3$ ),  
 $m_s$  : Suyu doymuş deneysel numunesinin kütlesi ( $\text{m}^3$ ),  
 $m_h$  : Suyu doymuş deneysel numunesinin su içindeki kütlesi ( $\text{m}^3$ ) değerlerini ifade etmektedir.

Açık gözenekliliğin birimi % değeri olarak hesaplanmaktadır ancak DELPHIN yazılımında bu değer  $\text{m}^3/\text{m}^3$  olarak istendiği için formül buna göre düzenlenerek hesaplamalar yapılmıştır.

Higroskopik sorpsiyon deneyi için TS EN ISO 12570 [48] ve TS EN ISO 12571 [49] standartlarından yararlanılmıştır. Bu standart, bina malzemeleri ve mamullerinin farklı bağıl nem değerleri dikkate alınarak higroskopik su emme eğrisinin çizilmesini açıklamaktadır. DELPHIN yazımı için gerekli olan veri %80 bağıl nemdeki higroskopik sorpsiyon değeridir. Ancak bu bağıl nem durumu için tariflenen bir deney koşulu olmadığından bu değeri elde etmek için standartta belirtilen %75 ve %85 bağıl nem koşulları sağlanmış ve bu değerlerin ortalaması alınarak malzemelerin %80 bağıl nemde higroskopik sorpsiyon değeri bulunmuştur. Desikatör içinde gerekli bağıl nemi sağlamak için uygun doymuş sulu çözeltiler standartta açıklandığı şekilde oluşturulmuştur. %75 bağıl nem koşullarını oluşturmak için  $100^\circ\text{C}$  suya her 100 ml başına 39,12 g NaCl olmak üzere, desikatördeki çözelti yüksekliğini standartta belirtildiği üzere 30 mm – 50 mm arasında sağlamak için  $100^\circ\text{C}$ 'de 1000 ml suya 391,2 g NaCl kullanılarak bir çözelti hazırlanmış ve desikatöre konmuştur. %85 bağıl nem koşullarını oluşturmak için  $20^\circ\text{C}$  suya her 100 ml başına 34,7 g KCl olmak üzere, desikatördeki çözelti yüksekliğini standartta belirtildiği üzere 30 mm – 50 mm arasında sağlamak için  $20^\circ\text{C}$ 'de 1000 ml suya 347 g KCl kullanılarak bir çözelti hazırlanmış ve desikatöre konmuştur. Her bir malzemeden 3 adet olacak şekilde  $5 \times 5 \times 5$  cm boyutlarında 10 g'dan az olmayacak şekilde hazırlanan numuneler, sabit ağırlığa ulaşılan kadar etüvde  $100^\circ\text{C}$ 'de kurutma işlemine tabii tutulduktan sonra çözeltiyle hazırlanan uygun bağıl nem ortamındaki desikatöre yerleştirilmiş ve periyodik aralıklarla 5 haneli hassas tartı ile tartımlar gerçekleştirilmiştir. Hacimce yüzde rutubet muhtevası,  $\psi$ , her numune için Eş. 4 ve Eş. 5 ile hesaplanır.

$$u = \frac{(m - m_d)}{m_d} \quad (4)$$

$$\psi = u \frac{\rho_b}{\rho_w} \quad (5)$$

Verilen eşitlikte;

$u$  : Kütlece yüzde rutubet muhtevası (kg/kg),  
 $m$  : Numune kütlesi ( $\text{m}^3$ ),  
 $m_d$  : Kuru deneysel numunesinin kütlesi ( $\text{m}^3$ ),  
 $\psi$  : Hacimce yüzde rutubet muhtevası ( $\text{m}^3/\text{m}^3$ ),  
 $\rho_b$  : Numunenin görünür yoğunluğu ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )  
 $\rho_w$  : Suyun yoğunluğu =  $997,6$  ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ) değerlerini ifade etmektedir.

Su buharı difüzyon direnç faktörü verilerini elde etmek için TS EN 12086 [50] ve TS EN ISO 12572 [51] standartları dikkate alınarak kuru kap yöntemine göre su buharı geçirgenlik deneyi yapılmıştır. Deneyin gerçekleştirildiği kaplar içerisine nem çekici malzeme olarak  $\text{CaCl}_2$  kullanılmıştır. Deney için kullanılan desikatör koşulları  $20^\circ\text{C}$ - $23^\circ\text{C}$  sıcaklık ve %95-100 bağıl nemdir. Deney süresince numuneler, 5 haneli hassas tartı ile tartılmıştır. Meşe ve kerpiç tuğla numunelerinde kaplarda çatlama gerçekleştiği ve kap içerisinde çözelti olduğu durumda deney sonlandırılmıştır. Deney süreleri bu durum dikkate alınarak belirlenmiştir. Deneylerden elde edilen sonuçlar doğrultusunda numunelerin buhar difüzyon direnç faktörü değeri ( $\mu$ ), Eş. 6, Eş. 7, Eş. 8, Eş. 9 ve Eş. 10 kullanılarak hesaplanmıştır.

$$\mu = \frac{\delta_a}{\delta} \quad (6)$$

$$\delta_{\text{air}} = \frac{0.083}{R_D \times T} \times \frac{p_o}{p} \left( \frac{T}{273} \right)^{1.81} \quad (7)$$

$$\delta = W \times d \quad (8)$$

$$W = \frac{G}{A \times \Delta p} \quad (9)$$

$$\Delta_{m_{12}} = \frac{m_1 - m_2}{t_1 - t_2} \quad (10)$$

Verilen eşitliklerde;

$\mu$  : Su buharı difüzyon direnç faktörü (-),  
 $\delta_a$  : Havanın su buharı geçirgenliği ( $\text{mg}/(\text{mhPa})$ )  
 $\delta$  : Su buharı geçirgenliği ( $\text{mg}/(\text{mhPa})$ )  
 $p_o$  : Standart barometrik basınç =  $1013,25$  (hPa)  
 $R_D$  : Su buharının gaz sabiti =  $462 \times 10^{-8}$  ( $\text{Nm}/(\text{mgK})$ )  
 $T$  : Termodinamik sıcaklık (K)  
 $p$  : Barometrik basınç (hPa)  
 $W$  : Su buharı geçirgenliği ( $\text{mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{Pa})$ )  
 $d$  : Numunenin ortalama kalınlığı (m)  
 $G$  : Her bir deneysel numunesi için art arda beş  $\Delta_{12}$  değerinin ortalaması ( $\text{mg}/\text{saat}$ )  
 $\Delta_{12}$  : Tek bir belirleme için zaman başına kütle değişimi ( $\text{mg}/\text{saat}$ )  
 $m_1$  :  $t_1$  anındaki deneysel numunesinin kütlesi (mg)  
 $m_2$  :  $t_2$  anındaki deneysel numunesinin kütlesi (mg)  
 $t_1$  ve  $t_2$  : Ardışık tartım süreleri (saat)  
 $A$  : Numunenin alanı ( $\text{m}^2$ )  
 $\Delta p$  : Numune boyunca su buharı basınç farkı (Pa) değerlerini ifade etmektedir.

Kerpiç tuğla numunelerinde yapılan ön deneylerde dağılmalar meydana gelmiştir. Numunelerde, çatlamalar ve çatlayan kısımlardan parça kopmaları meydana geldiği gözlemlenmiş, bu nedenle bu

numune için kılcal su emicilik katsayısı ve açık gözeneklilik değerleri belirlenmemiştir. Kerpiç tuğla için bu değerler, DELPHIN kütüphanesindeki benzer malzeme değeri dikkate alınarak belirlenmiştir. Deneylerin sonuçlarından elde edilen veriler doğrultusunda DELPHIN yazılımına işlenen değerler, 5. Bölümde yer alan Tablo 3'te gösterilmiştir.

### 3.2. Mahfazalı Sıcak Oda Deneyleri (Guarded Hot Box Tests)

Mahfazalı sıcak oda deneyleri gerçekleştirilen duvarlar, TSE Yapı Malzemeleri Yangın ve Akustik Laboratuvarı Müdürlüğü Laboratuvarı'nda 150 cm x 150 cm olarak inşa edildikten sonra oda koşullarında kuruması beklenmiştir. Daha sonra duvar örnekleri sabit ağırlığına ulaşmaya kadar etüvde kurutulmuş ardından oda koşullarında tutulmuştur. Sonrasında, duvarlar üzerinde Şekil 6'da gösterildiği yerlere standarda uygun olarak; deney numunesinde yüzey sıcaklıklarının ölçülebilmesi için 9 adet termocouple, deney numunesinin soğuk ve sıcak taraflarda birbirlerinin tam karşısına gelecek biçimde yerleştirilerek ölçümlere başlanmıştır.

Mahfazalı sıcak oda ile yapılan ölçümlerden elde edilen verilerin analizi için DELPHIN ile bilgisayarlı benzetim modellerinin aynı şartlar doğrultusunda yapılması gerekmektedir. Ölçüm noktaları, malzeme özellikleri, ortam koşulları ve süre deney çalışması ile aynı olacak şekilde benzetim çalışması gerçekleştirilmiştir. Buna göre; yukarıda detaylı açıklandığı üzere malzeme özellikleri DELPHIN yazılımına işlenerek düzenlenmiş; iç ortam 20°C, dış ortam 0°C olarak ayarlanmıştır. Ortamın bağıl nem değeri %50'dir. Deney süresi, SAM için 116 saat, ZM için 163 saattir. İnşa edilen duvar örnekleri Şekil 9'da yer almaktadır.



Şekil 9. İnşa edilen duvar örnekleri (Constructed wall specimens)

### 4. Sayısal Değerlendirme: DELPHIN (Numerical Analysis: DELPHIN)

Laboratuvar ölçümlerinin çıktıları, duvar örneklerinin higrotermal performans değerlendirilmesi için DELPHIN ile yapılan bilgisayarlı benzetim çalışmasından elde edilen sonuçlarla karşılaştırılarak doğrulanması için incelenmiştir. Simülasyon için ölçüm noktaları, Şekil 8'de gösterilen mahfazalı sıcak oda ölçüm noktaları ile aynı şekilde belirlenmiştir. DELPHIN benzetim çalışması için bir hesaplama gridi oluşturulması gerekmektedir. Bu çalışmada yapılan benzetim çalışmaları için oluşturulan gridin minimum eleman boyutu 1 mm, maksimum eleman boyutu 50 mm ve esneme faktörü 1,6'dır. Mahfazalı sıcak oda ve DELPHIN benzetim çalışmalarının sonuçlarının karşılaştırılması için ortam koşulları aynı şekilde düzenlenmiştir. Buna göre DELPHIN benzetim çalışmaları, kararlı durum koşulları altında gerçekleştirilmiştir. İç ortam 20°C, %50 bağıl nem, dış ortam 0°C %50 bağıl nem olarak düzenlenmiştir. Başlangıç koşulları ise 20°C ve %50 bağıl nem olarak ayarlanmıştır. Duvar örneklerinin oryantasyonu kuzey yönü olarak düzenlenmiştir. Mahfazalı sıcak oda deneylerinde SAM 116, ZM 163 saatte sabit değerlere ulaşmış ve deney sonlandırılmıştır. Buna bağlı olarak benzetim süreleri deney süreleri ile aynı olacak şekilde yapılmıştır. DELPHIN bilgisayarlı benzetim çalışmaları için malzemelerin atanması, gerçek koşulların gösterilmesinde kritik etkilere sahiptir. Benzetim çalışması sırasında duvar örneklerinin boyutlandırma ve katmanlara göre tanımlamalar yapıldıktan sonra, DELPHIN kütüphanesindeki benzer malzemeler, belirlenen malzeme özelliklerine göre düzenlenerek modellere malzeme atanmıştır. DELPHIN benzetim çalışmasında atanan malzemelerin malzeme özellikleri Tablo 3'te sunulmuştur.

DELPHIN'de higroskopik sorpsiyon değerinin (RH= %80) değişmesine izin verilmemektedir. Bu nedenle seçilen malzemeler, malzeme özellikleri analizi ile bulunan daha yakın higroskopik sorpsiyon değerine (RH= %80) bağlı olarak belirlenmiştir.

Kireç sıva ve kerpiç için malzeme özellikleri DELPHIN kütüphanesinden atanmıştır. Kireç sıvası için atanan malzeme numarası, kireç sıva (tarihi) olarak adlandırılan 148'dir. Kerpiç sıva için atanan malzeme numarası ise toprak harç olarak adlandırılan 128'dir. Duvar örneklerinin sayısal ve deneysel çalışmalardan elde edilen verileri; sıcaklık ve U-değeri dikkate alınarak incelenmiştir.

### 5. Sonuçlar ve Tartışmalar (Results and Discussions)

Aynı şartlar altında gerçekleştirilen mahfazalı sıcak oda ve DELPHIN bilgisayarlı benzetim çalışmalarının sonuçlarına ilişkin Tablo 4'te U Değeri verileri gösterilmektedir.

Tablo 3. DELPHIN bilgisayarlı benzetim çalışmasında tanımlanan malzeme özellikleri (Material properties defining in DELPHIN simulations)

Malzeme	Görünür yoğunluk (kg/m <sup>3</sup> )	Kılcal su emicilik katsayısı (kg/m <sup>2</sup> s <sup>1/2</sup> )	Açık gözeneklilik (m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> )	Buhar difüzyon direnç faktörü (-)	Higroskopik sorpsiyon %80 bağıl nemde (m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> )	Isıl iletkenlik (W/mK)	DELPHIN Kütüphanesinden seçilerek düzenlenen malzeme numarası ve adı
Sarıçam	800,1306	0,0200	0,0376	164,6604	0,0727	0,1823	714 – Pine_longitudinal (from Saxony)
Meşe	597,7784	0,0628	0,0703	65,7873	0,0750	0,1560	708 – Oak_longitudinal (from Saxony)
Kerpiç tuğla	1619,8099	-	-	17,2425	0,0141	0,1290	791 – Loam brick green
Kireç sıva	1800	0,13	0,3017	12	0,0110653	0,82	148 – Lime plaster (historical)
Kerpiç sıva	1567,78	0,175662	0,408387	11,3684	0,0386366	0,5815	128 – Clay mortar (historical)

Buna göre, mahfazalı sıcak oda ile ölçülen U Değeri, DELPHIN yazılımı ile yapılan bilgisayarlı benzetim çalışmasından elde edilen ısı iletkenlik katsayısı değerinin TS825'e göre hesaplan U Değeri ile karşılaştırılmıştır. Burada yapılan karşılaştırma sonuçlarında çıkan “-” ifadesi, DELPHIN verisinin sıcak oda verisinden eksik olduğunu ifade etmektedir. ZM’de mahfazalı sıcak oda ölçümü ile DELPHIN simülasyon çalışması verileri arasındaki farkın -%40,05, SAM’da ise bu farkın %71,35 olduğu görülmektedir. U sonuçlar çerçevesinde, duvar kalınlığının ve malzeme farklılığının arttıkça ölçülen ve hesaplanan değerler arasındaki farkın arttığı hatta 4 farklı duvar katmanından oluşan SAM için bu farkın %100’e yaklaştığı sonucuna varılmaktadır. Bu noktada, inşa edilen duvarlarda işçilik hatasından kaynaklı durumların söz konusu olması, farklı malzemelerin bir araya gelmesinden kaynaklı ısı geçişlerinin olduğu öngörülmektedir. Buna ek olarak, hem mahfazalı sıcak oda hem de DELPHIN simülasyon

sonuçlarına bakıldığında 2 duvar örneğinin de TS825’te tavsiye edilen U Değerine uygun olmadığı görülmektedir. Duvar örneklerinin yer aldığı iller olarak belirlenen İstanbul ve Karabük illerinde dış duvarlar için belirlenen U değerleri şu şekildedir; 2. derece gün bölgesi olarak ifade edilen İstanbul için 0,57, 3. derece gün bölgesi olarak ifade edilen Karabük için 0,48’dir [52]. Bu durumda, bu duvar örneklerinin U Değerlerinin TS825’te tavsiye edilen değerler dikkate alınarak iyileştirilmesi gerekliliği söz konusudur.

Aynı şartlar altında gerçekleştirilen mahfazalı sıcak oda ve DELPHIN bilgisayarlı benzetim çalışmalarının sonuçlarına ilişkin Tablo 5’te sıcaklık verileri yer almaktadır.

Duvar numunelerinde hem dikey hem de yatay eksende malzemelerin bir araya geldiği yerler ve etkileşim noktaları farklı olduğundan, aynı

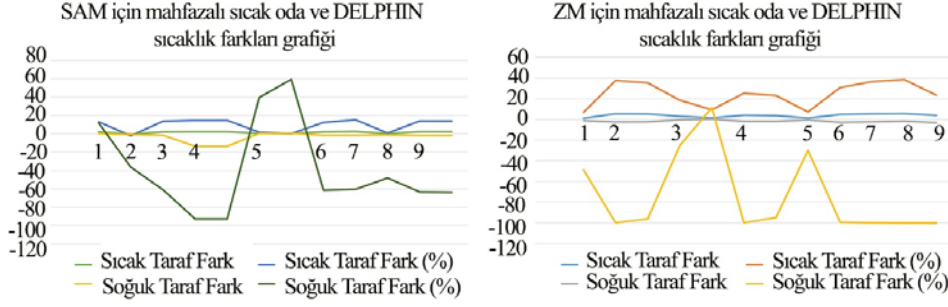
**Tablo 4.** Mahfazalı sıcak oda ve DELPHIN benzetim çalışması U-değeri analiz sonuçları (U-value results of guarded hot box tests and DELPHIN simulations)

Duvar Tipi	Mahfazalı Sıcak Oda Ölçüm Sonucu: U Değeri (W/m <sup>2</sup> K)	DELPHIN Simülasyon Sonucu: Isıl İletkenlik Katsayısı (W/mK)	DELPHIN Simülasyon Sonucu: U Değeri (W/m <sup>2</sup> K)	U Değeri Farkı (W/m <sup>2</sup> K)	U Değeri Farkı (%)
SAM	1.410	Kesit A-A: 0,82	Kesit A-A: 2,42	Kesit A-A: 1,01	Kesit A-A: %71,35
		Kesit B-B: 0,82	Kesit B-B: 2,42	Kesit B-B: 1,01	Kesit B-B: %71,35
		Kesit C-C: 0,82	Kesit C-C: 2,42	Kesit C-C: 1,01	Kesit C-C: %71,35
		Kesit D-D: 0,82	Kesit D-D: 2,42	Kesit D-D: 1,01	Kesit D-D: %71,35
ZM	1.790	Kesit A-A: 0,21	Kesit A-A: 1,07	Kesit A-A: -0,72	Kesit A-A: -%40,05
		Kesit B-B: 0,21	Kesit B-B: 1,07	Kesit B-B: -0,72	Kesit B-B: -%40,05
		Kesit C-C: 0,21	Kesit C-C: 1,07	Kesit C-C: -0,72	Kesit C-C: -%40,05
		Kesit D-D: 0,21	Kesit D-D: 1,07	Kesit D-D: -0,72	Kesit D-D: -%40,05

**Tablo 5.** Mahfazalı sıcak oda ve DELPHIN benzetim çalışması sıcaklık değerleri analiz sonuçları (Temperature results of guarded hot box tests and DELPHIN simulations)

Duvar Tipi	Ölçüm Noktası	Mahfazalı sıcak oda değeri (°C)	Sıcak taraf DELPHIN benzetim değeri (°C)	Sıcak taraf	Fark	Fark (%)	Mahfazalı sıcak oda değeri (°C)	Soğuk taraf DELPHIN benzetim değeri (°C)	Soğuk taraf	Fark	Fark (%)
SAM	1	15,73	17,77*	2,04	12,97	0,95	1,06*	0,11	11,58		
	2	17,67	17,28*	-0,39	-2,21	1,95	1,24*	-0,71	-36,41		
	3	15,62	17,74*	2,12	13,57	2,77	1,08*	-1,69	-61,01		
	4	15,51	17,77*	2,26	14,57	14,78	1,06*	-13,72	-92,83		
			17,78**	2,27	14,64		1,05**	-13,73	-92,90		
			17,36*	0,27	1,58		1,2*	0,34	39,53		
	5	17,09	17,1***	0,01	0,06	0,86	1,37***	0,51	59,30		
	6	15,83	17,78**	1,95	12,32	2,72	1,05**	-1,67	-61,40		
	7	15,42	17,76**	2,34	15,18	2,69	1,06**	-1,63	-60,59		
8	17,1	17,2**	0,1	0,58	2,48	1,28**	-1,2	-48,39			
9	15,62	17,77*	2,15	13,76	2,9	1,06*	-1,84	-63,45			
		17,78****	2,16	13,83		1,05****	-1,85	-63,79			
ZM	1	16,65	17,8*	1,15	6,91	2,37	1,21*	-1,16	-48,95		
	2	14,51	19,95*	5,44	37,49	2,48	0,003*	-2,477	-99,88		
			19,63**	5,12	35,29		0,1**	-2,38	-95,97		
	3	15,81	18,76*	2,95	18,66	1,14	0,85*	-0,29	-25,44		
			17,28***	1,47	9,30		1,27***	0,13	11,40		
	4	15,94	19,98*	4,04	25,35	1,95	0,002*	-1,948	-99,90		
			19,63****	3,69	23,15		0,1****	-1,85	-94,87		
	5	16,39	17,58**	1,19	7,26	1,8	1,26**	-0,54	-30,00		
	6	15,12	19,78**	4,66	30,82	2,86	0,02**	-2,84	-99,30		
7	14,64	20**	5,36	36,61	2,38	0,002**	-2,378	-99,92			
8	14,44	20****	5,56	38,50	1,71	0,001****	-1,709	-99,94			
9	16,2	20****	3,8	23,46	3,21	0,002****	-3,208	-99,94			

\*Kesit A-A, \*\*Kesit B-B, \*\*\*Kesit C-C, \*\*\*\*Kesit D-D



**Şekil 10.** SAM ve ZM duvar örneklerinin mahfazalı sıcak oda ve DELPHIN benzetim değerlendirmelerine ait sıcaklık farklarının sıcak ve soğuk taraftaki değişimleri

(The guarded hot box and DELPHIN simulation results of temperature differences on hot side and cold side for SAM and ZM wall specimens)

malzemelerin sıcaklık değerlerini farklı ölçüm noktalarında incelemenin daha doğru sonuçlar sağlayacağı öngörülmüştür. Bu bağlamda, farklı malzemelerin bir araya geldiği yerler ve etkileşimleri açısından ölçüm noktaları grupları oluşturularak verileri değerlendirmek için her bir duvar örneği için veriler ölçüm noktaları gruplandırılarak ele alınmıştır. SAM isimli duvar örneği verileri 2 grupta değerlendirilmiştir. Birinci grup 2, 5, 8; ikinci grup 1, 3, 4, 6, 7, 9'dur. Birinci grupta yer alan 2, 5 ve 8 numaralı ölçüm noktaları ahşap elemanlar üzerinde; 1, 3, 4, 6, 7, 9 numaralı ölçüm noktaları kerpiç dolgu üzerindedir. 2, 5, 8 numaralı noktalarda ölçülen ve simüle edilen değerler arasındaki farkın sıcak tarafta maksimum  $-%2$  olduğu ancak soğuk tarafta bu farkın arttığı fakat diğer ölçüm noktalarına kıyasla daha az olduğu görülmektedir. 2 numaralı noktada ölçülen ve simüle edilen değerler arasındaki fark sıcak tarafta  $-%2,21$ , soğuk tarafta  $-%36,41$  iken; 5 numaralı noktada ölçülen ve simüle edilen değerler arasındaki fark sıcak tarafta (Kesit A-A'da)  $%1,58$ , (Kesit C-C'de)  $%0,06$ ; soğuk tarafta ise (Kesit A-A'da)  $%39,53$ , (Kesit C-C'de)  $%59,30$ ; 8 numaralı noktada ölçülen ve simüle edilen değerler arasındaki fark sıcak tarafta  $%0,58$ , soğuk tarafta  $-%48,39$ 'dur. İkinci grupta değerlendirilen 1, 3, 4, 6, 7, 9 numaralı noktalarda ölçülen değerler arasındaki fark  $%12-15$  arasında, soğuk tarafta ise bu farkın 1 numaralı nokta hariç oldukça arttığı görülmektedir. 1 numaralı noktada ölçülen ve simüle edilen değerler arasındaki fark sıcak tarafta  $%12,97$ , soğuk tarafta  $%11,58$  iken; 3 numaralı noktada ölçülen ve simüle edilen değerler arasındaki fark sıcak tarafta  $%13,57$ , soğuk tarafta  $-%61,01$ ; 4 numaralı noktada ölçülen ve simüle edilen değerler arasındaki fark sıcak tarafta (Kesit A-A'da)  $%14,57$ , (Kesit B-B'de)  $%14,64$ , soğuk tarafta ise mahfazalı sıcak oda ölçümleri gerçekleştirilemediği için karşılaştırma yapılamamış; 6 numaralı noktada ölçülen ve simüle edilen değerler arasındaki fark sıcak tarafta  $%12,32$ , soğuk tarafta  $-%61,40$  iken; 7 numaralı noktada ölçülen ve simüle edilen değerler arasındaki fark sıcak tarafta  $%15,18$ , soğuk tarafta  $-%60,59$ ; 9 numaralı noktada ölçülen ve simüle edilen değerler arasındaki fark sıcak tarafta (Kesit A-A'da)  $%13,76$ , (Kesit D-D'de)  $%13,83$ ; soğuk tarafta ise (Kesit A-A'da)  $-%63,45$ , (Kesit D-D'de)  $-%63,79$ 'dur. Bu veriler değerlendirildiğinde, sıcak tarafta ölçülen ve simüle edilen değerler arasındaki farkın birbirine özellikle ahşap olan kısımlarda soğuk tarafa kıyasla göz ardı edilebilecek kadar az olduğu görülmektedir. Buna karşın duvar örneğinde kerpiç olan kısımlarda ölçülen ve simüle edilen değerler arasındaki fark sıcak tarafta  $%12-15$  arasında iken, soğuk tarafta bu farkın  $-%60$ 'dan fazla olduğu noktalar bulunmaktadır. Bu durumun nedeninin soğuk taraftaki duvar katmanlaşması olduğu öngörülmektedir. Soğuk tarafta kerpiç sıva ve kireç sıvadan oluşan iki farklı malzemenin bir araya gelmesi durumunda malzemelerin birbirleriyle olan etkileşiminin farkın bu kadar fazla olmasına neden olabileceği düşünülmektedir. Ayrıca, simülasyon çalışmalarında göz ardı edilen işçilikten kaynaklı sorunların olabileceği de ölçülen ve simüle edilen değerler arasındaki farkın artmasına neden olabilecek durumlardandır. ZM isimli duvar örneği verileri 3 grupta değerlendirilmiştir. Birinci grup ahşap

elemanlar üzerinde 1, 3, 5 numaralı noktalar; ikinci grup boşluk üzerinde ahşap elemanlara yakın noktalarda boşluğa denk gelen 2, 4, 6 numaralı noktalar; üçüncü grup ise boşluğa denk gelen ahşap elemanlara ikinci gruptaki noktalara kıyasla daha uzakta yer alan 7, 8, 9'dur. 1, 3, 5 numaralı değerler incelendiğinde soğuk tarafta farklar artış göstermesine karşın sıcak tarafta değerler arasındaki fark  $%7-19$  arasındadır. 1 numaralı noktada ölçülen ve simüle edilen değerler arasındaki fark sıcak tarafta  $%6,91$ , soğuk tarafta  $-%48,95$ ; 3 numaralı noktada ölçülen ve simüle edilen değerler arasındaki fark sıcak tarafta (Kesit A-A'da)  $%18,66$ , (Kesit C-C'de)  $%9,30$ , soğuk tarafta (Kesit A-A'da)  $-%25,44$ , (Kesit C-C'de)  $%11,40$ ; 5 numaralı noktada ölçülen ve simüle edilen değerler arasındaki fark sıcak tarafta  $%7,26$ , soğuk tarafta  $-%30,00$ 'dur. 2 numaralı noktada ölçülen ve simüle edilen değerler arasındaki fark sıcak tarafta (Kesit A-A'da)  $%37,49$ , (Kesit B-B'de)  $%35,29$ , soğuk tarafta (Kesit A-A'da)  $-%99,88$ , (Kesit B-B'de)  $-%95,97$ ; 4 numaralı noktada ölçülen ve simüle edilen değerler arasındaki fark sıcak tarafta (Kesit A-A'da)  $%25,35$ , (Kesit D-D'de)  $%23,15$ , soğuk tarafta (Kesit A-A'da)  $-%99,90$ , (Kesit D-D'de)  $-%94,87$ ; 6 numaralı noktada ölçülen ve simüle edilen değerler arasındaki fark sıcak tarafta  $%30,82$ , soğuk tarafta  $-%99,30$ 'dur. 7 numaralı noktada ölçülen ve simüle edilen değerler arasındaki fark sıcak tarafta  $%36,61$ , soğuk tarafta  $-%99,92$ ; 8 numaralı noktada ölçülen ve simüle edilen değerler arasındaki fark sıcak tarafta  $%38,50$ , soğuk tarafta  $-%99,94$ ; 9 numaralı noktada ölçülen ve simüle edilen değerler arasındaki fark sıcak tarafta  $%23,46$ , soğuk tarafta  $-%99,94$ 'tür. Bu veriler dikkate alındığında, değerler arasındaki farkların hem sıcak hem soğuk tarafta en az olduğu noktaların ahşap üzerindeki noktalar olduğu, buna karşın boşluğa denk gelen noktalarda değerler arasındaki farkın hem sıcak hem soğuk tarafta fazla olduğu görülmektedir. Bu durumda boşluklu yapının ısı hareketi üzerinde önemli rol oynadığını söylemek mümkündür. Ayrıca, soğuk tarafta bu noktalarda değerler arasındaki fark  $%100$ 'e yakındır. Soğuk tarafta duvarın yüzeyindeki ahşap kaplama malzemelerinin arasında az da olsa malzeme ve işçilik kaynaklı boşluğun bu farkın oluşmasında rol oynadığı öngörülmektedir. Şekil 10'daki grafiklerde her iki örnekte mahfazalı sıcak oda ve DELPHIN benzetim çalışmalarına ilişkin sıcaklık farklarının sıcak ve soğuk taraftaki değişimleri gösterilmiştir. Her 2 örnekte ortak olarak ahşap üzerindeki noktalarda değerler arasındaki farkın en az olduğu, farklı malzemelerin bir araya gelmesinden dolayı ısı hareketi üzerinde etkili rol oynadıkları ve işçilik kaynaklı etkilerin önemli olduğu sonucuna varılmıştır.

## 6. Sonuçlar (Conclusions)

Mahfazalı sıcak oda ve sabit şartlarda yapılan DELPHIN simülasyon çalışmalarının karşılaştırmalı verilerine göre:

- Sıcak oda deneyleri ve simülasyon çalışmaları yapılan 2 duvar örneğinin farklı katmanlaşmalarının TS825'te tavsiye edilen U

değerine uygun olmadığı görülmektedir. Sonuçlar çerçevesinde, duvar kalınlığının ve malzeme farklılığının arttıkça ölçülen ve hesaplanan değerler arasındaki farkın arttığı sonucuna varılmaktadır. Bunun nedeninin, inşa edilen duvarlarda işçilik hatasından kaynaklı durumların söz konusu olması ve çok sayıda farklı malzemelerin bir araya gelmesinden kaynaklı olduğu değerlendirilmektedir.

- Duvar örneklerinin U Değerlerinin TS825'te tavsiye edilen değerler dikkate alınarak iyileştirilmesi gerekliliği söz konusudur. Duvar örneklerinin tarihi, kültürel, mimari ve sosyal değerleri göz önünde bulundurulduğunda bu iyileştirmenin gerçekleştirilmesi için kapsamlı çalışmaların yapılması elzemdir. Bu konu, çalışmanın kapsamı dışında olduğu için detaylı bir öneri yapılamamakta birlikte; duvar örnekleri için mümkün olduğunca duvarın özgün yapısına zarar vermeyen doğal içerikli malzemeler kullanılarak en az müdahaleyle çözülmesi gerekmektedir.
- Sıcak oda deneyleri ve simülasyon çalışmaları yapılan 2 örnekte ortak olarak ahşap üzerindeki noktalarda değerler arasındaki farkın en az olduğu, farklı malzemelerin bir araya geldiği noktalarda bu farklılaşmanın ısı hareketi üzerinde etkili rol oynadıkları ve işçilik kaynaklı etkilerin önemli olduğu sonucuna varılmıştır.

Türkiye'deki yapı stoğu içinde önemli bir paya sahip olan geleneksel ahşap çerçeve konut yapıları, ısı ve nemsel performansın kapsadığı konular ve önemi dikkate alındığında öncelikli incelenmesi gereken başlıklardan biridir. Mimari, tarihi, kültürel, sosyal değere sahip olan bu yapıların değerlerinin korunarak gelecek nesillere aktarılması noktasında dış duvarlarının ısı ve nemsel performansının iyi olması; bu yapıların enerji etkinliklerinin artırılmasına katkı sağlaması, ısı ve nem etkisiyle oluşabilecek ve yapının yaşam ömrünü olumsuz etkileyebilecek sonuçları engellemesine katkı sunabilir. Bu husustan yola çıkılarak, mevcut durum tespitlerinin yapılması ve gerekli olan durumlarda iyileştirme önerilerinin değerlendirilmesi aşamalarında higrotermal performans araştırmaları halihazırda devam eden ve/veya yapılacak olan koruma/restorasyon/restitüsyon çalışmalarına veri sağlaması bakımından önemlidir.

Deneysel ve sayısal yöntem uygulanarak yapılan bu araştırma için koşullu ve kontrollü şartlar sağlanarak değerlendirme yapılmıştır. Bu nedenle, gerçek ortam koşullarının değerlendirilmesi kapsam dışındadır. Yapılacak çalışmalarda gerçek ortam koşullarının da incelenmesi için yerinde ölçüm yönteminin uygulanması ile elde edilen verilerin karşılaştırılmasının literatüre önemli katkı sağlayabileceği öngörülmektedir.

#### Teşekkür (Acknowledgement)

Bu çalışma İstanbul Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimince Desteklenmiştir. Proje Numarası: 42955

#### Kaynaklar (References)

1. Tejada-Vázquez R., Macias-Melo E.V., Hernández-Pérez I., Aguilar-Castro K.M., Serrano-Arellano J., Empirical model of hygrothermal behavior of masonry wall under different climatic conditions using a hot box, *Energy and Buildings*, 249 (2021), 111209, 2021.
2. Delgado J.M.P.Q., Barreira E., Ramos N.M.M., de Freitas, V.P., *Hygrothermal numerical simulation tools applied to building physics*, Springer, 2013.
3. Altun M.C., Buhar difüzyonunun dış duvarların nem ile ilgili ve ısı performansına etkilerinin değerlendirilmesinde kullanılabilir bir yaklaşım, Doktora tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 1997.
4. Hens H. S. L. C., Heat, air and moisture transfer in highly insulated building envelopes (Hamtie) (Rapor No. Technical Synthesis Report IEA ECBCS Annex 24), Birleşik Krallık: International Energy Agency Energy Conservation in Buildings and Community Systems Programme, 2002.
5. Nofal M., Straver M., Kumaran K., Comparison of four hygrothermal models in terms of long-term performance assessment of wood-frame constructions (Rapor No. NRCC-44690), Kanada: National Research Council Canada, 2001.
6. Zarr R. R., Burch D. M., Fanney, A. H., Heat and moisture transfer in wood-based wall construction: measured versus predicted, (NIST Building Science Series 173), Washington: U.S. Government Printing Office, 1995.
7. Gutland M., Bucking S., Quintero, M.S., A methodology for hygrothermal modelling of imperfect masonry interfaces, *Journal of Building Physics*, 44 (6), 485-509, 2021.
8. Trechsel H.R., Moisture Primer. H. R. Trechsel (Ed.), *Moisture analysis and condensation control in building envelopes içinde*, Philadelphia: ASTM, 1-15, 2001.
9. Pihelo P., Kikkas H., Kalamees, T., Hygrothermal performance of highly insulated timber-frame external wall. *Energy Procedia*, 96 (2016), 685-695, 2016.
10. Martinez R.G., Hygrothermal assessment of a prefabricated timber-frame construction based in hemp, *Procedia Environmental Sciences*, 38 (2017), 729-736, 2017.
11. Fu H., Ding Y., Li M., Li H., Huang X. & Wang Z., Research on thermal performance and hygrothermal behavior of timber-framed walls with different external insulation layer: Insulation cork board and anti-corrosion pine plate, *Journal of Building Engineering*, 28 (2020), 101069, 2020.
12. Schjøth Bunkholt N., Rütther P., Gullbrekken L., Geving S., Effect of forced convection on the hygrothermal performance of a wood frame wall with wood fibre insulation, *Building and Environment*, 195, 107748, 2021.
13. Pihelo P., Kalamees T., The effect of thermal transmittance of building envelope and material selection of wind barrier on moisture safety of timber frame exterior wall, *Journal of Building Engineering*, 6 (2016), 29-38, 2016.
14. Kalamees T., Vinha, J., Hygrothermal calculations and laboratory tests on timber-framed wall structures, *Building and Environment*, 38 (2003), 689-697, 2003.
15. Carbonez K., Van Den Bossche N., Ge H., Janssens, A., Comparison between uniform rain loads and point sources to simulate rainwater leakage with commercial HAM-models, *Proceedings of ISBP 2015: 1st International Symposium on Building Pathology*, Porto, Portekiz, 24-27 Mart, 2015.
16. Langmans J., Roels, S., What are the hygrothermal consequences of applying exterior air barriers in timber frame construction in Europe?, *Journal of Building Performance Simulation*, 8 (3), 191-204, 2015.
17. Liu M., Sun Y., Sun C., Yang, X., Study on thermal insulation and heat transfer properties of wood frame walls, *Wood Research*, 63 (2), 249-260, 2018.
18. Claude S., Ginestet S., Bonhomme M., Escadeillas G., Taylor J., Marincioni V., Korolija I., Altamirano, H., Evaluating retrofit options in a historical city center: Relevance of bio-based insulation and the need to consider complex urban form in decision-making, *Energy and Buildings*, 182 (2019), 196-204, 2019.
19. Yıldız Y., An overview of hygrothermal simulation tools, *Dicle Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 10 (2), 273-286, 2021.
20. Çiçek A., Yapı düşey kabuk bileşenlerinin performans belirlenmesi sürecinde ısı ve nem geçişi ölçümünde kullanılabilir bir yöntem önerisi, Doktora tezi, Mimar Sinan Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2002.
21. Engin N., Yapı iç ortam nemine etki eden faktörlere yönelik bir bilgisayar programı "ıllan - nemli iklim bölgesi örneği", Doktora tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 2005.
22. Yardım B., Examination of dampness problems of a historic house, Yüksek lisans tezi, İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir, 2006.
23. Güzelçoban S., Yapılarda su ve ısı etkenleri, oluşturduğu sorunlar, nedenleri ve çözüm önerileri, Yüksek lisans tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2007.
24. Karacızmeli M., Urfa ili geleneksel konut yapılarının malzeme ve plan tipi farklılıklarının iklimsel performans açısından değerlendirilmesi, Yüksek lisans tezi, Mimar Sinan Güzel Sanatlar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2011.
25. Sarıtabak E., Bina kabuğunun dış duvarları ve ara kesitlerinde ısı ve nemsel performansın kızılotesi termografi ile değerlendirilmesi üzerine

- bir alan çalışması, Yüksek lisans tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2012.
26. Alan R.E., Su Buharı Difüzyonu ve Isı Yalıtım Malzemelerinin Buhar Geçirgenlikleri Üzerine Deneysel Bir Çalışma, Yüksek lisans tezi, Mimar Sinan Güzel Sanatlar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2010.
  27. Kuş H., Özkan E., Edis E., Göçer Ö., Pomza taşı agregalı beton bloklarla yapılan dış duvarların ısı ve nemsel performansı, yaşam dönemi boyunca enerji ve ekonomik etkinliği, TÜBİTAK Engineering Research Group Project, Project Number: 107M532, 2010.
  28. Umaroğulları F., Betonarme düşey yapı kabuğunda yalıtımın yerinin ve kalınlığının, nem denetimi açısından deneysel ve sayısal değerlendirmesi, Doktora tezi, Trakya Üniversitesi, Edirne, 2011.
  29. Chasan S., Dış cephe bitirme sistemlerinde ısı yalıtımının sıcaklık ve nem performansına etkisinin incelenmesi, Yüksek lisans tezi, Trakya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Edirne, 2013.
  30. Edis E., Kuş H., Determination of hygrothermal performance of building envelope by computer simulation, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 29 (2), 311–320, 2014.
  31. Ekşi A., Mevcut binaların cephelerinde dıştan ısı yalıtımı uygulamalarının İstanbul’da alanda incelenmesi ve higrotermal performansın benzetimle değerlendirilmesi, Yüksek lisans tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2016.
  32. Turgut Ç., An investigation of transient water vapor migration in building external walls, Yüksek lisans tezi, İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir, 2019.
  33. Mıhlayanlar E., Umaroğulları, F., Kalker taş duvarlarda sıcaklık ve nem performansının incelenmesi, Çukurova Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, 31 (1), 313–321, 2016.
  34. Yücel Dalkıran M., Ahşap iskelet yapı sisteminin ısı ve buhar geçişi açısından değerlendirilmesi, Yüksek lisans tezi, Trakya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Edirne, 2008.
  35. Samancı B., Ahşap dış duvarların İstanbul’daki uygulamalar üzerinden incelenmesi, ısı ve nemsel performansın benzetim ile değerlendirilmesi, Yüksek lisans tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2019.
  36. Serdar F., Karadeniz bölgesi geleneksel ahşap konutunun su ve ısı etkilerine karşı dış duvar performansının artırılmasına yönelik önlemler, Yüksek lisans tezi, Mimar Sinan Güzel Sanatlar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2019.
  37. Tunca M., Geleneksel ahşap evlerde su ve nem kaynaklı bozulmalar üzerine bir araştırma: Taraklı örneği, Yüksek lisans tezi, Gebze Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Gebze, 2019.
  38. Yavan Y. Yapılarda nem ve ısı değişkenliğinin malzeme üzerindeki etkileri ve yapı elemanlarının uğradıkları deformasyonlar, Yüksek lisans tezi, Haliç Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2017.
  39. Busser T., Berger J., Piot A., Pailha, M., Woloszyn M., Comparison of model numerical predictions of heat and moisture transfer in porous media with experimental observations at material and wall scales: An analysis of recent trends, *Drying Technology*, 37 (11), 1363-1395, 2019.
  40. TSE, Isı yalıtımı- Kararlı durum ısı iletim özelliklerinin tayini- Kalibre edilmiş ve mahfazalı sıcak kutu (TS EN ISO 8990)-Thermal insulation determination of steady-state thermal transmission properties-calibrated and guarded hot box (ISO 8990, 1994), 2002.
  41. Asdrubali F., Baldinelli, G., Thermal transmittance measurements with the hot box method: Calibration, experimental procedures, and uncertainty analyses of three different approaches, *Energy and Buildings*, 43 (2011), 1618–1626, 2011.
  42. Aktaş Y. D., Evaluation of seismic resistance of traditional Ottoman timber frame houses, Doktora tezi, Ortaoğu Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2011.
  43. Saatçi M., Türkiye’de kullanılan farklı tipteki geleneksel ahşap taşıyıcı sistemlerin yapı davranışına etkilerinin karşılaştırmalı incelenmesi, Yüksek lisans tezi, Karabük Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Karabük, 2020.
  44. Acar D., 19. Yüzyılın ikinci yarısında İstanbul’da ahşap yapım sistemlerinin değişimi: gelenekselin rasyonelleştirilmesi, Doktora tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2015.
  45. Eldem S. H., Yapı. Birsen Yayinevi, İstanbul, 2016.
  46. TSE, Doğal taşlar-Deney yöntemleri - Gerçek yoğunluk, görünür yoğunluk, toplam ve açık gözeneklilik tayini (TS EN 1936), 2007.
  47. TSE, Doğal taşlar- Deney metotları- Kılcal etkiye bağlı su emme katsayısının tayini- Natural stone test methods- Determination of water absorption coefficient by capillarity (TS EN 1925), 2000.
  48. TSE, Bina Malzemeleri Ve Mamüllerinin Hygroisil Performansı- Yüksek Sıcaklıkta Kurutularak Rutubet Muhtevası Tayini - Hygrothermal performance of building materials and products - Determination of moisture content by drying at elevated temperature (TS EN ISO 12570), 2006.
  49. TSE, Bina malzemeleri ve mamüllerinin higrotermal performansı- higroskopik su emme özelliklerinin tayini - Hygrothermal performance of building materials and products - Determination of hygroscopic sorption properties (TS EN ISO 12571), 2014.
  50. TSE, Isı yalıtım mamulleri - Binalar için - Su buharı iletim özelliklerinin tayini - Thermal insulating products for building applications - Determination of water vapour transmission properties (TS EN 12086), 2013.
  51. TSE, Binalarda kullanılan malzemelerin ve mamüllerin ısı ve rutubet ilişkisine ait performansı-Su buharı iletim özelliklerinin tayini - Kap yöntemi - Hygrothermal performance of building materials and products - Determination of water vapour transmission properties - Cup method (TS EN ISO 12572), 2016.
  52. TSE, TS825 Binalarda ısı yalıtım kuralları (Thermal insulation requirements for buildings), 2013.