



**ŞEFFAF YALITIMLI GİZLİ ISI DEPOLAMA DUVARININ ISIL  
PERFORMANSININ İNCELENMESİ**

**Cansu BEKLER**

**DOKTORA TEZİ  
MİMARLIK ANA BİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**TEMMUZ 2025**

## 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.

Cansu BEKLER

03/07/2025

# ŞEFFAF YALITIMLI GİZLİ ISI DEPOLAMA DUVARININ ISIL PERFORMANSININ İNCELENMESİ

(Doktora Tezi)

Cansu BEKLER

GAZİ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Temmuz 2025

## ÖZET

Günümüzde, binaların enerji etkinliğine fayda sağlamak amacıyla yapı kabuğunda kullanılan malzemelerinin performanslarını arttırmak üzere çalışmalar yapılmaktadır. Yapı bileşenlerinin incelendiği bu doktora çalışmasında, saydam yalıtım malzemesi (SYM) içeren bir yalıtım ünitesi ve gövdesine faz değiştiren malzeme (FDM) gömülü tuğlanın birlikte kullanıldığı dış duvar tasarlanmıştır. Çalışmanın temel hipotezi, pasif tasarım stratejileriyle geliştirilen, dinamik çevresel koşullara uyum sağlayan adaptif duvar sistemi, termal performansı optimize ederek ısıtma ve soğutma yüklerini azaltarak bina enerji performansını arttıracaktır. Bu hipoteze dayanarak, yüksek performanslı malzemelerle geliştirilen kompozit bir duvar sisteminin pasif tasarım stratejilerini kullanarak bina enerji performansını arttıracığı öngörülmektedir. Tez kapsamında, saydam yalıtımlı gizli ısı depolama duvarının (SYM-FDM duvarı) Ankara ili için performans analizleri birbirine girdi sağlayan matematiksel analiz, deneysel çalışma, simülasyon ve optimizasyon yöntem basamakları ile nicel olarak incelenmiştir. Matematiksel analiz çalışması MATLAB programı ile zamana bağlı olarak yapılmıştır. Elde edilen veriler deneysel çalışmaya girdi oluşturmuştur. Bina ölçeğinde performans analizleri ise DesignBuilder programı ile yapılmıştır. Bu çalışma basamağından elde edilen veriler optimizasyon çalışmasında değerlendirilmiştir. Bu yöntem basamakları sonucunda SYM-FDM duvarının yönelik elde edilen verilerin tasarım, performans ve maliyet bağlamında bütüncül bir değerlendirmesinin yapılmasına odaklanılmıştır. Elde edilen veriler, en iyi SYM-FDM duvar uygulamasının dört cephede %100 duvar oranında uygulanmasının yıllık ısıtma soğutma yükünü standart duvarlı referans binaya göre %28 oranında azaltabildiğini göstermiştir. Bu sonuçlar, SYM-FDM duvarının Ankara ili iklim koşullarında binaların enerji performansını arttırmada önemli bir potansiyel olduğunu ortaya koymaktadır. SYM-FDM duvarının yaz – kış, gündüz – gece koşullarını dikkate alarak denetim alternatiflerini değiştirilmesi ile yeni uygulama tiplerinin tasarlanması farklı iklim bölgeleri içinde önemli bir potansiyele sahip olduğunu ortaya koymaktadır.

Bilim Kodu : 80114  
Anahtar Kelimeler : Faz değiştiren malzeme, saydam yalıtım malzemesi, bina enerji performansı, pasif tasarım.  
Sayfa Adedi : 131  
Danışman : Prof. Dr. İdil AYÇAM

# EXAMINATION OF THE THERMAL PERFORMANCE OF A TRANSPARENT INSULATED LATENT HEAT STORAGE WALL

(PhD. Thesis)

Cansu BEKLER

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

July 2025

## ABSTRACT

In recent years, significant efforts have been directed toward enhancing the performance of materials used in the building envelope to improve the energy efficiency of buildings. Within the scope of this doctoral research, an exterior wall system was designed by combining a transparent insulation material (TIM)-based insulation unit and a specially developed brick with a phase change material (PCM) embedded in its core. The central hypothesis of the study is that an adaptive wall system, developed through passive design strategies and capable of responding to dynamic environmental conditions, will optimize thermal performance and reduce heating and cooling loads, thereby improving the overall energy performance of buildings. Based on this hypothesis, it is anticipated that a composite wall system developed with high-performance materials can enhance building energy efficiency by employing passive strategies. In this study, the thermal performance of the transparent insulation-integrated latent heat storage wall (TIM-PCM wall) was quantitatively evaluated for the city of Ankara using interlinked methodological steps, including mathematical modeling, experimental testing, simulation, and optimization. The mathematical analysis was conducted in a time-dependent manner using MATLAB software, and the resulting data served as input for the experimental stage. Building-scale performance analyses were carried out using the DesignBuilder software, and the findings from this stage were further utilized in the optimization process. This research focused on the holistic evaluation of the TIM-PCM wall in terms of design, performance, and cost. The results revealed that implementing the TIM-PCM wall on all four facades at 100% coverage can reduce the annual energy consumption of a reference building with standard walls by approximately 28%. These findings highlight the significant potential of the TIM-PCM wall system in enhancing energy performance under the climatic conditions of Ankara. Furthermore, the adaptable design features of the TIM-PCM wall suggest that it could be optimized for orientation and climate, offering promising potential for broader applications across different climatic regions.

Science Code : 80114

Key Words : Phase change material, transparent insulation material, building energy performance, passive design

Page Number : 131

Supervisor : Prof. Dr. İdil AYÇAM

## TEŞEKKÜR

Akademik hayatım boyunca bilimsel bakış açısı, rehberliği, değerli desteği ve ilham verici yaklaşımıyla bana yön veren; bu sürecin her aşamasında bilgi ve tecrübesiyle yanımda olan kıymetli danışmanım Prof. Dr. İdil AYÇAM'a, doktora tez çalışmam süresince katkıları ve bilgileriyle beni yönlendiren değerli tez izleme komitesi üyelerim Sayın Prof. Dr. Asena SOYLUK ve Sayın Prof. Dr. Mustafa ŞAHMARAN hocalarıma, yol gösterici önerileriyle çalışmamın gelişimine destek olan Prof. Dr. Mustafa Zeki YILMAZOĞLU'na en içten teşekkürlerimi sunarım.

Tez süresince sonsuz destek ve sabır gösteren sevgili eşim Mehmet Melih BEKLER'e ve kızım Defne BEKLER'e, hayatımın her döneminde desteğini, ilgisini ve sevgisini esirgemeyen annem Saadet GÜNER'e, babam Ömer GÜNER'e ve kardeşim Eralp GÜNER'e sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Mimarlık eğitimiyle başlayan dostluğumuzu birlikte atıldığımız akademik hayatta çalışma arkadaşlığı ile pekiştirdiğimiz çok kıymetli Arş. Gör. Dr. Fulya GÖKŞEN TAKVA'ya samimiyeti ve desteğinden dolayı teşekkür ederim.

Çalışmalarım süresince 2211-C Yurt İçi Öncelikli Alanlar Doktora Burs Programı kapsamında maddi destek sağlayan TÜBİTAK Bilim İnsanı Destek Programları Başkanlığına (BİDEB) ve tez çalışmalarına TÜBİTAK 1001 – Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Projelerini Destekleme Programı ile maddi destek sağlayan TÜBİTAK Araştırma Destek Programları Başkanlığına (ARDEB) teşekkürlerimi sunarım.

## İÇİNDEKİLER

|                                                                | Sayfa |
|----------------------------------------------------------------|-------|
| ÖZET .....                                                     | iv    |
| ABSTRACT .....                                                 | v     |
| TEŞEKKÜR .....                                                 | vi    |
| İÇİNDEKİLER .....                                              | vii   |
| ÇİZELGELERİN LİSTESİ .....                                     | ix    |
| ŞEKİLLERİN LİSTESİ .....                                       | xii   |
| RESİMLERİN LİSTESİ .....                                       | xii   |
| SİMGELER VE KISALTMALAR .....                                  | xv    |
| 1. GİRİŞ .....                                                 | 1     |
| 2. KAVRAMSAL ÇERÇEVE VE LİTERATÜR TARAMASI .....               | 13    |
| 2.1. Yapı Kabuğunun Enerji Dengesi Açısından İncelenmesi ..... | 15    |
| 2.2. Yapı Kabuğunun Geliştirilmesi: Sistem ve Malzeme .....    | 19    |
| 2.3. Yenilikçi Malzemeler .....                                | 20    |
| 2.3.1. Saydam yalıtım malzemesi .....                          | 21    |
| 2.3.2. Faz değiştiren malzeme .....                            | 27    |
| 3. MATERYAL VE YÖNTEM .....                                    | 35    |
| 3.1. Analizin Yapılacağı Bölgenin İklim Özellikleri .....      | 38    |
| 3.2. Matematiksel Analiz .....                                 | 38    |
| 3.3. Deneysel Çalışma .....                                    | 45    |
| 3.3.1. Deneysel çalışmaya hazırlık .....                       | 46    |
| 3.3.2. Deney ünitelerinin inşası .....                         | 48    |
| 3.3.3. Ölçüm ve kayıt sistemi .....                            | 55    |
| 3.4. Bina Enerji Performans Analizi .....                      | 57    |

|                                                                                       | <b>Sayfa</b> |
|---------------------------------------------------------------------------------------|--------------|
| 3.4.1. Bina enerji simülasyon programının seçimi.....                                 | 57           |
| 3.4.2. Referans konut binasının seçimi .....                                          | 59           |
| 3.4.3. Referans konut binasının modellenmesi ve simülasyon ayarlarının yapılması..... | 61           |
| 3.5. SYM-FDM Duvarının Performans ve Maliyet Bağlamında Optimizasyonu .....           | 67           |
| 3.5.1. Ekonomik Değerlendirme .....                                                   | 68           |
| <b>4. BULGULAR VE TARTIŞMA.....</b>                                                   | <b>71</b>    |
| 4.1. Matematiksel Analiz .....                                                        | 71           |
| 4.2. Deneysel Çalışma .....                                                           | 73           |
| 4.2.1. Isıtma dönemi.....                                                             | 73           |
| 4.2.2. Soğutma dönemi .....                                                           | 80           |
| 4.3. Bina Enerji Performans Analizi .....                                             | 85           |
| 4.4. SYM-FDM Duvarının Performans ve Maliyet Bağlamında Optimizasyonu .....           | 96           |
| 4.5. Bulguların Değerlendirilmesi ve Tartışma .....                                   | 103          |
| 4.5.1. Tasarım.....                                                                   | 104          |
| 4.5.2. Performans .....                                                               | 107          |
| 4.5.3. Maliyet .....                                                                  | 110          |
| <b>5. SONUÇ VE ÖNERİLER .....</b>                                                     | <b>113</b>   |
| <b>KAYNAKLAR .....</b>                                                                | <b>117</b>   |
| <b>ÖZGEÇMİŞ .....</b>                                                                 | <b>131</b>   |

## ÇİZELGELERİN LİSTESİ

| Çizelge                                                                                                         | Sayfa |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| Çizelge 2.1. Faz değıştiren malzemelerin sınıflandırılması.....                                                 | 29    |
| Çizelge 3. 1. Binanın dış duvarı malzemelerinin ısıl özellikleri.....                                           | 37    |
| Çizelge 3.2. Ankara ilinin 21 Ocak ve 21 Temmuz tarihleri için hesaplanan minimum ve maksimum sıcaklıklar ..... | 41    |
| Çizelge 3.3. ASHREA Sabitleri.....                                                                              | 42    |
| Çizelge 3.4. Deney odalarının plan ve kesitleri .....                                                           | 53    |
| Çizelge 3.5. Deney odalarının plan ve kesitleri .....                                                           | 55    |
| Çizelge 3.6. Deney ünitelerine yerleştirilen termokuplların ölçüm alınan nokta ve açıklama bilgisi .....        | 56    |
| Çizelge 3.7. Termokuplların deney odalarına yerleştirildiğı yerler ve kodları.....                              | 56    |
| Çizelge 3.8. Referans konut binasının, yapı kabuğı bileşenlerinin fiziksel ve boyutsal özellikleri .....        | 60    |
| Çizelge 3.9. Regresyon analizi girdileri ve açıklaması.....                                                     | 67    |
| Çizelge 4.1. Güney cephesi ısıtma dönemi SYM-FDM duvar oranlarına ait analiz sonuçları.....                     | 88    |
| Çizelge 4.2. Güney cephesi soğutma dönemi SYM-FDM duvar oranlarına ait analiz sonuçları .....                   | 89    |
| Çizelge 4.3. Batı cephesi ısıtma dönemi SYM-FDM duvar oranlarına ait analiz sonuçları.....                      | 90    |
| Çizelge 4.4. Batı cephesi soğutma dönemi SYM-FDM duvar oranlarına ait analiz sonuçları .....                    | 91    |
| Çizelge 4. 5. Kuzey cephesi ısıtma dönemi SYM-FDM duvar oranlarına ait analiz sonuçları .....                   | 92    |
| Çizelge 4.6. Kuzey cephesi soğutma dönemi SYM-FDM duvar oranlarına ait analiz sonuçları .....                   | 93    |
| Çizelge 4. 7. Doğı cephesi ısıtma dönemi SYM-FDM duvar oranlarına ait analiz sonuçları.....                     | 94    |
| Çizelge 4. 8. Doğı cephesi soğutma dönemi SYM-FDM duvar oranlarına ait analiz sonuçları .....                   | 95    |
| Çizelge 4.9. Standart Duvarının ve SYM-FDM Duvarının metrekare maliyeti .....                                   | 97    |

| <b>Çizelge</b>                                                                                                                                          | <b>Sayfa</b> |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------|
| Çizelge 4.10. Güney ve Doğu Cephesinde SYM-FDM duvar oranları ve standart duvar için hesaplanan ilk yatırım maliyeti ve işletme maliyeti değerleri..... | 98           |
| Çizelge 4.11. Kuzey ve Batı Cephesinde SYM-FDM duvar oranları ve standart duvar için hesaplanan ilk yatırım maliyeti ve işletme maliyeti değerleri..... | 99           |
| Çizelge 4.12. Aralık ve Temmuz Döneminde Standart Duvar ve SYM-FDM Duvarının İç yüzeyinde kaydedilen sıcaklık değerleri.....                            | 108          |
| Çizelge 4.13. SYM-FDM duvarının performansının yapılan çalışma ile kıyaslanması .....                                                                   | 109          |



## ŞEKİLLERİN LİSTESİ

| Şekil                                                                                                                                                                                                          | Sayfa |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| Şekil 1.1. Matematiksel analiz ve deneysel çalışmaya ait akış şeması.....                                                                                                                                      | 4     |
| Şekil 2.1. İç koşullar, iklim koşulları ve bina kabuğu arasındaki ilişki.....                                                                                                                                  | 13    |
| Şekil 2.2. Binalarda ısı transferinin ana mekanizmaları .....                                                                                                                                                  | 17    |
| Şekil 2.3. Yapı kabuğu bileşenlerinden ısı kayıp oranları .....                                                                                                                                                | 17    |
| Şekil 2.4. Şeffaf yalıtım malzemesi çalışma prensibi.....                                                                                                                                                      | 22    |
| Şekil 2.5. Binalarda SYM konfigürasyonları: (a) düz plaka güneş kollektörlerinde, (b) güneş duvarlarında ve (c) pencere sistemlerinde veya camlı cephelerde .....                                              | 23    |
| Şekil 2.6. SYM tiplerinin şematik diyagramları: (a) cam-dikey yapı: (a1) kılcal yapı, (a2) bal peteği yapısı, (a3) paralel çıta dizisi yapısı; (b) cam-paralel yapı; (c) karışık yapı ve (d) homojen yapı..... | 24    |
| Şekil 2.7. Saydam yalıtımlı duvarın çalışma ilkesi .....                                                                                                                                                       | 26    |
| Şekil 2.8. Faz değiştiren malzemenin çalışma prensibi.....                                                                                                                                                     | 28    |
| Şekil 2.9. FDM'lerin yapı elemanı ile birleşme yöntemleri .....                                                                                                                                                | 30    |
| Şekil 2.10. FDM'nin yapı kabuğu bileşenlerinde kullanımı.....                                                                                                                                                  | 32    |
| Şekil 3.1. Çalışma için tanımlanan değerlendirme stratejisi .....                                                                                                                                              | 35    |
| Şekil 3.2. SYM-FDM duvarının kesiti .....                                                                                                                                                                      | 37    |
| Şekil 3.3. Ankara ili meteorolojik verileri.....                                                                                                                                                               | 38    |
| Şekil 3.4. Matematiksel modelin doğrulanması .....                                                                                                                                                             | 39    |
| Şekil 3.5. Farklı konum adımı değerlerindeki iç yüzey sıcaklığı değişimleri .....                                                                                                                              | 40    |
| Şekil 3.6. Saydam yalıtım ve FDM entegreli dış duvar kesiti.....                                                                                                                                               | 44    |
| Şekil 3.8. Harman tuğla ve R1 termal paket ile kapsüllenmiş faz değiştiren malzemenin birleşimi .....                                                                                                          | 47    |
| Şekil 3.9. Hioki LR8450 Datalogger (1), Datalogger'ın sürekli çalışması için pano ve elektrik hat düzenlemesi (2).....                                                                                         | 57    |
| Şekil 3.10. Energy Plus kullanıcı arayüzü.....                                                                                                                                                                 | 58    |
| Şekil 3.11. DesignBuilder programının çok fonksiyonlu analiz şeması .....                                                                                                                                      | 59    |
| Şekil 3.12. Simülasyon aracı ile test edilecek konut binası planı .....                                                                                                                                        | 60    |

| <b>Şekil</b>                                                                                                                                                                                            | <b>Sayfa</b> |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------|
| Şekil 3.13. Referans konut binasının modeli.....                                                                                                                                                        | 61           |
| Şekil 3.14. (a) Standart duvarlı hacmin ısıtma-soğutma dönemi mekanik sistemin çalışma sıcaklığı, (b) SYM-FDM duvarının bulunduğu hacmin ısıtma-soğutma dönemi mekanik sistemin çalışma sıcaklığı ..... | 62           |
| Şekil 3.15. HVAC sistemi ile ilgili programda kabul edilen ayarlar .....                                                                                                                                | 63           |
| Şekil 3.16. Simülasyonun HVAC ayarları .....                                                                                                                                                            | 64           |
| Şekil 3.17. Simülasyon genel çözüm algoritması ayarları .....                                                                                                                                           | 65           |
| Şekil 3.18. Isıtma ve Soğutma analizleri için iç yüzey ve dış yüzey konveksiyon ayarları .....                                                                                                          | 65           |
| Şekil 3.19. Regresyon analizinin yapıldığı MATLAB kodu.....                                                                                                                                             | 66           |
| Şekil 4.1. Isıtma döneminde faz değiştiren malzemelerin (a) RT10HC, (b) RT18HC, (c) RT21HC, (d) RT22HC, (e) RT28HC faz değişim durumu.....                                                              | 71           |
| Şekil 4.2. Soğutma döneminde faz değiştiren malzemelerin (a) RT10HC, (b) RT18HC, (c) RT21HC, (d) RT22HC, (e) RT28HC faz değişim durumu.....                                                             | 72           |
| Şekil 4.3. Aralık ayı duvar iç yüzey sıcaklığı, hava sıcaklığı ve ışıınım şiddeti gerçek zamanlı ölçüm verileri .....                                                                                   | 74           |
| Şekil 4.4. Aralık ayında deney ünitelerinden gerçek zamanlı alınan ortalama radyant sıcaklık verileri .....                                                                                             | 75           |
| Şekil 4.5. Ocak ayı duvar iç yüzey sıcaklığı, hava sıcaklığı ve ışıınım şiddeti gerçek zamanlı ölçüm verileri .....                                                                                     | 76           |
| Şekil 4.6. Ocak ayında deney ünitelerinden gerçek zamanlı alınan ortalama radyant sıcaklık verileri .....                                                                                               | 77           |
| Şekil 4.7. Şubat ayı duvar iç yüzey sıcaklığı, hava sıcaklığı ve ışıınım şiddeti gerçek zamanlı ölçüm verileri .....                                                                                    | 78           |
| Şekil 4.8. Şubat ayında deney ünitelerinden gerçek zamanlı alınan ortalama radyant sıcaklık verileri .....                                                                                              | 79           |
| Şekil 4.9. Temmuz ayı duvar iç yüzey sıcaklığı, hava sıcaklığı ve ışıınım şiddeti gerçek zamanlı ölçüm verileri .....                                                                                   | 80           |
| Şekil 4.10. Temmuz ayında deney ünitelerinden gerçek zamanlı alınan ortalama radyant sıcaklık verileri.....                                                                                             | 81           |

| <b>Şekil</b>                                                                                                               | <b>Sayfa</b> |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------|
| Şekil 4.11. Ağustos ayı duvar iç yüzey sıcaklığı, hava sıcaklığı ve ısıtım şiddeti gerçek zamanlı ölçüm verileri.....      | 82           |
| Şekil 4.12. Ağustos ayında deney ünitelerinden gerçek zamanlı alınan ortalama radyant sıcaklık verileri.....               | 84           |
| Şekil 4.13. Isıtma döneminde Deneysel çalışma verisi ile DesignBuilder verisinin polinomsal uyumu.....                     | 86           |
| Şekil 4.14. Soğutma döneminde Deneysel çalışma verisi ile DesignBuilder verisinin polinomsal uyumu.....                    | 87           |
| Şekil 4.15. SYM-FDM duvarının dört cephede bulunma oranına göre yerleşimi .....                                            | 88           |
| Şekil 4.16. Güney cephesi ısıtma dönemi SYM-FDM duvar oranlarının analizine ait grafikler .....                            | 89           |
| Şekil 4.17. Güney cephesi soğutma dönemi SYM-FDM duvar oranlarının analizine ait grafikler .....                           | 90           |
| Şekil 4.18. Batı cephesi ısıtma dönemi SYM-FDM duvar oranlarının analizine ait grafikler.....                              | 91           |
| Şekil 4.19. Batı cephesi soğutma dönemi SYM-FDM duvar oranlarının analizine ait grafikler.....                             | 92           |
| Şekil 4.20. Kuzey cephesi ısıtma dönemi SYM-FDM duvar oranlarının analizine ait grafikler .....                            | 93           |
| Şekil 4.21. Kuzey cephesi soğutma dönemi SYM-FDM duvar oranlarının analizine ait grafikler .....                           | 94           |
| Şekil 4. 22. Doğu cephesi ısıtma dönemi SYM-FDM duvar oranlarının analizine ait grafikler.....                             | 95           |
| Şekil 4. 23. Doğu cephesi soğutma dönemi SYM-FDM duvar oranlarının analizine ait grafikler .....                           | 96           |
| Şekil 4. 24. SYM-FDM Güney cephesinde bulunma oranı [%] .....                                                              | 100          |
| Şekil 4. 25. SYM-FDM Kuzey cephesinde bulunma oranı [%].....                                                               | 101          |
| Şekil 4. 26. SYM-FDM Doğu cephesinde bulunma oranı [%] .....                                                               | 102          |
| Şekil 4.27. SYM-FDM Batı cephesinde bulunma oranı [%] .....                                                                | 103          |
| Şekil 4.28. Aralık ayına ait Farklı tipte SYM-FDM duvar uygulamalarının duvar dış yüzey sıcaklıkları karşılaştırması ..... | 106          |

## RESİMLERİN LİSTESİ

| Resim                                                                                                                                                               | Sayfa |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| Resim 2.1. Duvar yapısı ile kullanılan farklı makroenkapsülasyon formları.....                                                                                      | 33    |
| Resim 3.1. (a) R1 ve R2 makroenkapsülasyon, (b) şeffaf ve opak folyo makroenkapsülasyon .....                                                                       | 46    |
| Resim 3.2. Deney ünitelerinin inşa edildiği alanın uydu görünümü .....                                                                                              | 48    |
| Resim 3.3. (1) LR1000 Granül Aerogel, (2,3) Aerogel'in çift cam arasına dolum uygulaması .....                                                                      | 49    |
| Resim 3.4. (1) Granül Aerogel dolgulu çift camın cam çıtası uygulaması, (2) Sızdırmazlığı sağlamak için cam çıtasının etrafına tiyakol uygulanması .....            | 49    |
| Resim 3.5. (1) Tuğla gövdesindeki boşluğun kapsüllenmiş FDM ölçülerinde açılması, (2) R1 makroenkapsül ile kapsüllenmiş FDM'in tuğla gövdesine yerleştirilmesi..... | 50    |
| Resim 3.6. (1) ve (2) Harman Tuğla gövdesindeki boşluk ile FDM arasına su ile macun kıvamına getirilen bentonitin uygulanması .....                                 | 50    |
| Resim 3.7. (1) ve (2) Deney ünitelerinin kuzey, doğu ve batı cephelerine delikli tuğlanın örülmesi.....                                                             | 51    |
| Resim 3.8. (1) ve (2) Isıtma (RT18HC) ve Soğutma (RT22HC) döneminde kullanılacak olan FDM'lerin olduğu ısı depolama duvarının karma düzende örülmesi .....          | 52    |
| Resim 3.9. (1) Tuğla gövdesindeki boşluğun kapsüllenmiş FDM ölçülerinde açılması, (2) R1 makroenkapsül ile kapsüllenmiş FDM'in tuğla gövdesine yerleştirilmesi..... | 52    |

## SİMGELER VE KISALTMALAR

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

### Simgeler

### Açıklamalar

|                |                  |
|----------------|------------------|
| %              | Yüzde işareti    |
| cm             | Santimetre       |
| m              | Metre            |
| m <sup>2</sup> | Metrekare        |
| m <sup>3</sup> | Metreküp         |
| °C             | Santigrat derece |
| W              | Watt             |
| K              | Kelvin           |
| J              | Joule            |
| MJ             | Megajoule        |
| kJ             | Kilojoule        |
| kWh            | Kilowatt saat    |

### Kısaltmalar

### Açıklamalar

|               |                                            |
|---------------|--------------------------------------------|
| FDM           | Faz Değiştiren Malzeme                     |
| SYM           | Saydam Yalıtım Malzemesi                   |
| SYM-FDM Duvar | Saydam Yalıtımlı Gizli Isı Depolama Duvarı |

## 1. GİRİŞ

Enerji, insan faaliyetinin omurgası olarak kabul edilir; enerji talebini artıran küresel nüfus da artmaktadır (Dwivedi ve diğerleri 2016). Bu küresel nüfusun artmasıyla orantılı olarak gelişim gösteren inşaat sektörü, başta ısıtma ve soğutma talepleri nedeniyle, dünya enerji tüketiminde oldukça yüksek bir paya sahiptir (Hojjati ve Wade, 2012). Küresel olarak enerji talebinin ve dolaylı olarak sera gazı seviyesinin artması nedeniyle, araştırmacılar sürekli olarak enerji depolama ve arzı için daha yeşil alternatifler aramaktadır.

Binalarda enerji tüketimini azaltmak ve düşük enerjili bina uygulamalarını olanaklı kılmak amacıyla; bina kabuğunda çeşitli pasif güneş teknolojileri uygulanmaktadır. Pasif ısıtma sistemlerinin uygulanacağı binalarda çok katmanlı yapıda olan duvarlarda kullanılan malzemelerin optik ve termofiziksel özellikleri duvarın birim alanından dış ortam sıcaklığı ve güneş ışınımı etkileriyle kazanılan ve kaybedilen ısı miktarlarının belirleyicisi olması nedeniyle ısı performansını önemli ölçüde etkilemektedir. Duvarlarda pasif tasarım ilkelerini esas alarak yapılan ısı depolama ile ilgili çalışmalarda dikkat edilmesi gereken diğer bir parametre ise duvar yüzeyinden dış mekâna olan ısı kayıplarını engellenmesidir. Duvar iç ya da dış yüzeyine uygulanan opak yalıtım malzemeleri kışın iç ortamdan dış ortama doğru oluşan ısı kayıplarını engellemektedir. Ancak kış güneşinden pasif yöntemle fayda sağlayamamaktadır. Saydam yalıtım malzemeleri güneş ışınımı geçirgenliğine sahip olması nedeniyle geleneksel yalıtım malzemelerinden bu özelliği ile ayrılmaktadır. Saydam – yarı saydam duvarlarla uygulandığında iç ortamın doğal ışıkla aydınlanmasına katkı sunarken opak duvar önüne uygulandığında radyasyon etkisi ve yüksek yalıtım özelliği ile duvarın ısı kütlesi olarak çalışmasında etkili olmaktadır.

Pasif tasarım yaklaşımı ile binaların enerji talebini azaltmak amacıyla kullanılan yöntemlerden bir diğeri, ısı kütleden yararlanarak enerji depolamanın yapılmasıdır. Kışın güneşin etkili olduğu gündüz saatlerinde radyasyon ile kazanılan enerji ısı kütlesinde depolanmakta, güneş etkisinin olmadığı gece saatlerinde depolanan enerji malzemenin özelliklerine bağlı olarak zaman gecikmesi ile iç ortama verilmektedir. Bu sayede iç ortam konfor koşulları pasif yöntemle sağlanmakta olup binaların ısıtma ihtiyacı için gereken enerji yükü azalmaktadır. Son zamanlarda, binalarda algılanabilir ısı enerjisi yerine daha yüksek miktarda ısı depolama özelliğine sahip olan ve ısı enerjisini gizli ısı şeklinde

depolayan faz değiştiren malzemelerin kullanılması umut verici bir yöntem olarak kabul edilmektedir. Faz değiştiren malzemeleri kendi sıcaklıkları neredeyse sabit bir sıcaklıkta kalırken bir üst faza geçebilmek için büyük miktarlarda enerji depolamakta (katı-sıvı, sıvı-gaz fazında), bir alt faza geçebilmek için (sıvı-katı, gaz-sıvı) bulunduğu ortama yüksek miktarda ısı enerjisini yaymaktadır. Sonuç olarak, ısıl konforu artırırken binaların enerji yükünü ve pik ısıtma - soğutma yüklerini azaltmaktadır (Kuznik ve diğerleri, 2011; Baetens ve diğerleri, 2010). Yapı kabuğuna entegre kullanılan FDM'nin beklenen performansı gösterebilmesi için malzemenin erime/katılaşma sıcaklığı uygulanacağı bölgenin iklim özelliğine uygun seçilmeli, çok katmanlı yapı elemanındaki konumuna bileşenlerin termofiziksel özellikleri dikkate alınarak karar verilmeli, yapı elemanı ile doğru yöntemle birleştirilmelidir.

SYM ve FDM entegreli duvar sistemine yönelik ilk alışmalar Laboratory for Heating, Sanitary and Solar Technology at the Faculty of Mechanical Engineering in Ljubljana'da gerçekleştirilmiştir (Stritih ve Medved,1994; Stritih ve diğerleri, 1994). Bu çalışmada duvar katmanları dıştan içe SYM'i dış ortam koşullarından korumak için cam panel, arkasında SYM, saydam plastik ereve içine FDM, hava boşluğu, yalıtım ve sıva olarak tanımlamıştır. Manz ve diğerlerinin çalışmasında (1997) yarı saydam SYM-FDM duvarı önerilmiştir. FDM entegreli cam tuğla hava boşluğu ile SYM yalıtım ünitesine bağlanmaktadır. Bu alışmada SYM'nin yüksek güneş ışını geçirgenliği nedeniyle duvarın aşırı ısınmasını önlemek için gölgeleme elemanı olarak stor konulmuştur. Kienzl (1999) yarı saydam SYM-FDM duvarını geliştirerek SYM'nin önüne elektrokromik cam yerleştirmiştir. Bu sayede güneşi kontrollü almayı hedefleyerek FDM'nin etkinliğini arttırmıştır. Heim çalışmalarını (2004,2006), duvar önü saydam yalıtım uygulaması üzerine yapmıştır. FDM'i duvar malzemesine emdirerek duvar yüksek enerji depolayan bir yapı elemanı haline getirilmiştir. Bu duvar hava boşluğu ile saydam yalıtım ünitesine bağlanmıştır. Sonrasında yapılan çalışmalarda yarı saydam SYM-FDM duvarının yaz ve kış koşulundaki performansını geliştirmeye yönelik yenilikler ortaya konmuştur (Berthou ve diğerleri, 2015; Souayfane ve diğerleri, 2018; Souayfane ve diğerleri, 2019)

SYM-FDM duvarı ile ilgili yapılan sayısal, simülasyon ve deneysel yöntemlerle desteklenmiş çalışmalarda, bu yenilikçi duvarın iç ortam konfor koşulların stabilizasyonunu sağlamada ve binaların performansını arttırarak enerji tüketiminin azaltılmasında etkili olduğu belirlenmiştir. SYM-FDM duvarı üzerine yapılan çalışmaların daha çok yarı saydam

duvar tipinde olduğu görülmüştür. Opak duvar tipinde de FDM'nin malzemeye entegre edilmesi için genel olarak doğrudan dahil etme ve emdirme teknikleri kullanılmıştır. Burada karşılaşılan sorun, bu yöntemlerin sızıntılara sebep olabilmesi, yapı mekanik özelliklerini ve dayanıklılığını olumsuz etkilemesi gibi yapısal olabilmektedir. FDM'nin kapsüllenmiş halde malzeme içine gömülü kullanımında böyle sorunlarla karşılaşmadığı gibi sahada uygulanabilirliği daha kolaydır. Bu nedenle, SYM-FDM duvarına FDM'nin duvar malzemesine gömülü olarak kullanıldığı araştırmalar incelenmiş ve bu alanda açığın olduğu tespit edilmiştir. Bu çalışma, iki tek cam arasına doldurulan arojel dolgu ile oluşturulan saydam yalıtım ünitesi ile gövdesinde gömülü FDM bulunan harman tuğladan oluşan tuğla duvarın entegre kullanımına dayanan opak SYM-FDM duvarının ısı performans analizini yaparak literatürdeki boşluğu dolduracaktır.

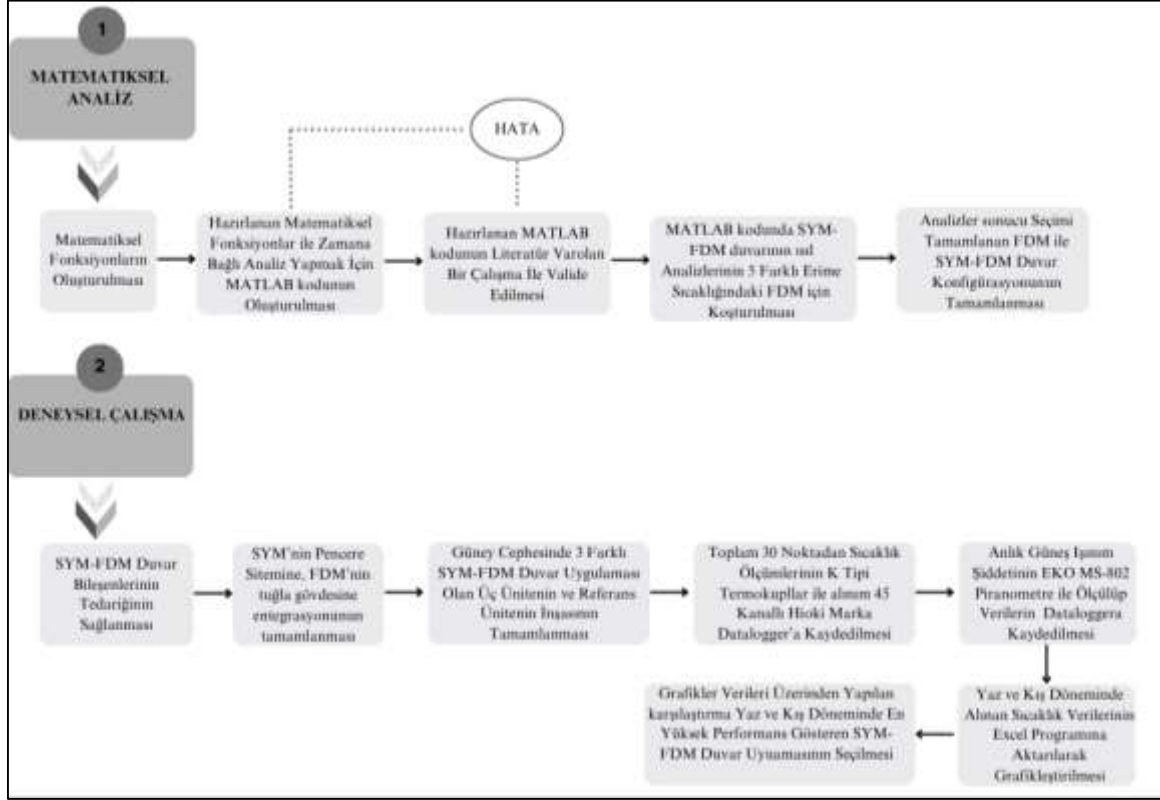
Çalışma, birbirine girdi sağlayan üç farklı yöntem kullanıldığı beş adımlı bir metodolojiye dayanmaktadır.

Çalışmanın ilk adımında; saydam yalıtımlı gizli ısı depolama duvarının genel kurgusuna literatür araştırması ile karar verilmiştir. Bu aşamada katmanların sıralanması, katman kalınlıkları belirlenmiştir. Genel kurgusu yapılan bu duvar sisteminin performans analizinin Ankara iklim bölgesinde ve konut yapısı için yapılacağına karar verilmiştir.

Çalışmanın ikinci adımında, SYM-FDM duvarının analizinin yapılacağı Ankara ilinin iklim koşulunda performans gösterecek olan FDM'nin seçilmesi için matematiksel analiz yapılmıştır. Matematiksel analiz için MATLAB kodu geliştirilmiştir. Geliştirilen kod ile beş farklı erime sıcaklığındaki malzeme (RT10HC, RT12HC, RT18HC, RT22HC, RT28HC) duvar sistemine ayrı ayrı entegre edilerek analizi yapılmıştır. Isıtma ve soğutma döneminde performans gösteren FDM'ler belirlenmiştir. Bu çalışma adımı sonucunda SYM-FDM duvar tasarımı son halini almıştır.

Çalışmanın üçüncü adımında, duvar tasarımı belirlenen SYM-FDM duvarının ısı analizleri gerçek koşullar altında ölçümlerin yapıldığı deney çalışmadan alınan veriler ile yapılmıştır. Deney çalışması için 4 deney ünitesi inşa edilmiştir. 3 deney ünitesinin güney duvarına farklı uygulamalara sahip SYM-FDM duvarı entegre edilmiştir. Bu deney ünitelerinden elde edilen verilerin karşılaştırılması dört cephesi standart duvardan oluşan deney ünitesi ile yapılmıştır. Deney çalışması sonucunda elde edilen veriler ışığında en yüksek performans

gösteren SYM-FDM duvar uygulaması belirlenmiştir. Deneysel çalışma ve matematiksel analize ait akış şeması Şekil 1.1’de verilmiştir.



Şekil 1.1. Matematiksel analiz ve deneysel çalışmaya ait akış şeması

Çalışmanın dördüncü basamağında, en yüksek performans gösteren SYM-FDM duvar uygulaması bina ölçeğinde analizleri DesignBuilder programı ile yapılmıştır. Analizler için 2+1 plan yapısına sahip TOKİ Turkuaz konut projesi kullanılmıştır. Bu analizlerde, SYM-FDM duvarı her cephede %20 - %100 aralığında %20 artan adımla uygulanmış olup her oran için ısıtma – soğutma enerji yükleri belirlenmiştir.

Çalışmanın beşinci ve son basamağında, her cephe için optimum SYM-FDM duvar oranı maliyet – performans bağlamında belirlenmiştir. Bu basamakta, her oran için geri ödeme süresi ve toplam enerji yükü verileri arasındaki ilişki maksimum – minimum normalizasyonu ile kurulmuştur. Normalize edilmiş veriler ile geri ödeme süresi, performans eğrisinin çakıştığı nokta o cephe için optimum SYM-FDM oranı olarak kabul edilmiştir.

Çalışmanın sonucunda, SYM-FDM duvarının bina enerji performansını hem ısıtma hem de soğutma döneminde arttırdığı belirlenmiştir. Ortam sıcaklığındaki dalgalanma azalmış ve iç ortam konfor sıcaklığı korunmuştur. Performans ve maliyet bağlamında yapılan optimizasyon çalışması ile uygulayıcılara ve araştırmacılara her cephe için uygulanabilir optimum SYM-FDM duvar oranı bilgisi sunulmuştur. Sonuç olarak bu çalışma kapsamında pasif tasarım stratejilerini kullanarak bina enerji performansına katkı sunan yenilikçi duvara ait verilere somut bir şekilde ortaya konmuştur. Çalışma hem pratikte hem de teorik çerçevede bilimsel literatüre katkı sağlayarak yapı sektöründe çevresel etki düzeyi düşük, güneş enerjisini pasif tasarım ile sisteme aktararak fosil kaynaklı enerji tüketimini azaltan ve bu sayede binalardan kaynaklı karbon emisyon değerini düşürülmesine katkı sunarak çevresel sürdürülebilirliğin sağlanmasına katkı sunacaktır.

#### Problemin tanımı

Son yıllarda dünyada enerji talebinin artmasına bağlı olarak fosil kaynaklı enerji tüketimindeki artış atmosfere salınan karbon emisyon miktarını da arttırmaktadır. Bunun sonucunda dünya küresel ısınma, iklim değişikliği etkileri, enerji krizi ve çevre sorunları tehdidiyle karşı karşıya kalmaktadır. Bu sorunlarla savaşmanın en hızlı, en etkili ve en ucuz yolları; enerji tüketimini azaltmak ve talep edilen enerjiyi yenilenebilir kaynaklardan karşılamaktır.

Uluslararası enerji ajansı (IEA-International Energy Agency) ülkeleri arasında yapılan bir çalışmaya göre binalar en önemli enerji tüketen kaynaklardan biri olarak toplamda kullanılan elektriğin %55'ini, doğalgazın %35'ini tüketmektedirler ve oluşan sera gazlarının %37'inden sorumludur (IEA, Global natural gas demand per sector, 2007-2025; United Nations Environment Programme, 2020). Bina sektörü, temel olarak ısıtma ve soğutma taleplerinden dolayı dünya enerji tüketiminde %35 gibi oldukça yüksek bir paya sahiptir (United Nations Environment Programme, 2020; Hojjati and Wade, 2012). Binaların toplam ısı kaybının %60-80'ini bina kabuğundaki ısı kaybının oluşturması, bina kabuğunun ve özellikle duvar gövdesinin ısı performansının iyileştirilmesine yönelik alınacak önlemlerin enerji verimliliği açısından ne derece önemli olduğunu ortaya koymaktadır (Ozel, 2013; Jelle, 2011; Khoukhi ve ark., 2019).

Binalarda enerji tüketimini azaltmak ve düşük enerjili bina uygulamalarını olanaklı kılmak amacıyla; bina kabuğunda çeşitli pasif güneş teknolojileri uygulanmaktadır. Pasif güneş stratejilerinin yapı kabuğundan en çok ısı kayıplarının görüldüğü duvarlar için uygulanması, duvarların termal kütle etkisini arttırmaktadır. Cam yünü, taş yünü gibi inorganik malzemeler ve sentetik-organik köpükler (genleştirilmiş polistren-eps, ekstrude polistren-xps, poliüretan) gibi geleneksel yalıtım malzemelerinin opak olmasından dolayı güneş enerjisinden fayda sağlayamaması, çevresel etkilere sahip olması, geri dönüştürülebilir olmaması ve genel olarak üretimlerinde birincil enerji kaynaklarının kullanılması; günümüzde sürdürülebilir ve enerji etkin tasarımın etkili olduğu, gelecek için sıfır enerjili binaların hedeflendiği mimarlık disiplininde yenilikçi malzemeler üzerindeki çalışmaları artırmıştır. Bu bağlamda saydam yalıtım malzemeleri (SYM) fiziksel özelliklerine bağlı olarak yapı kabuğunda ısı kayıplarının en aza indirgenmesine, masif duvar ö nü uygulamalarında güneş ışınlarını duvara ileterek duvarın ısıl kütle olarak çalışmasını sağlayan yenilikçi malzemelerdir.

Binaların enerji tüketimini azaltmak için kullanılan yöntemlerden bir diğeri ise, termal depolamadır. Son zamanlarda, bu termal enerjiyi gizli ısı şeklinde depolayan “faz değıştiren malzemelerin (FDM)” binaların dış duvarlarına entegre edilerek kullanılması araştırmacılar ve çevre duyarlı uygulamacılar tarafından umut verici bir yöntem olarak kabul edilmiştir. Faz değıştiren malzemeleri ö ne çıkartan bir diğ er özelliğ i ise; birim hacim başına geleneksel yapı malzemelerinden daha fazla ısı depolama kapasitesine sahip olmasıdır. FDM’nin bina dış duvarına entegre edilmesi, iç ortamı ısıtma ve soğutma için kullanılan pik enerji gücünün azaltılmasını, pik ısıtma ve soğutma yüklerinin genel kullanımın yoğun olmadığı düşük tarife ücretini uygulandığı saatlere kaydırılmasını, iç ortamın iyileştirilmesini, pasif ısıtma ve soğutma yüklerinin verimli kullanılmasını sağlamaktadır (Kuznik F., David D., Johannes K. and Roux J-J., 2011; Baetens ve diğ erleri, 2010; Pomianowsk, ve diğ erleri, 2013).

Pasif tasarım stratejisine uygun çalışan bu iki yenilikçi malzemenin kombinasyonu ile tasarlanan duvar sistemi ile ilgili literatürde 1996-2019 yılları arasında yapılan sınırlı sayıda çalışma bulunmaktadır. Bu çalışmalar genel olarak yarı saydam özellikte SYM-FDM duvarının analizi üzerinedir. SYM-FDM duvarının opak tasarımına ait çalışma çok az sayıdadır. Bu çalışmalar duvar konfigürasyonunun kesit üzerinden matematiksel analiz yaparak duvarın performansını ortaya koymaktadır ve ısıtma dönemi için performans incelenmiştir. İklim koşuluna direk maruz kalacak ilk yatırım maliyeti yüksek bir yapı

kabuğu bileşeninin ısıtma ve soğutma dönemlerinde yüksek performans göstermesi önemlidir. Ayrıca yenilikçi bir ürünün uygulama sahasında yerini alması için bu ürünün tasarım, performans ve maliyet anlamında bütüncül bir değerlendirilmesinin yapılması gerekmektedir. Bunun için de bu ürünün bina ölçeğinde analizlerinin yapılması ve elde edilen performans verilerinin bütüncül bakış açısı ile değerlendirilmesi gerekmektedir. Özetle, literatürde bu konuda yapılan çalışmalar başlangıç aşamasında olup bütüncül bir bakış açısıyla ve gerçek zamanlı ölçüm verileri yenilikçi duvar sisteminin performansını ortaya koyan bir çalışma bulunmamaktadır.

#### Araştırmanın amacı

Yapı sektöründe enerji tüketimini azaltmak için pasif ev, neredeyse sıfır enerjili binalar, sıfır enerjili binalar gibi farklı stratejiler geliştirerek dünyanın toplam enerji tüketiminde binaların payını azaltmak amaçlı çalışmalar yapılmaktadır. Bina ölçeğinde yapılan çalışmaların bazıları da teknolojinin gelişmesiyle evrilen, çevresel koşullara cevap veren yapı malzemelerinin üretilmesi ve geliştirilmesi üzerinedir. Yenilikçi yapı malzemelerinden olan faz değiştiren malzeme ve saydam yalıtım malzemesi, enerji etkin binalar için pasif çözümler sunması ve güneş enerjisini kullanması yönüyle son dönemde oldukça ilgi görmektedir.

Bu çalışmanın amacı, pasif tasarım stratejilerini kullanan ve değişen ortam koşullarına aktif olarak yanıt verebilen, enerji performansı yüksek çok katmanlı bir dış duvar tasarlamaktır. Bu duvar sisteminin hem ısıtma hem de soğutma dönemlerinde performans göstermesi ve bina işletim maliyetini düşürerek bina enerji performansını arttırması hedeflenmektedir. Bu çalışmada amaçlanan bir diğer husus, tasarlanan yenilikçi duvarın akademik çalışma düzeyinde kalmasının önüne geçmek, uygulama sahasına yerini bulmasını kolaylaştırmak adına tasarım, performans ve maliyet konularında detaylı ve bütüncül bir bakış açısıyla uygulayıcılara ve araştırmacılara bilgi sunmaktır.

Bu çalışma ile fosil yakıt kullanımından kaynaklı küresel ısınma, çevre kirlilikleri gibi problemlere yenilenebilir enerji kaynakları ile çözüm sağlanmış olacaktır. Bu problemlerin önüne geçilmesiyle yaşam kalitesine, sürdürülebilir çevre ve enerjiye, iklimsel bozulmalar sonucunda ülkemizde ve diğer ülkelerde yaşanan doğal afetlerden kaynaklanan sosyal sorunlara getirilecek çözümlere katkı sunarak toplumsal ve kültürel etki oluşturmaları

hedeflenmektedir. Çalışmada kullanılan yenilikçi malzemelerin ülkemizde tanınması ve kullanılması noktasında bu malzemelerin geliştirilmesine yönelik yeni çalışma alanların oluşması veya var olan çalışmalara yeni bir soluk getirerek hem akademik ortamda hem de inşaat sektöründe farkındalığı arttırarak ekonomik etki oluşturmaları beklenmektedir. Çalışma sonucunda hedeflenen bu etkilere ek olarak; yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımının desteklemesiyle dışa bağımlı ve doğaya zarar veren fosil yakıt kaynaklı enerjiye duyulan ihtiyacı bina ölçeğinde azaltarak enerji güvenliğine katkı sunması da çalışmanın ulusal güvenlik anlamında hedeflediği etkilerdendir.

#### Araştırmanın önemi ve özgün değeri

Bu araştırma, yapı kabuğu bileşenlerinde yenilikçi malzemelerin entegre kullanımına odaklanarak, binaların enerji performansını artırmayı ve çevresel etkilerini azaltmayı hedeflemektedir. Günümüzde enerji etkin yapı tasarım anlayışı çerçevesinde pasif tasarım stratejilerinin yapıya entegre edilmesi büyük önem taşımaktadır. Bu kapsamda, çalışmada geliştirilen SYM-FDM duvar sistemi, fosil yakıt kaynaklı enerji tüketimini azaltmaya yönelik etkili bir yapı elemanı olarak ele alınmıştır.

Literatürde saydam yalıtımlı gizli ısı depolama duvarı iki farklı teknik ele alınmıştır. İlk yarı saydam özelliktedir ve iç mekanın gün ışığıyla aydınlanmasına imkan sağlarken ısı konforunda sağlanmasında, bina enerji performansının artmasında katkı sunmaktadır. SYM-FDM duvarı ile ilgili çalışmaların geneli bu konu üzerine yapılmıştır. Stritih ve Novak (1996), polikarbonattan yapılmış şeffaf plastik kap içine doldurulmuş siyah parafin faz değiştiren malzeme ve dış kısmında yer alan şeffaf yalıtım malzemesinden oluşan duvar sistemi sayısal ve deneysel olarak incelemişlerdir. Manz ve diğerleri (1997), tuz hidrat faz değişim malzemesini ve polimetilmetakrilat (PMMA) saydam yalıtım malzemesini birleştiren iki katmanlı bir pasif duvar sistemini önermiştir. Dıştan içe doğru sırayla saydam yalıtım – cam tuğla içine doldurulmuş faz değiştiren malzeme olacak şekilde konfigürasyonu yapılan duvar sisteminin İsviçre, Zürih iklim koşullarındaki ısı performansını incelenmiştir. Bu çalışma, sonrasında yapılacak olan yarı saydam gizli ısı depolama duvarı ile ilgili çalışmalara öncü niteliğindedir. Benzer duvar konfigürasyonunu; farklı saydam yalıtım ve faz değiştiren malzemeleri, farklı malzeme kalınlıkları kullanarak farklı iklim bölgelerindeki performansını araştıran birçok çalışma yapılmıştır (Kienzl, 1999; Berthou ve diğerleri, 2015; Souayfane ve diğerleri, 2018; Souayfane ve diğerleri, 2019).

SYM-FDM duvarının diğer tasarım tekniğinde duvar termal duvar özelliğindedir. Saydam yalıtım malzemesi ile kazanılan radyasyon enerjisi faz değiştiren malzeme entegreli duvarda depolanır. Faz değişim aralığında hal değiştirerek depolanan gizli ısı ortama yayılır veya ortamdaki ısı emilir. Bu sayede iç ortam sıcaklığı dalgalanma göstermeden konfor sıcaklığı seviyelerinde tutulur ve enerji tüketimi azaltılır. Bu SYM-FDM duvar tekniği özelinde yapılan ilk çalışmada Heim ve Klemm (2003), saydam yalıtım malzemesi ile FDM-seramik kompozitten oluşan saydam yalıtımlı gizli ısı depolama termal duvarının kış koşullarındaki ısı performansını analiz etmiştir. Analiz sonucunda, kurulan duvar sisteminin gündüz ve gece sıcaklık dalgalanmalarını önemli ölçüde azalttığı görülmüştür. Heim (2004), sonraki çalışmada, aynı duvar konfigürasyonunun yaz ve kış iklim koşullarında nasıl performans gösterdiğini araştırmış, duvarın kış aylarında daha yüksek performans gösterdiği sonucuna ulaşmıştır.

Literatür analizinde, SYM-FDM duvarının termal duvar tekniğinde yapılan çalışmaların oldukça kısıtlı ve başlangıç aşamasında olması bu alanda yoğunlaşılmasında etkili olmuştur. Bu alanda yapılan çalışmalarda duvar sisteminin genel olarak ısıtma dönemindeki performansı değerlendirilmiş ve FDM seçimi de ısıtma dönemi iklim özellikleri dikkate alınarak yapılmıştır. Bu çalışmada, SYM-FDM duvarının hem ısıtma hem de soğutma döneminde performans göstermesi için iki farklı erime sıcaklığındaki FDM aynı oranda tuğla duvar gövdesine gömülerek uygulanmıştır. Bu uygulama tekniği SYM-FDM duvarı için ilktir ve literatüre özgün nitelikte katkı sunması açısından da önemlidir.

Önceki çalışmalarda SYM-FDM duvarının performans analizleri kesit üzerinden yapılmış olup elde edilen veriler ışığında performans ölçeğinde değerlendirme yapılmıştır. Bu çalışmada tasarlanan SYM-FDM duvarının kesiti üzerinden matematiksel analiz yapılarak iklime uygun FDM seçilmesi sağlanmıştır. Matematiksel analiz sonucunda elde edilen verilerle tasarımı tamamlanan duvar sisteminin deneysel çalışma ile gerçek ortam koşullarındaki ısı ölçümleri alınmıştır. Deneysel çalışmayla SYM-FDM duvarının üç farklı uygulaması ve karşılaştırmanın yapılabilmesi için standart duvardan oluşan referans deney ünitesi analiz edilmiştir. Deneysel çalışma sonucunda en yüksek performans gösteren SYM-FDM duvar uygulaması seçilmiştir. Bundan sonraki aşamada bina ölçeğinde farklı cephelerde farklı oranlarda uygulanma durumunda bina enerji performansına etkisini gözlemek için simülasyon ile analiz yapılmıştır. Bu analiz sonucunda her cephe için farklı oranlarda SYM-FDM uygulamasının performans verileri elde edilmiştir. En son aşamada ise

elde edilen veriler performans – maliyet bağlamında değerlendirerek her cephe için optimum SYM-FDM duvar oranı belirlenmiştir. Çok basamaklı ve farklı parametrelerin bütüncül olarak değerlendiren ilk çalışma olması nedeniyle önemlidir.

Sürdürülebilir yaşamın, enerji etkin çözümlerinin tartışıldığı günümüzde, konut binalarını ısıtma ve soğutma için gereken enerji tüketimini azaltabilecek yenilikçi malzemelerle pasif çözüm sunmayı hedefleyen bu çalışma enerji verimli teknolojileri ileriye taşıma noktasında da özgün değerleri ile katkı sunmaktadır. Yapı sektöründe yenilikçi malzeme kullanımı konusunda farkındalık yaratılması ve bu alandaki teknolojik gelişmelerin yaygınlaştırılması açısından çalışmanın önemli bir etki potansiyeli bulunmaktadır.

#### Sınırlılıklar/varsayımlar

Araştırmaya ilişkin sınırlılıklar her yöntem basamağı için ayrı ayrı belirlenmiştir. Bu sınırlamaları, literatür taraması sonucunda elde edilen bilgiler doğrultusunda edilen veriler, TS 825 (2008) standardındaki veriler ve kullanılan simülasyon programında seçilen parametrelere göre şekillenmiştir.

Analizlerin Ankara ili iklim koşulunda yapılması çalışmanın öncelikli sınırlılığdır. Ankara ilinin iklim özelliklerinden dolayı gün içerisinde yüksek sıcaklık farkının yaşanması iç ortam sıcaklık dalgalanmalarının artmasını doğrudan etkilemektedir ve buna bağlı olarak da enerji tüketimi artmaktadır. SYM-FDM duvarının bina enerji performansındaki etkisini analiz etmek için enerji tüketimin yüksek olduğu Ankara ili çalışma için seçilmiştir.

SYM-FDM duvarının matematiksel analizi MATLAB kodu ile gerçekleştirilmiştir. Bu çalışma basamağındaki matematiksel modelleme ve enerji performans analizi belirli varsayımlar çerçevesinde gerçekleştirilmiştir. Analizde ısı transferi tek boyutlu olarak ele alınmış olup, duvarın kenar etkileri ve üç boyutlu ısı yayılımı ihmal edilmiştir. Bu durum, homojen malzeme dağılımı varsayımıyla sınırlandırılmıştır. Ayrıca, FDM'nin tuğla boşluklarını tamamen doldurduğu kabul edilmiş; pratikte oluşabilecek hava katmanları ihmal edilmiştir. Çözümün 24 saatlik zaman dilimleri içerisinde periyodik olarak değişimini sağlamak için üç günlük çözümün son 24 saatlik sonuçları incelenmiştir. Modelde, uzamsal ve zamansal çözünürlükler arasında uygun bir ilişki sağlayarak sayısal modelin kararlılığını ve yakınsamasını sağlamak için Courant-Friedrichs-Lewy (CFL) koşulu (Courant ve

diğerleri, 1928) kullanılmıştır. Konum adımı analiz süresi ve farklı konum adımlarındaki iç yüzey sıcaklığın değişim parametreleri dikkate alınarak konum adımı 0.004 metre, zaman adımı da bu konum adımı için CFL koşulu ile belirlenen ( $CFL \leq \Delta x$ ) 1,2 saniye kullanılmıştır.

Çalışmanın deneysel çalışma kısmı için inşa edilen deney ünitelerinin güney cephesinde SYM-FDM duvarı diğer üç cephesinde standart duvar uygulanmıştır. Standart duvar malzemelerinin, katman kalınlıklarının ve duvarın ısı geçirgenlik katsayısının belirlenmesinde TS 825 (2008) standardı referans alınmıştır.

Çalışmanın bina enerji performans analizleri bölümünde, EnergyPlus motorunu kullanan lisanslı ve ücretli bir program olan DesignBuilder v7.3.1.003 sürümü kullanılmıştır. Analizler, sürekli kullanımın olduğu konut binası için yapılmıştır. Analizler de TOKİ Turkuaz 2+1 konut projesinin planı kullanılmıştır. Bina bileşenleri TOKİ inşaat mahal listesine uygun olacak şekilde programa tanımlanmıştır.

Çalışmanın optimizasyon kısmında, ısıtma için kullanılan yakıtın (doğalgaz) birim fiyatı ve alt ısı değeri BOTAŞ (2022) verilerinden elde edilmiştir. Soğutma için elektrik birim fiyatı TÜİK verilerinden ve soğutma sisteminin performans katsayısı (COP) değeri Mangan ve Oral'ın (2016) yaptığı çalışmadan alınmıştır. Malzemelerin maliyet hesabında firmalardan edinilen 2024 güncel fiyatlara işçilik bedelleri eklenerek nihai halleri kullanılmıştır.

### Araştırma sorusu

Pasif tasarım stratejileriyle geliştirilen, değişen iklim koşullarına uyum sağlayabilen çok katmanlı bir dış duvar sistemi, bina enerji performansını artırarak ısıtma ve soğutma yüklerini anlamlı şekilde azaltabilir mi?

### *Alt araştırma soruları*

- Hangi pasif tasarım stratejileri, dış duvar sistemleri özelinde enerji tüketimini azaltmada daha etkilidir?
- Saydam yalıtım malzemeleri (SYM) ve faz değiştiren malzemeler (FDM) gibi yenilikçi bileşenlerin çok katmanlı bir duvar sistemine entegrasyonu, mevsimsel performansa nasıl katkı sağlar?

- Tasarlanan duvar sistemi, mevcut standart duvarlara göre ısıtma ve soğutma dönemlerinde ne ölçüde enerji tasarrufu sağlar?
- Duvar performansında elde edilen enerji verimliliği, ilk yatırım ve geri ödeme süresi açısından ne tür ekonomik sonuçlar doğurur?
- Geliştirilen sistemin farklı cephe yönelimlerinde (kuzey, güney, doğu, batı) performans değişkenliği nasıldır ve hangi oranlarda uygulanması optimum kabul edilebilir?

### Çalışmanın hipotezi

Pasif tasarım stratejileriyle geliştirilen, dinamik çevresel koşullara uyum sağlayan adaptif duvar sistemi, termal performansı optimize ederek ısıtma ve soğutma yüklerini azaltarak bina enerji performansını arttıracaktır.

### *Çalışmanın alt hipotezleri*

Alt hipotez 1, SYM katmanı, güneş ışıınımını difüz ederek FDM'in etkinliğini artırır ve iç ortam sıcaklık stabilizasyonuna katkı sağlar.

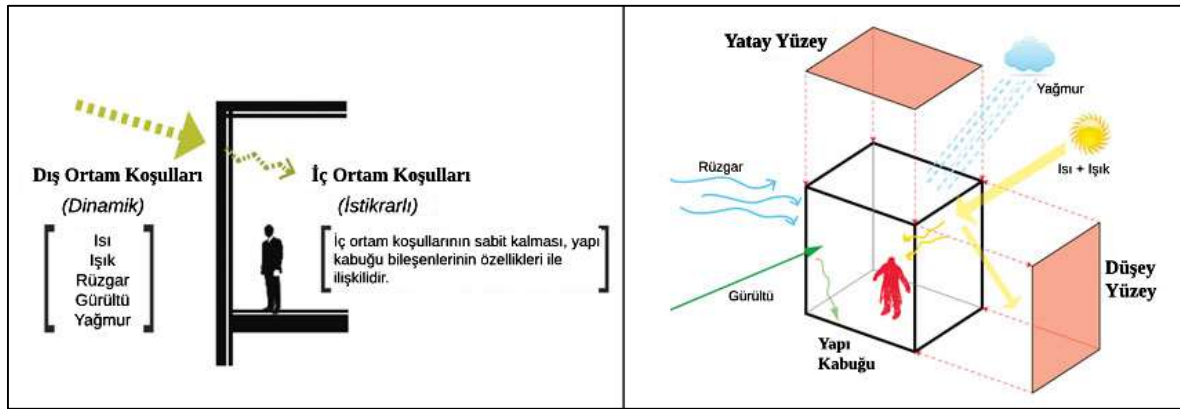
Alt hipotez 2, FDM entegrasyonu, duvarın ısı kütlesi etkisini artırarak iç ortam sıcaklık dalgalanmalarını minimize eder.

Alt hipotez 3, FDM'nin uygun ergime sıcaklığına göre seçilmesi, hem yaz hem kış koşullarında ısı akışını düzenleyerek enerji tasarrufu sağlar.

Alt hipotez 4, hava boşluğu ile oluşturulan yalıtım etkisi, konveksiyonel ısı geçişini sınırlandırarak duvarın ısı geçirgenliğini azaltır.

## 2. KAVRAMSAL ÇERÇEVE VE LİTERATÜR TARAMASI

Yapı kabuğu, yalnızca bir yapının iç mekânını dış ortam koşullarından ayıran pasif bir fiziksel sınır değildir aynı zamanda iç mekânın termal, akustik, görsel ve hava kalitesi açısından kullanıcı konforunu sağlayan, bu konforun sürekliliğini mümkün kılan ve çevresel değişkenlere tepki verebilen dinamik bir sistem bütünüdür (Straube ve Burnett, 2005; Halawa ve diğerleri, 2018).



Şekil 2.1. İç koşullar, iklim koşulları ve bina kabuğu arasındaki ilişki (Url-1)

Tarih boyunca, yapı kabuğunun işlevi teknolojinin ve malzeme biliminin gelişmesiyle değişmiştir ve değişen kullanıcı taleplerine cevap vermek için uyumlanmıştır (Capeluto ve Ochoa, 2016). Özellikle 1970'lerdeki petrol krizinden itibaren ortaya çıkan enerji bilinci ve iklim odaklı tasarım anlayışı, bina kabuğunun yerel iklimle ilişkilendirilmesini gündeme getirmiş ve dinamik ara yüz olarak tanımını güçlendirmiştir. Bu bağlamda, yapı kabuğu, sabit (topografya, yönlenme gibi) ve değişken (sıcaklık, ışık, rüzgâr gibi) çevresel etkenlere yanıt verebilen bir sistem olarak ele alınmalıdır (Şekil 2.1). Yapı kabuğunu oluşturan opak yapı elemanları ve şeffaf yapı elemanlarının uygun seçilmesi ve düzenlenmesi sistemin etkin çalışması için önemli unsurlardır.

Pencere, ışıklıklar gibi şeffaf yapı kabuğu bileşenleri hem doğal ışık sağlama hem de görsel bağlantı kurma işlevleriyle öne çıkmaktadır. Bununla birlikte, güneş ışıınımını kontrol etme, aşırı ısı kazançlarını sınırlama ve enerji kullanımını optimize etme gibi teknik hedefler de taşımaktadır. Ancak bu hedefler, kullanıcı konforu, görsel algı ve enerji verimliliği açısından kimi zaman birbirine zıt talepler doğurabilmektedir. Bu nedenle şeffaf elemanların

tasarımında yerel iklim koşulları, coğrafi konum, yönelme, mekân kullanımı ve gün içi kullanım süresi dikkate alınması gereken bağlamsal faktörlerdir (Nasrollahi, 2009; Harvey, 2012). Şeffaf yüzey oranı, yapı yüzeyindeki açıklıkların toplam yüzeye oranını ifade eden pencere-duvar oranı ile temsil edilmektedir. Literatürde, kullanıcıların görsel konfor ve çevreyle etkileşim ihtiyaçlarını karşılayabilmek adına bu oranın alt sınırı %20 olarak önerilmektedir (Balaras, 1996). Pencere duvar oranı arttıkça ısı kayıpları ve parlama kontrolü açısından tasarım riskleri oluşturabilmektedir. Cam türünün seçimi de önemli bir parametredir; ısı geçirgenliği (U-değeri), güneş ısı kazanç katsayısı (SHGC) ve görünür ışık geçirgenliği (Tvis) gibi optik ve termal nitelikler göz önüne alınarak tasarıma entegre edilmelidir (Karlsson ve Roos, 2001; Nilsson ve Roos, 2009). Pencere çerçevelerinin malzeme seçimi (PVC, alüminyum, ahşap gibi) ve kesit kalınlığı, yalnızca ısı köprülerinin önlenmesi açısından değil, aynı zamanda ses yalıtımı ve estetik bütünlük açısından da önem taşımaktadır. Açılabilir pencere sistemleri, yalnızca havalandırma kapasitesi sağlamaz; aynı zamanda doğal havalandırma stratejilerinin bir parçası olarak iç mekân hava kalitesi ve kullanıcı sağlığı üzerinde de doğrudan etkilidir (Kontoleon ve Bikas, 2002; Su ve Zhang, 2010).

Duvar, döşeme, çatı gibi opak yapı kabuğu bileşenleri mimaride yalnızca taşıyıcı ya da sınır elemanları olarak değil, aynı zamanda enerji yönetimi açısından stratejik bileşenler olarak değerlendirilmelidir. Bu bileşenlerin fiziksel, termal ve optik özellikleri; yapının ısı kayıplarını azaltmada, iç mekân sıcaklık salınımlarını dengelemede ve dış çevresel etkileri filtrelemede kritik rol oynar. Opak yüzeylerin güneş ışıınımı emilim katsayısı, yüzey rengi, dokusal özellikleri gibi nitelikler yüzey sıcaklıklarını doğrudan etkiler ve pasif ısı kazancı stratejileriyle uyumlu şekilde düzenlenmelidir (Synnefa ve diğerleri, 2007; Berdahl ve diğerleri, 2008). Ayrıca, yapı elemanının kesit özellikleri (katman sayısı, malzeme türü ve ısı iletim katsayısı) ısı yalıtımı ve ısı kütle kapasitesi açısından dikkatle analiz edilmelidir (Gregory ve diğerleri, 2008; Al-Homoud, 2005). Yüksek ısı kütleye sahip malzemeler, gün içindeki sıcaklık dalgalanmalarını yavaşlatarak, enerji tüketimini ve mekanik sistemlere bağımlılığı azaltabilir (Zhou ve diğerleri, 2008). Kapı ve pencere açıklıkları, yapı kabuğunun toplam termal geçirgenliğini belirlemede önemli parametrelerdir. Bunun yanında, opak bileşenlerin toplam ağırlığı ve sertlik katsayısı gibi yapısal faktörler, sadece yapının strüktürel bütünlüğünü değil, aynı zamanda enerji performansı ile yapının dış etkilere karşı direncini de etkiler. Bu nedenle opak bileşenlerin tüm özellikleri, termal, akustik ve ışık kontrolü açısından entegre edilerek ele alınmalı ve bağlamsal bir tasarım çerçevesiyle

optimize edilmelidir (Farhanieh ve Sattar, 2006; Sanea ve Zedan, 2011; Bojic ve diğerleri, 2002).

Yapı kabuğu, tarihsel süreçte teknolojik ve malzeme bilimindeki gelişmelerle şekillenmiş, enerji verimliliği ve kullanıcı konforu odaklı dinamik bir sistem haline gelmiştir. Yapı kabuğunun enerji dengesi açısından incelenmesi bağlamında, opak ve şeffaf bileşenlerin termal, optik ve yapısal özelliklerinin optimize edilmesi, pasif tasarım stratejileriyle enerji tüketimini minimize etmede kritik rol oynamaktadır. Özellikle pencere-duvar oranı, cam türü seçimi ve opak yüzeylerin ısı kütlesi kapasitesi gibi parametreler, yerel iklim koşullarıyla uyumlu bir enerji yönetimi için belirleyici olmuştur. Diğer yandan, yapı kabuğunun sistem ve malzeme bağlamında gelişimi perspektifinden bakıldığında, 1970'lerden bu yana artan sürdürülebilirlik kaygıları, malzeme çeşitliliğini, akıllı sistemleri mimariye kazandırmıştır. Bu evrim, yapı kabuğunu statik bir koruyucu olmaktan çıkarıp, çevresel etkenlere cevap verebilen ve enerji üreten aktif bir ara yüze dönüştürmüştür.

Sonuç olarak, yapı kabuğunun performansı, enerji dengesi ile malzeme ve sistemlerdeki yeniliklerin kesişiminde şekillenmektedir. Bu iki bağlam bir arada düşünüldüğünde, çağdaş yapı tasarımında kabuk sistemlerinin performans temelli, bağlamsal ve bütüncül bir yaklaşımla ele alınması hem kullanıcı konforunun sağlanması hem de sürdürülebilirlik hedeflerine katkı sunulması açısından önemli görülmektedir.

## **2.1. Yapı Kabuğunun Enerji Dengesi Açısından İncelenmesi**

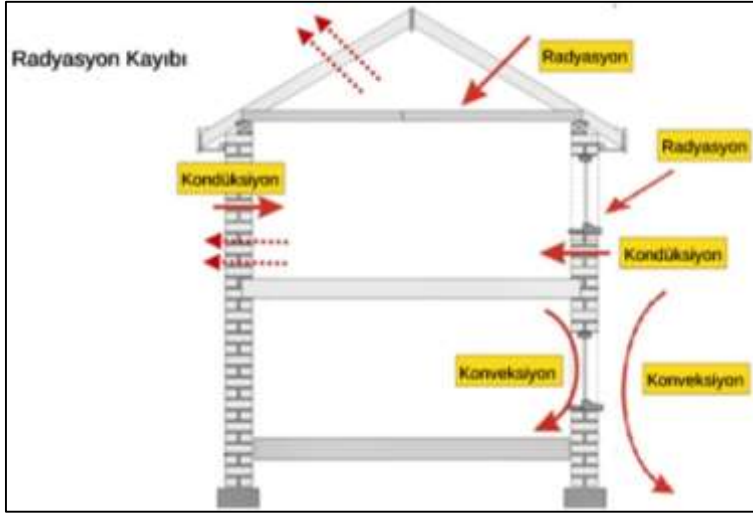
Yapı kabuğu, bir binanın iç mekânında konforlu iklim koşullarının sağlanmasında merkezi rol oynayan, dış ortamla iç ortam arasında gerçekleşen tüm enerji alışverişinin düzenleyici sınırır. Isıtma ve soğutma sistemlerinin temel hedefi, kullanıcıların termal konforunu sağlamak ve sürdürülebilir enerji yönetimini mümkün kılmaktır (Kreider ve diğerleri, 2009).

ASHRAE Standardı 55 (1992) göre termal konfor, “termal ortamdan duyulan memnuniyeti ifade eden öznel değerlendirme gerektiren zihin durumudur” olarak tanımlanmaktadır. Diğer bir deyişle, termal konfor çoğunlukla vücut ısısı, nem ve fizyolojik mekanizmalarla ilgilidir. Andargie ve diğerlerinin (2019) yaptığı çalışmada, termal konforu değerlendirmek için çoğu tek faktörlü çalışma, anketler, görüşmeler ve günlükler gibi öznel veri toplama yöntemlerinin yanı sıra yerinde izleme gibi nesnel yaklaşımları da kullanmaktadır.

ASHRAE Standardı 55, binalarda uygun termal koşulları belirlemek için kullanılabilir. Ancak, parametre değerleri farklı iklim bölgelerindeki insanlar için değişkenlik gösterebilir. Tahmini ortalama oy (PMV), Kansas State Üniversitesi ve Danimarka Teknik Üniversitesi'nden Povl Ole Fanger tarafından, insanın termal konfor hissine ampirik olarak uyan bir ölçü olarak geliştirilmiştir (ASHRAE 55, 1992). Termal konforda yaygın olarak kullanılan iki model, Fanger'ın PMV ve tahmini memnuniyetsizlik yüzdesi (PPD) olarak bilinir. Bunlar, termal konfor indeksi olarak kabul edilir ve belirli bir termal ortamda memnuniyet kriterlerini göstermek ve konfor seviyelerini ölçmek için hesaplanır. Fanger, PMV'yi “gerçek aktivite seviyesinde cilt sıcaklığı ve ter üretimi için konfor değerlerinde tutulan bir insan için iç ısı üretimi ile gerçek ortama ısı kaybı arasındaki fark” olarak tanımlamıştır (ASHRAE 55, 1992)

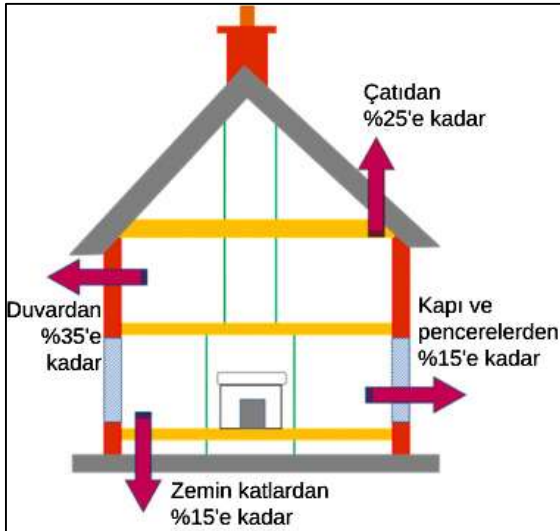
Termal konfor ile ilgili tanımlamalar, yalnızca fiziksel sıcaklıkla sınırlı olmadığı kullanıcının aktivite düzeyi, giyimi, metabolizması gibi fizyolojik faktörlerin yanı sıra günün saati, mevsimsel değişkenlik ve hatta kültürel alışkanlıklar da (Ioannou ve Itard, 2015) iç mekân iklimine yönelik beklentileri şekillendirdiğini göstermektedir.

Bir binanın enerji dengesi, iç ve dış kaynaklı birçok faktörün etkileşimiyle oluşur. İçsel ısı üretimi (kullanıcılar ve ekipmanlar), dış ortam ile yapı kabuğu arasında konveksiyon, kondüksiyon ve radyasyon aracılığı ile gerçekleşen ısı transferi (Şekil 2.2) bu dengenin ana bileşenleridir. Konveksiyon, ısı enerjisinin, sıvı veya gaz gibi akışkan ortamların hareketiyle bir noktadan diğerine taşınmasıdır. Yapı ortamında hava en yaygın taşıyıcı akışkandır. Hava ısınınca genişlemekte ve hafiflemekte, bunun sonucu olarak da yukarı doğru hareket etmektedir. Kondüksiyon, durağan bir sistemin iki noktası arasında, doğrudan temas yoluyla ve sıcaklık farkına bağlı olarak gerçekleşen ısı geçişidir. Yapı kabuğu bileşenlerinde kullanılan malzemelerin fiziksel özellikleri bu transfer türünde etkilidir. Örneğin; ahşap, plastik gibi malzemeler yalıtkan özellik gösterirken metaller iletken özelliktedir. Radyasyon, elektromanyetik dalgalar aracılığıyla, aradaki ortamın sıcaklığına bağlı olmaksızın gerçekleşen ısı aktarımıdır. Radyasyon yoluyla saydam/yarı saydam nesneler tarafından iletilen ısı opak nesne ile karşılaştığında emilir ve kondüksiyon ile iletilir. Radyasyon yoluyla iletilen ısı yansıtıcı yüzeyli bir nesne ile karşılaşırsa büyük bir kısmı yansıtılır ve geri kalanı malzeme tarafından emilir. Yapı kabuğunda radyasyon yoluyla ısı kayıp ve kazançlar cam, saydam yalıtım malzemeleri gibi yüzeylerden gerçekleşmektedir (Watson, Crosbie, Hancock Callender, 1999; Koman, 2015)



Şekil 2.2. Binalarda ısı transferinin ana mekanizmaları (Yamoul, Dlimi, El Harrouni, ve Chakir, 2023)

Bir yapının enerji dengesi, yapı kabuğunun farklı bileşenlerinden geçen ısı akışlarının dengelenmesiyle sağlanır. Yapı kabuğunun ısıyı ne ölçüde ilettiği veya kaybettiği, enerji tüketimi üzerinde doğrudan belirleyici bir etkidir. Şekil 2.3'te gösterildiği üzere, tipik bir konut binasında toplam ısı kayıpları, yapı kabuğunun farklı bileşenleri üzerinden değişen oranlarda gerçekleşmektedir.



Şekil 2.3. Yapı kabuğu bileşenlerinden ısı kayıp oranları (Hailu, 2021)

Bu bağlamda, duvarlar ısı kaybının en büyük payını oluşturmakta olup, yapı kabuğunda gerçekleşen toplam ısı kayıplarının yaklaşık %35'ini oluşturmaktadır. Bu durum, yapı kabuğunun en geniş yüzey alanına sahip duvarlarda katman birleşimin, duvar – döşeme

birleşimin yanlış uygulama ve detaylandırma nedeniyle ısı köprülerinin oluşması, bölge iklim koşullarına uygun yalıtım kalınlığının yapılmaması nedeniyle ısı transferinin artması gibi yapı fiziki sorunlarının oluşması ciddi enerji kayıplarına neden olabilmektedir. Çatı ısı kaybının %25'ini oluşturmaktadır. Yalıtımın doğru kalınlık ve uygulama ile yapılmaması ısı transferi etkisini arttırarak çatılardaki ısı kayıplarının daha da artmasına neden olmaktadır

Zemin kat döşemesinde gerçekleşen ısı kaybının yaklaşık %15 olduğu Şekil 2.3'te görülmektedir. Bu durum, özellikle zemin ile temas eden döşemelerin yalıtılmadığı durumda yapı kabuğundan kaynaklanan ısı kaybında artmasında kritik etki göstermektedir. Aynı oranda, pencere ve kapı açıklıkları gibi şeffaf ve yarı şeffaf elemanlar da toplam ısı kayıplarının %15'ini oluşturmaktadır. Bu açıklıklar, konvektif ve radyatif yollarla enerji akışına izin verdiği gibi, hava sızıntılarıyla da sistemin verimliliğini düşürebilir. Bu veriler, yapı kabuğunun enerji performansı açısından optimize edilmesinin önemini açıkça ortaya koymaktadır.

Yapı kabuğunun enerji dengesine katkısı, büyük ölçüde onun değişen çevresel koşullara uyum sağlama kapasitesine bağlıdır. Enerji verimliliği yüksek yapılar, bu bağlamda iki stratejik yaklaşımı bir arada kullanılmaktadır: adaptif bileşenler ve ısıl enerji depolama kapasitesine sahip kütsel bileşenler (Addington ve Schodek, 2012; Parameshwaran ve diğerleri, 2012). Değişken elemanlar arasında açılıp kapanabilen menfezler, ısı kazancını sınırlayan panjurlar ve ısıma kontrolü sağlayan perdeler yer almaktadır. Isıyı absorbe edip zamanla serbest bırakabilen yüksek ısıl kütsel malzemeler mekândaki günlük sıcaklık dalgalanmalarını dengelemeye olanak tanımaktadır.

Bu iki strateji, özellikle ılıman ve karasal iklimlerde oldukça etkilidir. Örneğin yaz mevsiminde gece boyunca alınan serin havayla ısıl kütsel soğutulabilirken, gündüz vakti perdeler veya gölgeleme elemanlarıyla güneş kazançları sınırlandırılabilir.

İç yükler dışındaki tüm ısı alışverişleri yapı kabuğuyla doğrudan ilişkilidir. Eğer yapı kabuğu gerekli performansı sağlayamazsa, mekanik sistemleri kullanarak iç ortam konforunun sağlamak durumunda kalmaktadır. Bu durum, binanın enerji tüketimini arttırmaktadır. Dolayısıyla, yapı kabuğunun tasarımı, sadece pasif bir çevresel sınır oluşturmakla kalmayıp, enerji sistemlerinin büyüklüğünü ve işleyişini belirleyen aktif bir kontrol düzeneği olarak ele alınmalıdır. Kabuğun performansını arttırmaya yönelik yapılacak her müdahale, binanın

genel tasarımına ve enerji teknolojilerine yönelik stratejik kararları da doğrudan şekillendirmektedir.

## 2.2. Yapı Kabuğunun Geliştirilmesi: Sistem ve Malzeme

Yapı kabuğu, tarihsel süreçte barınma ihtiyacının en temel unsurlarından biri olarak gelişim göstermiştir. İlk yapı kabukları, insanı dış ortamdan koruyan doğal mağaralarla başlamış, sonrasında iklim ve coğrafi koşullara uygun olarak kerpiç, taş, ahşap gibi yerel malzemelerle oluşturulan barınaklara dönüşmüştür (Straube, 2006). Ağır ve taşıyıcı duvar sistemleri başlangıçta hem mekân sınırlandırma hem de strüktürel yük taşıma görevlerini üstlenmiştir. Bu nedenle, yapı kabukları genellikle masif ve opak nitelikte tasarlanmıştır.

19. yüzyılda demir ve çelik çerçeve sistemlerinin inşaat sektörüne girişiyle birlikte, yapı kabuğu artık strüktürel yükleri taşımak zorunda kalmamış ve böylece hafifletilerek şeffaflaştırılması mümkün hale gelmiştir (Sto Corp., 2022). Bu gelişme, cam yüzeylerin daha büyük açıklıklarla cephede yer almasını sağlarken, iç mekânlara doğal ışık girişini artırmıştır. Ancak bu şeffaflık, ısı kayıplarının artmasına bağlı olarak artan enerji tüketimi sorunlarını da beraberinde getirmiştir (Url-8).

Harish ve diğerlerinin (2016) çalışmasında, uygun yapı kabuğu tasarımının uygulanmasıyla toplam enerji tüketiminde %20-50 arasında bir azalma sağlanabileceği sonucuna ulaşılmıştır. Uygun yapı kabuğu tasarımı; yapı kabuğunda hava boşluğunun kullanımı (Zhang ve diğerleri, 2016), trombe duvar sistemleri gibi uygulamalar (Hu ve diğerleri, 2017), faz değiştiren malzemeleri (FDM) (Akeiber ve diğerleri, 2016), saydam yalıtım malzemeleri (Świrski-Perkowska ve diğerleri, 2020) gibi yenilikçi malzemeler ile pasif yapı kabuğu sistemleri; Fotovoltaik (PV) modüllerin (Lai ve Hokoi, 2015), termoelektrik modüllerin (Luo ve diğerleri, 2018) entegre kullanıldığı aktif yapı kabuğu sistemlerinin yapının tipi, kullanım amacı, uygulanacağı bölge özellikleri gibi parametreleri dikkate alan kapsamlı bir karar sürecidir.

Aktif sistemler, enerji talebinin önemli bir kısmını önlemek veya karşılamak için yenilenebilir enerjiyi kullanmak üzere tasarlanmıştır. Bu sistemler ya enerji üretmektedir ya da ısıtma ve soğutma sağlamak için yenilenebilir enerjiyi kullanmak üzere bazı mekanik cihazlarla birlikte çalışmaktadır (Luo ve diğerleri, 2019).

Pasif sistemler, bina yapısı ile çevre arasındaki doğrudan etkileşimle karakterize edilmektedir. Bu sistemlerde, güç üretilmemektedir ve çalışmak için herhangi bir mekanik cihaz veya önemli miktarda mekanik enerjiye ihtiyaç duyulmamaktadır. Pasif sistemler, enerji üretimi, pasif soğutma, pasif ısıtma, ısı depolama, ısı geri kazanımı veya çeşitli dış ve iç ısı kazanımlarının önlenmesi gibi stratejileri bir araya getirmektedir. Pasif sistemlerde güneş enerjisi kullanımı ve ısı enerjisinin depolanması öne çıkan stratejilerdendir getirmektedir (Wachenfeldt ve diğerleri, 2003; Sadineni ve diğerleri, 2011). Günümüz de bu stratejilere katkı sunacak yenilikçi malzemelerin üretilmesi ve geliştirilmesi ile yapı kabuğunun pasif tasarım teknikleri ile performansının arttırılmasına katkı sunmaktadır.

Yapı kabuğunun sistem ve malzeme düzeyinde geliştirilmesi, sadece enerji etkinliği ve sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşmayı değil, aynı zamanda mimari ifade çeşitliliğini ve işlevsel esnekliği artırmayı da mümkün kılmaktadır. Özellikle son yıllarda teknoloji alanındaki ilerlemeler, yapı kabuğunu oluşturan katmanların farklı işlevsel gereksinimlere göre ayrılarak ısı yalıtımı, su geçirimsizlik, ses kontrolü ve mekanik dayanım gibi belirli görevleri üstlenen özel malzemelerle donatılmasını ve bu katmanların birbirleriyle entegre edilmesini teşvik ederek, kabuğun performansını ve karmaşıklığını arttırmıştır. Bu gelişmeler, yapı elemanını oluşturan katmanlı yapının her düzeyinde yenilikçi kombinasyonların doğmasına neden olmuştur. Nitekim farklı malzemelerin birleştirilmesiyle ortaya çıkan malzeme konfigürasyonları, yapı kabuğunun farklı katmanlarının ayrıntılı karakterizasyonunu gerekli kılmaktadır (Anon, 2020). Bu bağlamda, ileri malzeme teknolojilerinin bina kabuğuna entegrasyonu, yalnızca performansı optimize etmekle kalmayıp aynı zamanda çevresel uyum, dayanıklılık ve estetik bütünlük açısından da yeni olanaklar sunmaktadır. Havacılık, otomotiv ve biyomedikal gibi yüksek teknoloji sektörlerinden inşaat alanına aktarılan malzeme inovasyonları, yapı kabuğunun “adaptif” ve “yüksek performanslı” bir bileşene dönüşmesini sağlamaktadır. Bu dönüşüm, yapıların sadece barınma işlevini değil, çevreyle sürekli etkileşim hâlinde olan birer enerji yönetim sistemi olarak konumlanmalarını da beraberinde getirmektedir.

### 2.3. Yenilikçi Malzemeler

Teknolojik gelişmeler, hızlı nüfus artışı ve kentleşme, artan konfor talepleri enerji tüketimi artışını hızlandırmaktadır. Sınırlı öz kaynakların artan bu enerji tüketimine hammadde sağlayacak sürekliliğinin olmaması, yenilenebilir enerji kaynaklarının önemini

artırmaktadır. Türkiye’de toplam enerji tüketim payının neredeyse yarısını binalar oluşturmaktadır. Binalarda toplam ısı kaybının %35’inin duvarlardan kaynaklı olması nedeniyle duvarların performansının iyileştirilmesine yönelik gelişmeler enerji tüketiminin azaltılması ve iç mekân konforunun sağlanmasında etkili olmaktadır. Ayrıca bu alandaki gelişmeler enerjinin korunumu sağlamakta olup fosil kaynaklı yakıt tüketimini ve çevreye verilen emisyonları azaltmaktadır.

Günümüzde, binaların enerji etkinliğine fayda sağlamak amacıyla yapı kabuğunda kullanılan malzemelerin yalıtım, enerji depolama gibi özelliklerinin geliştirilmesi ve performansının artırılması üzerine çalışmalar devam etmektedir. Çalışmalar sonucunda geliştirilen yenilikçi malzemeler; yalıtım değeri yüksek, güneşten maksimum oranda ısı kazancı sağlayan ve yüksek ısı depolayan özellikleri ile dış uyaranlara cevap veren yenilikçi özelliklere sahiptir.

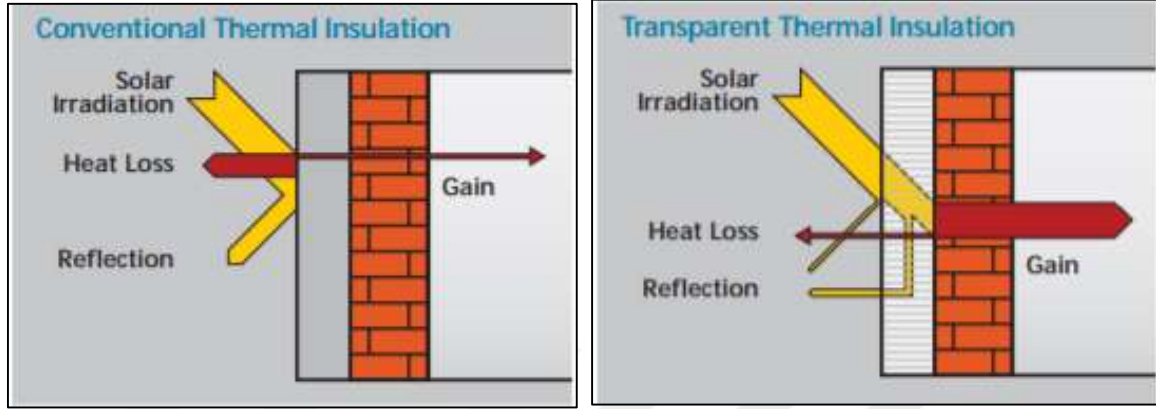
Güneşten ısı kazancı sağlamak ve yüksek yalıtım sağlayarak ısı kayıplarını önlemek amacıyla geliştirilen “Saydam Yalıtım Malzemeleri” ile enerji verimliliğinin artırılması ve bina içindeki ısıtma-soğutma yükünün azaltılması amacıyla termal enerji depolama yöntemlerinden biri olan “Faz Değiştiren Malzemeler” enerji etkin bina tasarımlarında gittikçe önem kazanmaktadır.

### **2.3.1. Saydam yalıtım malzemesi**

Güneş ışınımı yapı kabuğunu iki yönde etkilemektedir. Saydam yüzeylerden iç ortama giren kısa dalga boylu güneş ışınımı, yapı içindeki yüzeyler tarafından yutularak uzun dalga boylu ısı ışıma dönüşür. Yapı kabuğunun opak yüzeylerine gelen güneş ışınımının bir bölümü yansıtılır, geriye kalan ise yutulur. Masif kütlede depolanan enerji, iletim, taşınım ve ışıma yoluyla iç ortama aktarılır (Zürcher, 1998).

Masif kütle olarak tasarlanan duvar kuruluşunun ısı kapasitesi, duvar malzemesinin özgül ısı ve kütlesi dolayısıyla yoğunluğu ve toplam hacmi ile ilgilidir. Isı depolama işlevini yerine getirecek elemanın etkinliği, enerjinin yutulma hızı ve bu enerjinin iç ortama iletilme hızı ile ilişkilidir. Isı depolama özelliği yüksek olan malzemeler yüzeylerine gelen enerjinin büyük bölümünü yutarlar. Dış yüzeyin güneş ışınımını yutma oranı arttıkça sistemin ısı kazancı da artar (Duffie ve Beckman, 1991). Bu bağlamda enerji korunumlu yapı kabuğu

kuruluşlarında uygulanan "saydam yalıtım" malzemeleri fiziksel özelliklerine bağlı olarak yapı kabuğunda ısı kayıplarının azaltılmasına, ayrıca güneş ışınlarının duvar malzemesine iletilmesi ile duvarın ısıl kütle olarak çalışmasına yardımcı olmaktadır (Şekil 2.4).



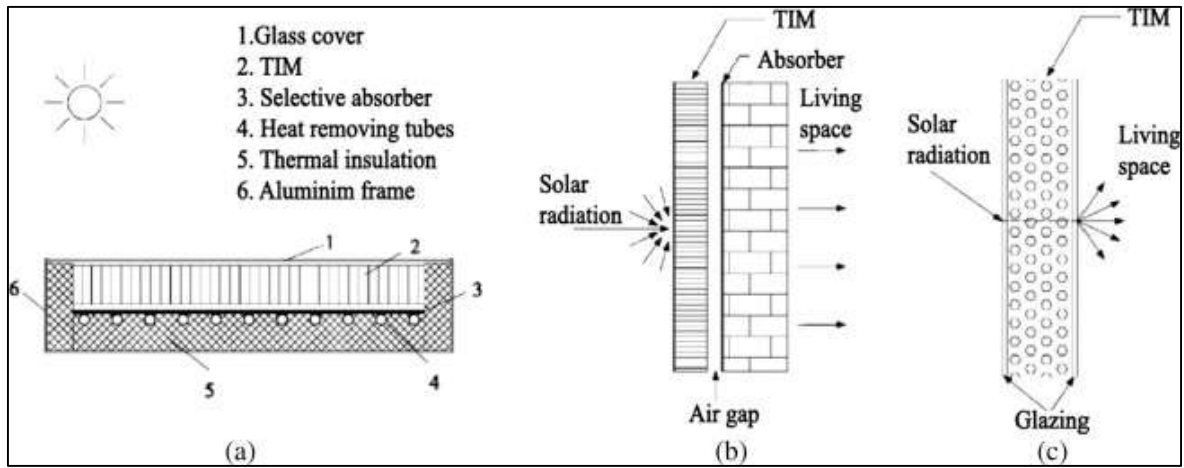
Şekil 2.4. Şeffaf yalıtım malzemesi çalışma prensibi (Url-11)

Saydam yalıtım malzemeleri, güneş enerjisinin yapıya kontrollü bir biçimde alınmasını sağlarken, ısı kayıplarını sınırlandırarak yüksek düzeyde enerji verimliliği sunmaktadır. Ragonasi (1993), saydam yapı bileşenlerinin performansını değerlendirirken, özellikle güneş ışınımı geçirgenlik katsayısı ve toplam ısı geçirgenlik katsayısı gibi optik ve termal parametrelerin belirleyici rol oynadığını ifade etmektedir. Paneri (2019) saydam yalıtım malzemesini ısı kayıplarını en aza indirerek güneş ısısı enerjisini yakalayabilen ve verimli bir şekilde koruyabilen gelişmiş bir malzeme olarak tanımlamaktadır. Saydam yalıtım malzemelerinin iki temel özelliği vardır (Url-11);

1. Isı korunumunda etkili olması (toplam ısı geçirme katsayısının ( $U$ )) olabildiğince düşük olması)
2. Güneş enerjisi geçirgenliğinde etkili olması (enerji geçirgenlik değerinin ( $g$ )) olabildiğince yüksek olması)

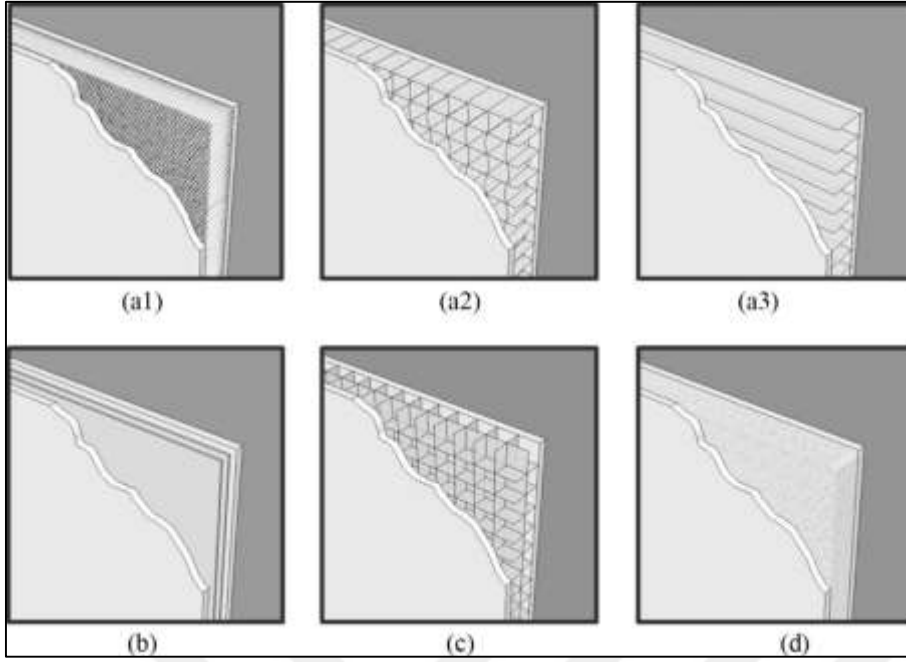
Binalarda SYM'i uygulamanın üç ana yolu vardır: ilk ve muhtemelen ilk uygulama yöntemi, düz plakalı güneş kolektörünün ön cam kapağının altında SYM kullanılmasıdır. Çoğunlukla güneş duvarı olarak adlandırılan ikinci bir uygulama yöntemi, termal kütle özelliğindeki duvar veya çatı kabuk elemanının önünde SYM kullanılmasıdır. Termal kütle önüne SYM uygulamasının en önemli avantajı yalıtım özelliğinin yanı sıra malzemenin yapısına bağlı olarak güneş ışınlarının duvar yüzeyine iletilmesidir. SYM kullanılması ile oluşabilecek ısı

kayıpları güneş enerjisi geçirgenliği sayesinde elde ettiği ısı kazançları ile telafi edilebilmektedir. Bu sayede duvar yüzeyinde yutulan güneş ışınları duvar bünyesinde ısı enerjisine dönüşerek iç mekâna aktarılmaktadır. Elde edilen ısı kazançları binaların pasif yöntemle iklimlendirilmesine katkı sunarak bina enerji performansının arttırmaktadır. Bu, saydam yalıtımın temel prensibidir ve bu özelliği ile geleneksel yalıtım malzemelerinden ayrılmaktadır. Üçüncü uygulama yöntemi, bir pencere sisteminin veya camlı cephenin hava boşluğunda SYM kullanılmasıdır. Bu uygulamaların konfigürasyonları Şekil 2.5'te sunulmuştur.



Şekil 2.5. Binalarda SYM konfigürasyonları: (a) düz plaka güneş kollektörlerinde, (b) güneş duvarlarında ve (c) pencere sistemlerinde veya camlı cephelerde (Sun ve diğerleri, 2018)

SYM uygulamalarında, malzemeye yüzey oluşturmak ve fiziksel koşullardan korumak bunu sağlarken güneş ışığını yakalaması ve arkasındaki bileşene iletmesini sağlayacak en az bir adet saydam panel (örneğin cam panel) ile monte edilmektedir ve genellikle çift camlı ünitelerde camlar arasındaki hava boşluğunu dolduracak şekilde konumlandırılmaktadır (Wong ve diğerleri, 2007). SYM'ler, katmanının yapısal biçimine ve cam yüzeyi ile olan ilişkisine göre dört ana kategori altında sınıflandırılmaktadır (Dowson, 2012; Kaushika ve Sumathy, 2003; Wittwer ve Platzer, 2000; Wong ve diğerleri., 2007; Goetzberger, 1991; Platzer, 1990). Bu kategoriler; Cam yüzeyine dik yapı, Cam yüzeyine paralel yapı, Karışık yapı ve Homojen yapı olarak sınıflandırılmaktadır. Cam yüzeyine dik konumlanan yapılarda; kapiler yapı, petek yapı ve paralel kanat dizilimi olmak üzere üç temel tür tanımlanmaktadır (Wong ve diğerleri, 2007).



Şekil 2.6. SYM tiplerinin şematik diyagramları: (a) cam-dikey yapı: (a1) kılcal yapı, (a2) bal peteği yapısı, (a3) paralel çıta dizisi yapısı; (b) cam-paralel yapı; (c) karışık yapı ve (d) homojen yapı (Sun ve diğerleri, 2018).

Cam yüzeyine dik yerleşimli SYM'ler (Şekil 2.6, a1-3), hava boşluğunu cam yüzeylerine dik doğrultuda sıralanan küçük hücelere bölmektedir. Bu hücre duvarları, serbest konveksiyonun başlamasına karşı viskoz direnç oluşturarak ısı taşınımını sınırlamaktadır ve çift cam ünitelerinde bir cam yüzeyinden diğerine gerçekleşen termal ısımanın geçişini engellemektedir. Her iki etki birlikte, cam sisteminin ısıl direncini arttırmaktır (Sun ve diğerleri, 2016).

Cam yüzeyine paralel yapılarda (Şekil 2.6, b)), cam ya da plastikten üretilmiş çoklu katmanlar, cam levhalara paralel biçimde yerleştirilir. Katman sayısının artırılması ısı kayıplarını azaltmakla birlikte, bu durum yansıtma ve soğurma artışı nedeniyle, gün ışığı ve güneş ışıını geçirgenliğini düşürür (Wong ve diğerleri, 2007).

Karışık yapıdaki SYM'ler (Şekil 2.6, c), dik ve paralel yapıların birleşiminden oluşur. Bu yapı, yalnızca dik ya da yalnızca paralel yapıların sağlayabileceğinden daha etkili bir konveksiyon engellemesi sunmaktadır ancak bu durumda gün ışığı ve güneş ışıını geçirgenliği azalmaktadır.

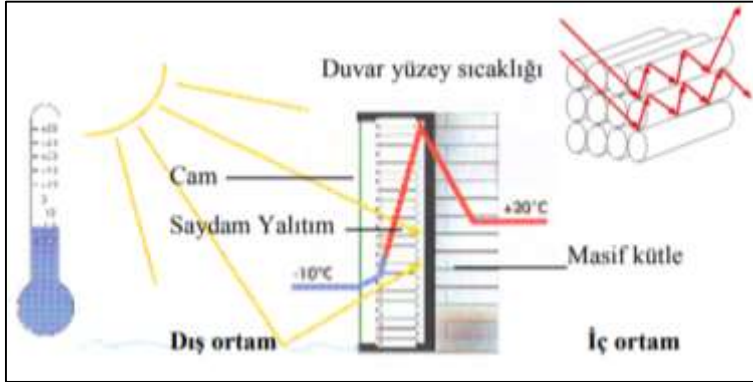
Homojen SYM yapıları (Şekil 2.6, d), özellikle son dönemde artan araştırmalarla dikkat çekmektedir. Silika aerogel esaslı SYM'ler, çift cam sistemlerindeki hava boşluğunu doldurabilecek saydamlıkta bir yapı sunmaktadır. Aerogellerin yüksek gözenekliliği, çok düşük ısı iletkenlik değerlerine ulaşmalarını sağlamaktadır (örneğin 0.005–0.02 W/m·K) (Berardi, 2015). Silika bazlı aerogeller monolitik silika aerogel (MSA) ve granül silika aerogel (GSA) olmak üzere iki türde üretilmektedir. MSA, belirli koşullarda görüş geçirgenliği sağlayacak kadar şeffaf olabilmektedir, ancak yüksek maliyeti ve mekanik kırılganlığı nedeniyle ticari uygulamalarda sınırlı kalmaktadır (Jensen, 2004). GSA ise, kütleli saçılma etkisi nedeniyle düşük güneş ışıınımı geçirgenliğine sahiptir ( $T_{vis} < 0,5$ ) ve daha çok ışııklık sistemlerinde, termal kütle önü uygulamalarda kullanılmaktadır (Gao ve diğerleri, 2014; Buratti ve Moretti, 2012).

Günümüzde hem akademik araştırmalarda hem de endüstriyel uygulamalarda en fazla ilgi gören saydam yalıtım malzemeleri; cam yüzeyine dik yapıdaki SYM'leri ve silika aerogel esaslı çözümlerdir.

#### Saydam yalıtım malzemesi birleşimli duvar

Saydam yalıtım malzemeleri (SYM), betonarme ya da kagir bir duvarın önüne yerleştirildiklerinde, güneş enerjisinin ısı kütle içerisine aktarılacak depolanmasına imkan tanırken, aynı zamanda duvarın dış yüzeyinden iç yüzeyine ısı kaybını da azaltmaktadır. Saydam yalıtım uygulanmış binaların dış duvarları güneş toplacı gibi çalışır. Dış hava sıcaklığının düşmesi ile ısı kütle olarak çalışan masif duvardan olan ısı kaybının arttığı bilinmektedir. Buna karşın geliştirilen saydam yalıtımlı duvarda malzemenin yalıtım özelliği nedeniyle ısı geçiş direnci artmakta ve ısı kaybı azalmaktadır. Yalıtım malzemesi içinden geçen kısa dalga boylu güneş ışıınımı, masif kütlede ısı enerjisi olarak depolanır. Masif kütlenin ön yüzeyinde bulunan saydam yalıtım, depolanan enerjinin dış ortama geçişinde ek bir direnç oluşturur. Saydam yalıtım kullanımı sonucunda hem güneş ışıınımı geçirgenliği hem de ısı yalıtım özelliği birlikte sağlanabilmektedir (Şekil 2.7). Bu tür duvar kuruluşlarında yaz döneminde ısı kütlenin aşırı ısınma sorununa neden olabilmektedir. Buna çözüm olarak Athienitis ve Ramadan (1999) çalışmalarında doğal havalandırma, güneş kırıcı elemanların kullanımını veya ısı kütlenin artırılmasını önermektedir. Bu çalışmayı destekleyici olarak; IEA Solar Heating and Cooling Programme Task 20 kapsamındaki raporlarda, Avrupa genelinde bina yenileme çalışmalarında yapılan güneş duvarları için

SYM uygulamaları için yaz aylarında aşırı ısınmaya karşı gölgeleme elemanlarının ve zorlanmış havalandırmanın sisteme entegre edilmesi tavsiye edildiği belirtilmektedir (IEA, 1997; Voss, 2000).



Şekil 2.7. Saydam yalıtımlı duvarın çalışma ilkesi (Url-10)

Bu sistemin ilk uygulamaları Kaushika ve diğerleri (1987) tarafından gerçekleştirilmiştir. Araştırmacılar, siyaha boyanmış bir absorban tabakanın ve beton plakaların üzerine yerleştirilmiş kare hücreli, hava dolu petek malzeme kullanılan bir çatı sistemini incelemiştir. Elde edilen sonuçlara göre, petek yapılar sayesinde çatının ısı toplama verimi artmış, gece saatlerinde ise ısı kaybı belirgin şekilde azalmıştır (Kaushika ve diğerleri, 1987). Aynı sistem, ABD'nin Boulder kenti iklim koşulları altında uygulandığında da test edilmiş ve 15 cm kalınlığında petek yapı kullanıldığında kış gününde 10 saati aşan pozitif güneş kazancı elde edilmiştir (Kaushika ve diğerleri, 1991).

Braun ve diğerleri (1992), saydam yalıtımlı masif duvarların güney cepheye uygulanmasını içeren pilot projeleri deneysel ve sayısal yöntemlerle değerlendirmiştir. Bu projelerde kullanılan SYM'ler, kapiler ve petek esaslı yapılara dayanmaktadır. Her bir metrekaare kolektör duvar için yaklaşık 200 kWh yıllık enerji tasarrufu potansiyeli ortaya konmuş, emici yüzey ile duvar içerisindeki noktalar arasındaki sıcaklık farkı ise 5°C'nin altında kalmıştır. Athienitis ve Ramadan (1999), güney cepheye yerleştirilmiş beton duvar üzerine uygulanan 48 mm kalınlığındaki kare hücreli plastik petek yapıyı; gölgeleme elemanı ve zorlanmış havalandırma ile simüle etmiştir. Modelde, dış ortam sıcaklığının -20°C olduğu, açık gökyüzüne sahip bir kış gününde binanın ısıtma ihtiyacının sıfırlandığı gözlemlenmiştir. Ayrıca, hava dolaşımının ısı transferini artırdığı ve iç ortam sıcaklığının kabul edilebilir seviyelerde tutulduğu belirtilmiştir.

Yeşildal (2002) çalışmasında; seçilen bina içerisindeki bir hacmin dış duvarına uyguladığı farklı kalınlıklarda SYM'nin ısı performansını sayısal olarak incelemiştir. Çalışmada, ısıtma ve soğutma dönemi için seçilen sırasıyla 21 Ocak ve 21 Temmuz tarihlerindeki ısı kazançları hesaplanmıştır. Sonuç olarak ısıtma döneminde yaklaşık %118 enerji tasarrufu sağlanmıştır.

Wallner ve diğerleri (2004), bina cephelerine kolay entegre edilebilen yeni nesil bir polimer film tabanlı SYM tasarlamıştır. Bu sistemin iyi yalıtılmış bir deneme evinin güney cephesine 30 m<sup>2</sup> uygulamasıyla %44 güneş enerjisi verimi, U-değeri 0.76 W/m<sup>2</sup>·K ve güneşli soğuk günlerde metrekare başına 50 W'a kadar ulaşan ısı akıları elde edilmiştir.

Göksal Özbalta ve diğerleri (2008) çalışmalarında; TSE 825'e göre farklı iklim bölgelerindeki dört il için, SYM entegreli duvar kuruluşlarının enerji kazançlarını hesaplamıştır. Sonuç olarak opak yalıtımın kullanıldığı duvar kuruluşlarına kıyasla SYM entegreli duvar kuruluşlarının ısı kaybının önemli derecede azalttığı tespit edilmiştir.

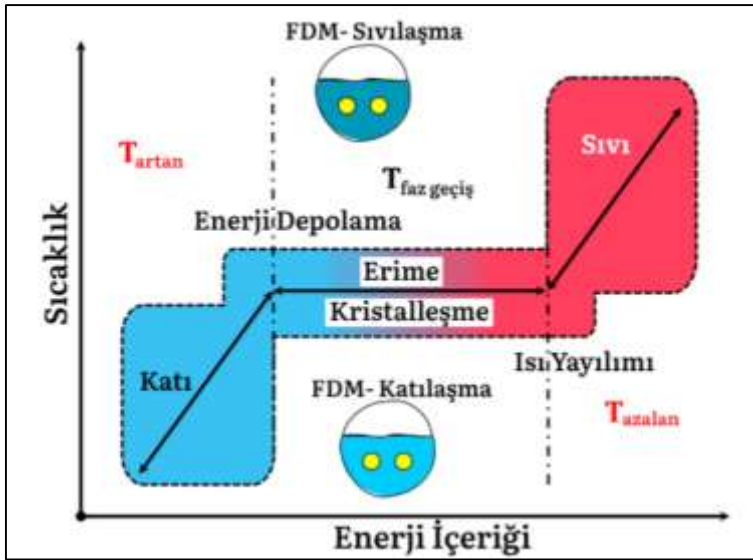
Saydam yalıtım malzemesinin duvar önüne uygulandığı çalışmalar incelendiğinde genelde ısıtma mevsiminde veya soğuk iklimli ve güneş ışıyım şiddeti yüksek bölgelerde ısıtma gereksinimini daha verimli şekilde karşıladığı görülmektedir. Duvar dış yüzey sıcaklığı günün önemli bir bölümünde iç yüzey sıcaklığından daha yüksektir. Masif kütlerde depolanan enerji iç mekâna belli bir faz farkı ve sönüm oranı ile aktarılmaktadır (Dilmaç ve diğerleri, 1994). Böylece duvar pasif yöntemle iç ortam sıcaklığının dalgalanmasını azaltarak bina enerji performansının iyileşmesine katkı sunmaktadır.

### 2.3.2. Faz değıştiren malzeme

Binaların termal konforunun en optimum düzeyde sağlanmasına yönelik talebin artması enerji tüketimindeki artışı da beraberinde getirmektedir. Enerji tüketimine yönelik yapılan projeksiyon çalışmaları, 2030 yılında, kurulu gücümüzün yaklaşık iki kat artacağını ön görmektedir. Enerji üretimi, genel olarak fosil yakıtlarla karşılanmaktadır ve fosil yakıtların yanması sonucu oluşan CO<sub>2</sub> küresel ısınmanın nedeni olarak gösterilmektedir. Günümüzde termal enerji depolama sistemleri, fosil yakıtlara olan bağımlılığı azaltması ve çevre dostu enerji kullanımına katkıda bulunması ile yenilenebilir enerji kaynakları kadar önemli hale gelmiştir.

Termal enerji depolama (TES), en önemli ileri enerji teknolojilerinden biri olarak kabul edilir ve son zamanlarda, özellikle binalarda ısıtmadan soğutmaya kadar termal uygulamalar için bu temel tekniğin kullanılması daha da önem kazanmıştır. Son yıllarda yapı sektörü için çeşitli ısı depolama çözümleri geliştirilmiştir. Faz değiştiren malzemelerin yapı bileşenlerine entegre olarak kullanılması bu çözümlerden biri olmuştur.

Faz değişim malzeme, moleküllerden oluşan bir maddedir. Malzemenin ana özelliği, ısı enerjisinin gizli bir biçimde depolamaktadır ve birim hacim başına geleneksel yapı malzemelerinden daha fazla ısı depolama kapasitesine sahiptir. Ortam sıcaklığı yükseldiğinde, malzemenin kimyasal bağları parçalanır ve böylece malzeme katıdan sıvıya faz değiştirir. Bu faz değişikliği endotermik bir süreçtir ve sonuç olarak ısıyı emer. Ortam sıcaklığı tekrar düştüğünde, FDM katı duruma geri döner ve emilen ısıyı ortama verir (Şekil 2.8). Bu döngü, iç sıcaklığı stabilize eder, en yüksek soğutma yüklerini keser ve bina zarfının yüzey sıcaklıklarını etkileyerek ısıtma yüklerini azaltır (Baetens ve diğerleri, 2010; Oliveira, 2012; Delgado ve diğerleri, 2018). Bu çalışma prensibine sahip FDM'in bina zarfına entegre ile, ısı depolamanın, ısıtma ve soğutma için pik gücünün azaltılması, pik ısıtma ve soğutma yüklerinin düşük tarife saatlerine kaydırılması, sıcaklık piklerinin çalışma saatlerine kaydırılması, iç ortamın iyileştirilmesi, pasif ısıtma ve soğutma yüklerinin verimli kullanılması sağlanmaktadır. (Pomianowsk ve diğerleri, 2013; Baetens ve diğerleri, 2010).



Şekil 2.8. Faz değiştiren malzemenin çalışma prensibi (Mohtasim ve Das, 2024)

FDM'ler iklim tiplerine göre farklı performans gösterirler. Malzemenin yüksek performans göstermesi için malzemenin özelliği, gizli ısı depolama kapasiteleri, ısı iletkenlikleri, birleştirme tekniği, termal enerji depolaması için gereken sıcaklık aralığı gibi seçim kriterleri uygulama öncesi değerlendirilmesi gereken önemli parametrelerdir (Kalbasi, 2022). Bu seçim kriterlerini faz değiştiren malzemenin özelliği doğrudan etkilemektedir.

Kimyasal bileşimlerine göre FDM'ler; organik, inorganik ve ötektik malzemeler olarak sınıflandırılmaktadır (Çizelge 2.1). Her kategorinin çok çeşitli faz geçiş sıcaklıklarına ve termo-fiziksel özelliklerine sahip FDM çeşitleri vardır.

Çizelge 2.1. Faz Değiştiren Malzemelerin Sınıflandırılması (Pasupaty ve diğerleri, 2008)

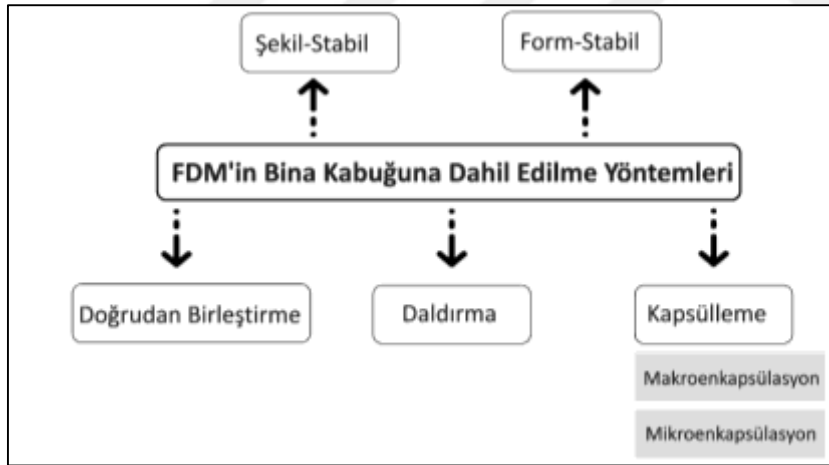
|                           |           |                     |
|---------------------------|-----------|---------------------|
| FAZ DEĞİŞTİREN<br>MALZEME | ORGANİK   | Parafin             |
|                           |           | Parafin olmayan     |
|                           | İNORGANİK | Metaller            |
|                           |           | Tuz Hidratlar       |
|                           | ÖTEKTİK   | Organik-Organik     |
|                           |           | Organik-İnorganik   |
|                           |           | İnorganik-İnorganik |

Çizelge 2.1'de görüldüğü gibi kimyasal özelliklerine göre farklılaşan birden fazla FDM türü mevcuttur. FDM'lerin ana sınıflandırması, inorganik FDM'ler ve organik FDM'ler arasındaki ayrımdır (Farid ve diğerleri, 2004; Mehling ve Cabeza, 2008; Sharma ve diğerleri, 2009). Teknik uygulamalar için yaygın olarak kullanılan faz değiştiren malzemeler; parafinler (organik), yağ asitleri (organik) ve tuz hidratlardır (inorganik). Bu amaç için çok sayıda ötektik FDM kombinasyonu da kullanılmaktadır. Bunlar, kristalleşme sırasında bileşen kristallerinin bir karışımını oluşturan her biri uyumlu bir şekilde eriyen ve katılan iki veya daha fazla FDM'nin bileşimleri ile oluşmaktadır. Genellikle, inorganik bileşikler organik bileşiklere göre neredeyse iki katı kadar daha fazla hacimsel gizli ısı depolama kapasitesine sahiptir (Kośny, 2015).

FDM'ler faz geçiş sıcaklığına göre sınıflandırması düşük ( $\leq 15$  °C), orta ( $15^{\circ}\text{C}$ - $30$  °C) ve yüksek sıcaklığa ( $\geq 30$  °C) uygunlukları dikkate alınarak yapılmaktadır. En yaygın düşük sıcaklık FDM türleri yağ asitleri ve parafinler gibi organik FDM'ler ve tuz hidratlar gibi bazı inorganik FDM'lerdir. Bunlar soğuk depolama uygulamaları, soğutmalı taşımacılık, veri merkezleri ve sunucu odaları gibi düşük sıcaklıkta bakım gerektiren alanlar için idealdir

(Eanest Jebasingh ve Valan Arasu, 2020). Ayrıca, orta çalışma termal koşulları için en yaygın FDM'lerden bazıları parafin, hidratlı tuzlar ve ötektik karışımlardır. Bu malzemeler duvarlarda, zeminlerde, tavanlarda ve insan konfor aralığına yakın sıcaklıklarda ısınının emilmesi ve salınması yoluyla termal konforu artıran HVAC uygulamalarında kullanılmaya uygundur (Da Cunha ve Eames, 2016). Benzer şekilde, en yaygın yüksek sıcaklık FDM'leri, genellikle güneş termal enerji depolama sistemleri, endüstriyel atık ısı geri kazanımı ve yüksek sıcaklık soğutma sistemleri gibi önemli ısı depolama ve yüksek sıcaklık yönetimi gerektiren uygulamalarda kullanılan belirli tuz hidratları ve metalikler gibi inorganik FDM'lerdir (Wang ve diğerleri, 2019).

Faz değiştiren malzemelerin yapı elemanına entegrasyonu için gerekli olan bir diğer seçim kriteri birleştirme yöntemidir. Faz değiştiren malzemeler hal değişim aşamasında sızıntıları önlemek için yapı elemanlarına ve bina zarfına çeşitli birleştirme yöntemleri uygulanarak dahil edilmektedir. Bu birleşim Şekil 2.9' da gösterildiği gibi çeşitli yöntemlerle gerçekleştirilebilir. Bu yöntemlerin her birinin farklı avantaj ve zorlukları vardır.



Şekil 2.9. FDM'lerin yapı elemanı ile birleşme yöntemleri

Doğrudan ekleme yönteminde, toz veya sıvı haldeki FDM, alçı harcı, çimento harcı ve beton karışımı gibi yapı malzemesine doğrudan eklenmektedir. Herhangi bir deneyim veya ekipman ihtiyacı gerektirmeyen kolay ve ekonomik bir yöntemdir ancak sızıntı ve inşaat malzemeleri ile uyumsuzluk en büyük dezavantajdır (Zhou ve diğerleri, 2012; Lu ve diğerleri, 2017). Sızıntı, yanıcı FDM'ler için yangın riskini artırırken yapı elemanının mekanik özelliklerini, dayanıklılığını ve mukavemetini zayıflatabilmektedir; hidrasyon sürecini etkileyebilmektedir (Lu ve diğerleri, 2017; Memon, 2014).

Daldırma yönteminde, gözenekli bir yapı malzemesi sıvı FDM içine daldırılır ve FDM'nin malzemenin gözenekli yapısının içine girerek doldurması sağlanır. Bu yöntem, özellikle alçıpan veya gözenekli beton, tuğla gibi malzemelerin gözeneklerinde kapiler yollarla depolanmaktadır. Bu yöntemde FDM katılaştıktan sonra kullanılmaktadır (Zhang, 2007). Basit bir yöntem olması, FDM'nin malzemenin gözeneklerine nüfuz etmesi ile ısı depolama kapasitesinin artması avantajlarıdır. Faz değişimi durumunda sızıntı yapması, yapı uyumsuzluğu ve betonarme elemanlar birleştirildiğinde korozyona sebebiyet vermesi dolayısıyla da malzemenin hizmet ömrünü olumsuz etkilemesi yöntemin dezavantajları olarak görülmektedir (Cellat ve diğerleri, 2017).

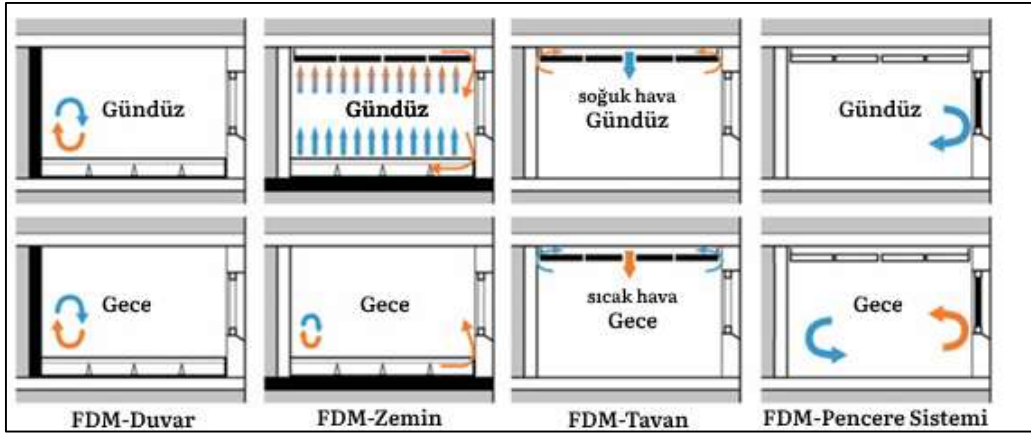
Enkapsülasyon, FDM'lerin yapı malzemesi üzerindeki olumsuz etkilerinden kaçınmak ve bina yapısıyla uyumluluğunu arttırmak için uygulanan bir yöntemdir. FDM'nin koruyucu bir kabukla kaplanması şeklinde uygulanır. Bu uygulama aynı zamanda faz değişimi sırasında FDM'nin hacimsel değişimini kontrol etmek ve malzemenin çevresel bozulmaya karşı korunmasında, yaşam döngüsü boyunca iyi termal iletkenlik ve mekanik mukavemet göstermesinde etkili olmaktadır (Singh Rathore ve diğerleri, 2020). Makrokapsülleme ve mikrokapsülleme olarak farklı ölçeklerde yapılmaktadır. Makrokapsülleme; duvar, zemin ve tavana entegre edilebilen daha büyük zarf veya kabuklar ile FDM'nin korumaya alınmasıdır (Wijesuriya ve Tabares-Velasco, 2021). Mikrokapsülleme, mikro boyutlu FDM'lerin mikroskobik polimer kabukların içine yerleştirilerek, sızıntı olmadan yapı malzemeleriyle karıştırılmasını sağlamaktadır.

Şekli-stabil yöntemi, sızma sorununu önleyen taşıyıcı matrisin FDM içermesidir. Termal iletkenliğin artması, özgül ısı değerinin yükselmesi ve faz geçiş döngülerinde şeklini koruması bu yöntemin avantajlarıdır. Üretim sürecinin karmaşıklığı bu yöntem için dezavantaj olarak görülmektedir (Cheng ve diğerleri, 2015; Frigione ve diğerleri, 2019).

Son olarak Form-stabil yöntemi, bir veya daha fazla FDM türünün maksimum miktarını koruyan ve erime sıcaklıklarında sızıntı göstermeyen kompozit malzemedir (Sharma ve diğerleri, 2009). Şekil stabil ve form stabil yöntemlerinin üretiminin karmaşık süreçlerle ve yüksek maliyetle yapılması dezavantaj olarak görülse de diğer birleştirme yöntemlerine göre en güvenilir olarak görülmektedir. Güvenirlik, faz değişim döngülerinde bozulma olmaması ve yüksek performans göstermesidir. Bunun yanında, yüksek mekanik mukavemet ve

kararlık göstermesi, farklı yapı elemanlarında çok yönlü bir şekilde uygulanabilmesi bu yöntemin avantajlarıdır (Fallahi ve diğerleri, 2017; Rakkappanv e diğerleri, 2021)

Yapı kabuğu elemanlarının FDM ile birleştirilmesi, bina termal kütesini ve sonuç olarak bina enerji performansını artırmak için önemlidir. FDM'ler birleştirme yöntemlerine göre farklı yapı bileşenlerine entegre olarak performans göstermektedir. Mikro kapsüllenmiş FDM'ler genellikle duvar yapısına, makro kapsüllenmiş FDM'ler zemin ve tavanda, pencere sistemlerinde ise cam paneller arasındaki hava boşluğuna doldurularak kullanılabilir (Şekil 2.10).



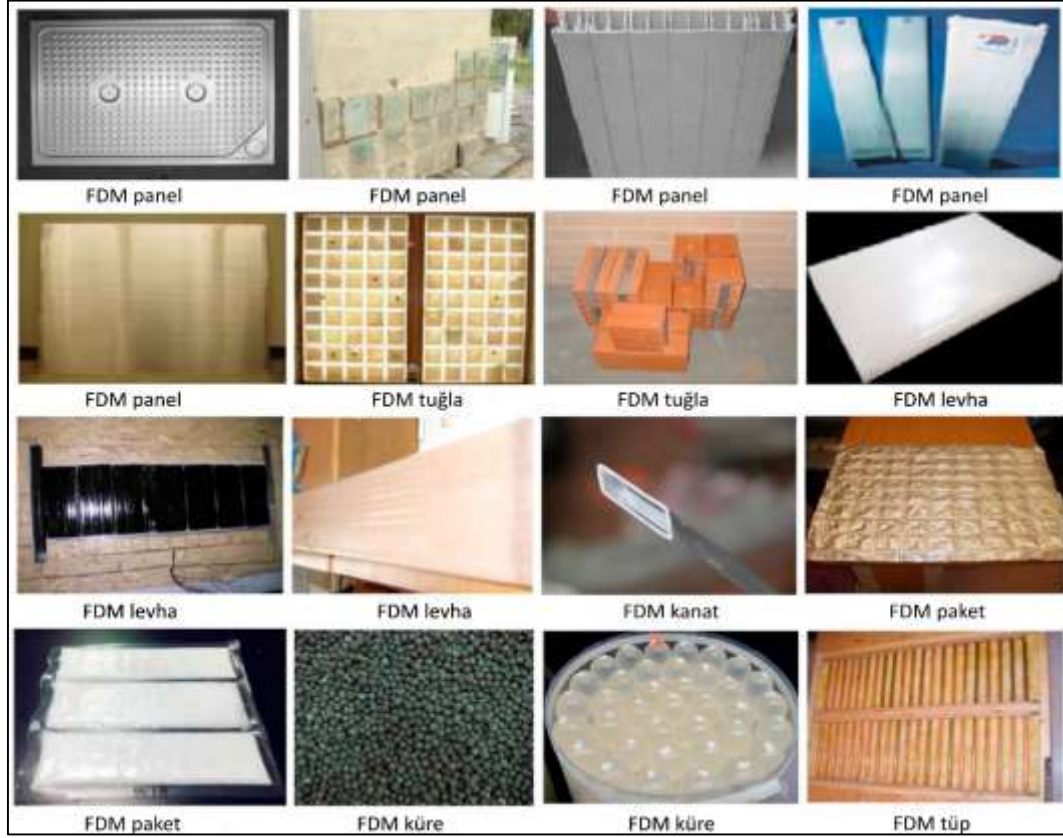
Şekil 2.10. FDM'nin yapı kabuğu bileşenlerinde kullanımı (Duraković, 2020)

FDM'lerin yapı malzemelerine dahil edilmesi, termal enerji depolamayı önemli ölçüde artırarak bina enerji performansının artmasını sağlamaktadır. Karar verme sürecinde malzeme özelliği, birleştirme yöntemi, iklimsel koşullarda çalışabilecek faz değişim aralığının belirlenmesi gibi parametrelerin doğru değerlendirilmesi seçimin doğru yapılabilmesi için önemlidir.

#### Faz değiştiren malzeme birleşimli duvar

Faz değişim malzemelerinin (FDM) bina kabuğu sistemlerine entegrasyonu (Resim 1), termal enerji depolama kapasitesini artırma ve binaların genel enerji verimliliğini iyileştirme potansiyelleri nedeniyle önemli bir araştırma alanı haline gelmiştir. FDM ile birleştirilmiş duvarlar, gizli ısıyı emerek, depolayarak ve serbest bırakarak iç mekân sıcaklık

dalgalanmalarını azaltmakta ve ısıtma-soğutma yüklerini düşürerek enerji tasarrufu sağlamaktadır.



Resim 2.1. Duvar yapısı ile kullanılan farklı makroenkapsülasyon formları (Liu ve diğerleri, 2018)

Farklı iklim koşullarında FDM ile geliştirilmiş duvar sistemlerinin performansı, potansiyeli ve sunduğu avantajlar üzerine yapılan çalışmalar, bu teknolojinin enerji verimliliğine katkı sağladığını göstermektedir. Örneğin, Zhou ve diğerleri (2024) FDM ile birleştirilmiş bir alçı levhanın termal davranışını incelemiştir. Soğutma döneminde sıcaklık değişimindeki azalma, günün en yüksek sıcaklığı sırasında ek soğutmaya ve gecenin serin saatlerinde ısıtmaya gerek kalmadan bina içinde konforlu bir termal ortamla sonuçlandığını ortaya koymuştur. Benzer şekilde, Souissi ve diğerleri (2023), çevre dostu termal depolama malzemelerinin entegrasyonu ile biyobazlı bir FDM kompozit duvarın performansını inceleyerek sürdürülebilirlik boyutuna dikkat çekmiştir.

Saylam Canım ve Maçka Kalfa (2023), ponza blok içerisine %5, %10 ve %15 oranlarında MikroCapsPCM25-slurry malzemesi katılarak elde ettikleri yapı bileşeninin termal

performansını deneysel ve enerji simülasyon çalışmalarını farklı iklim bölgeleri için yapmıştır. Enerji simülasyonu sonucunda, toplam enerji yükleri açısından, diğer bloklara kıyasla %15 PCM içeren ponza blokların kullanımıyla optimum sonuçlar elde edildiği ve toplam enerji yüklerinde %2 ile %3,6 aralığında tasarruf sağlandığı kaydedilmiştir.

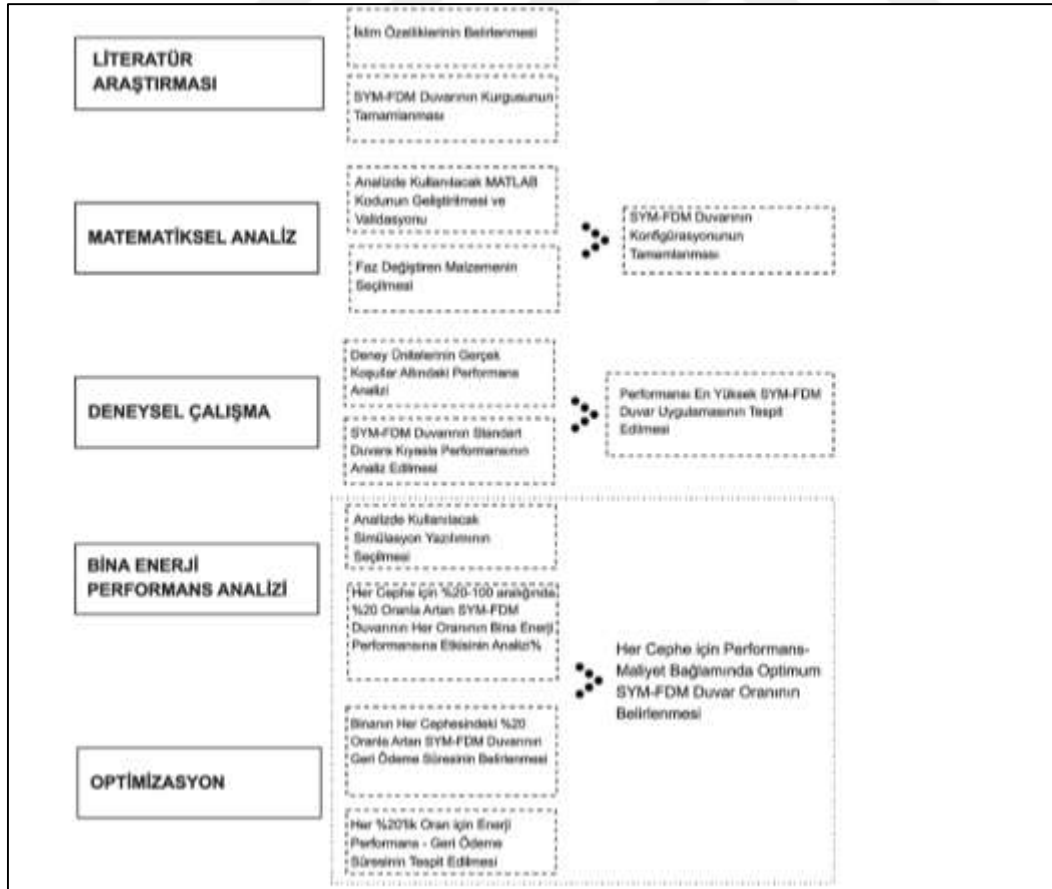
Deneysel ve sayısal simülasyonlar, farklı FDM türlerinin, kapsülleme yöntemlerinin ve entegrasyon tekniklerinin etkinliğini ortaya koymaktadır. Çalışmalar, makrokapsüllenmiş FDM panellerinin daha iyi termal stabilite sağladığını, nano-geliştirilmiş FDM'lerin ise termal iletkenliği artırarak daha verimli faz değişimi sunduğunu göstermektedir (Tunçbilek ve diğerleri, 2022). Abbas ve diğerleri (2021) tarafından Irak'ta tuğlaların iç boşluklarına FDM yerleştirilerek yapılan deneysel ve simülasyon çalışmasında, oda sıcaklığında 4,7°C'lik bir düşüş sağlandığı, sıcaklık dalgalanmalarının ortalama %23,84 oranında azaldığı ve ısı gecikme süresinin 2 saat arttığı tespit edilmiştir.

Kabdrakhmanova ve diğerleri (2021) tarafından dört katlı bir orta yükseklikteki konut yapısı kullanılarak nemli subtropikal bir ortamda yapılan simülasyon çalışmalarında, yıllık 12.635 kWh enerji tasarrufu sağlandığı ve toplam enerji tüketiminin %19,9 oranında azaldığı rapor edilmiştir. Araştırma bulguları, hava basıncı, güneş açısı ve rüzgar hızının bina enerji tüketimi üzerinde önemli bir etkisi olduğunu ortaya koymuştur. Oslo'da yapılan bir başka çalışmada (Cao ve diğerleri, 2019) enerji tüketiminde %32'ye varan azalma sağlanabileceği kanıtlanmış, ayrıca yalıtım katmanının önemine vurgu yapılmış, ancak FDM katmanının etkinliğinin iç ve dış sıcaklıklardan önemli ölçüde etkilendiği belirtilmiştir.

Faz değiştiren malzeme ile birleştiren duvar ile ilgili yapılan çalışmalar incelendiğinde, farklı birleştirme teknikleri ile duvar malzemesine entegre edilerek performansı yüksek duvar elemanının elde edildiği görülmüştür. Faz değiştiren malzemeler duvar malzemesine farklı birleştirme teknikleri ile uygulanmıştır. Sonucunda, FDM'nin uygulanacağı bölgenin iklimsel koşullara uygun seçilmesi durumunda hem ısıtma hem de soğutma döneminde bina enerji performansını iyileştirildiği görülmüştür.

### 3. MATERYAL VE YÖNTEM

Çalışma kapsamında; binalarda enerji korunumu, ısıtma ve soğutma yükünün azaltılması, hacimler arasındaki ısıtma ve soğutmadan kaynaklı yükün dengelenmesi ve iç ortam konfor koşullarının optimize edilmesi için Saydam Yalıtım Malzemesi (SYM) ve Faz Değiştiren Malzemelerinden (FDM) oluşan yüksek performanslı dış duvar sisteminin performansının değerlendirilmesi hedeflenmiştir. Önerilen SYM-FDM duvarının bileşeni olan malzemelerin yalnızca birbirleriyle değil, aynı zamanda tüm bina üzerindeki birleşik ve çeşitli performans etkilerinin araştırılması gerekmektedir. Bu çalışmada hedeflenen, tasarımcıların değişen ortam koşullarına aktif olarak yanıt veren binalar yaratmalarına olanak tanıyan, ayırt edici özelliklere sahip yapı malzemeleri ile konfigüre edilmiş duvar sistemi geliştirmektir. Bu hedef doğrultusunda, SYM ve FDM'nin birlikte kullanıldığı yapı kabuğu bileşenleri ile ilgili literatürdeki çalışmalar taranmış, eksik nokta tespit edilmiş ve bir yol haritası belirlenmiştir (Şekil 3.1).



Şekil 3.1. Çalışma için tanımlanan değerlendirme stratejisi

Bu çalışmada öncelikle, bina kabuğunun optik ve termofiziksel özelliklerini belirleyecek olan çok katmanlı duvar bileşeninde kullanılacak malzemelerin konumunun ve uygulama detayının belirlenmesi için önceki çalışmalar referans alınmıştır. SYM-FDM duvar sistemlerinin katmanlarının sıralanması ile ilgili Kienzl (1999), katmanların işlevlerine göre sıralanmasının performans açısından daha verimli olacağını savunmuştur. En dış katmanda ısı yalıtım malzemesinin dış etmenlerden korunmasını sağlayan eleman, içerideki ısı kaybını önlemek için SYM, SYM ile duvar arasındaki ısı yalıtımlı bir hava yastığı sağlamak için hava boşluğu ve iç katmanda iç mekâna maruz kaldığı için FDM olacak şekilde duvar sisteminin kurgusu yapılmıştır.

Genel kurgusu yapılan bu duvar sisteminde netleşmesi gereken bir diğer konu ise FDM'in duvar sistemine nasıl entegre edileceğidir. Bu konu ile ilgili yapılan literatür araştırmasında, genel olarak FDM'in duvar malzemesine emdirilerek duvar sisteminde kullanıldığı görülmüştür (Kurnuç Çırakman, 2010; Heim ve Klemm, 2003; Heim, 2004). FDM'in duvar sisteminde kullanılmasına yönelik diğer bir yöntem duvar malzemesine gömülü kullanılmasıdır. Bu yönetime yönelik yapılan çalışmada, faz değiştiren malzemenin tuğla gövdesine gömülü şekilde kullanıldığı çalışmalar dikkat çekmiştir (Lai ve diğerleri, 2006; Elnajjar, 2017; Aketouane ve diğerleri, 2018; Saxena ve diğerleri, 2020). Tuğlanın Türkiye inşaat sektöründe en çok kullanılan duvar malzemelerinden biri olması, iç boşluğunun olmasından dolayı uzmanlık gerektirecek bir işçiliğe gerek duyulmayacak olması nedeniyle bu çalışma için seçilmiştir.

FDM-tuğla birleşimi, kapsül içine alınmış FDM'in delikli tuğla içerisine gömülü şekilde kullanılması (Kaasinen, 1992; Nikolic, 2003; Saxena ve diğerleri, 2020; Bondareva ve Sheremet, 2021; Bondareva ve diğerleri, 2021; Gupta ve diğerleri, 2023) ile sağlanmaktadır. Lai ve Chiang (2006) geleneksel ısı yalıtımlı tuğla duvarlara FDM eklemenin etkisini incelemiş, gündüz ısı yalıtım etkisinin daha iyi olduğunu ve geceleri daha etkili iç mekân ısı korunumu sağladığını tespit etmiştir. Bu referansla çalışmada, delikli tuğla gövdesine FDM kapsülü gömülü enerji depolama duvarı ile saydam yalıtım malzemesinin konfigürasyonuna dayanan bir SYM-FDM duvarı çalışılmasına karar verilmiştir.

Termofiziksel özellikleri Çizelge 3.1'de verilen SYM-FDM duvarı için katmanlar dıştan içe doğru 0,4 cm cam, 1,6 cm granül aerogel, 0,4 cm cam, 2 cm hava boşluğu, 12 cm tuğla

arasına 8,5 cm R1 kapsül FDM (Farklı erime sıcaklıklarında) ve 2 cm sıva olarak belirlenmiştir (Şekil 3.2).



Şekil 3.2. SYM-FDM duvarının kesiti

Bu duvar sisteminin performansını doğrudan etkileyen, FDM'nin bulunduğu iklim koşuluna uygun seçilmesi ile doğrudan ilgilidir. Bu nedenle analizde faz değiştiren malzeme olarak farklı erime sıcaklığında Rubitherm markasına ait RT kategorisinde malzemeler kullanılmıştır. RT kategorisindeki FDM'ler organik yapıda malzemelerdir. Dar sıcaklık aralıklarında yüksek gizli ısı depolamaktadır. Ayrıca kimyasal olarak inerttir ve sınırsız bir ömre sahiptirler. Bu çalışma için kullanılan farklı erime sıcaklıklarındaki RTHC ürünleri (Çizelge 3.1), klasik RT malzemelerine kıyasla %25-30 oranında daha yüksek gizli ısı depolamaktadır (Url-5). Çalışma için farklı erime sıcaklığı aralığında RT18HC (17°C-19°C), RT21HC (20°C-23°C), RT22HC (20°C-23°C) ve RT28HC (27°C-29°C) malzemeleri seçilmiştir.

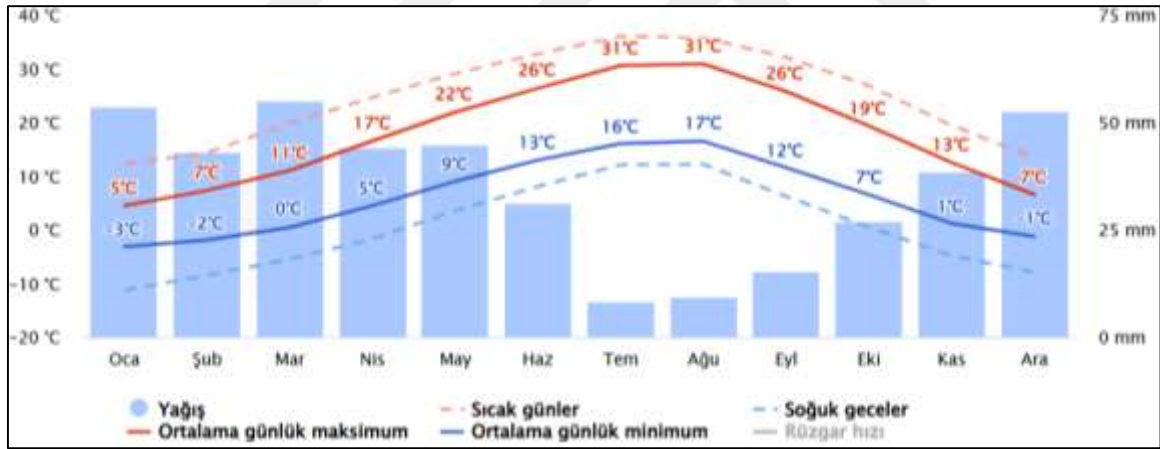
Çizelge 3.1. Bina dış duvarı malzemelerinin ısı özellikleri

|                 | X (cm) | k [W/mK] | C <sub>p</sub> [J/kgK] | ρ <sub>katı</sub> [kg/m <sup>3</sup> ] | ρ <sub>sıvı</sub> [kg/m <sup>3</sup> ] |
|-----------------|--------|----------|------------------------|----------------------------------------|----------------------------------------|
| Cam             | 0,4    | 1,05     | 840                    | 2500                                   | -                                      |
| Sıva            | 2      | 0,3      | 1050                   | 1800                                   | -                                      |
| Aerojel(Granül) | 1,6    | 0,012    | 1150                   | 120                                    | -                                      |
| Hava Boşluğu    | 2      | 0,025    | 1007                   | 1184                                   | -                                      |
| Tuğla           | 12     | 0,32     | 840                    | 600                                    | -                                      |
| XPS             | 5      | 0,031    | 1380                   | 24                                     | -                                      |
| RT10HC          | 8,5    | 0,2      | 2000                   | 880                                    | 770                                    |
| RT18HC          | 8,5    | 0,2      | 2000                   | 880                                    | 770                                    |
| RT21HC          | 8,5    | 0,2      | 2000                   | 880                                    | 770                                    |
| RT22HC          | 8,5    | 0,2      | 2000                   | 760                                    | 700                                    |
| RT28HC          | 8,5    | 0,2      | 2000                   | 880                                    | 770                                    |

Saydam yalıtım malzemesi olarak Cabot markasına ait Lumira serisi granül aerojel kullanılmıştır. Lumira aerojel cm başına %93 ışık geçirime özelliğine sahip yarı saydam bir malzemedir. Yalıtım malzemelerine göre üç kat daha fazla ısı performans sağlamaktadır. Lumira aerojel performansının yanında, yeniden kullanılabilir olma, üretimi sırasında çevreye çok az etkisi olması nedeniyle çevresel etki düzeyi düşük bir malzemedir (Url-4).

### 3.1. Analizin Yapılacağı Bölgenin İklim Özellikleri

SYM-FDM duvarının termal analizinde Türkiye'nin Ankara şehrinin hava durumu verileri kullanılmıştır. Ankara ili, 39.57 K enlemi ile 32,53 D boylamları arasında, deniz seviyesinden yaklaşık 890 m yüksekte yer alır. Ankara, Köppen-Geiger iklim sınıflandırma sistemine göre Bsk (soğuk yarı kurak iklim) olarak sınıflandırılır (Climate-Data). Şekil 3.3'te Ankara ilinin 2009-2023 yılları arasında alınan aylık meteorolojik verileri ortalamaları görülmektedir.



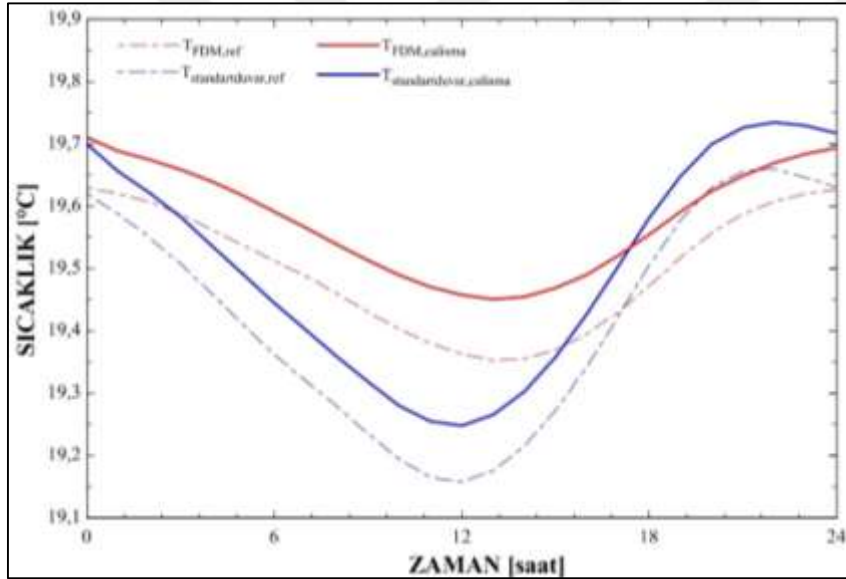
Şekil 3.3. Ankara ili meteorolojik verileri (Url-3)

Şekil 3.3'te incelendiğinde en yüksek sıcaklık verisinin temmuz ayında en düşük sıcaklık verisinin ocak ayında alındığı görülmür.

### 3.2. Matematiksel Analiz

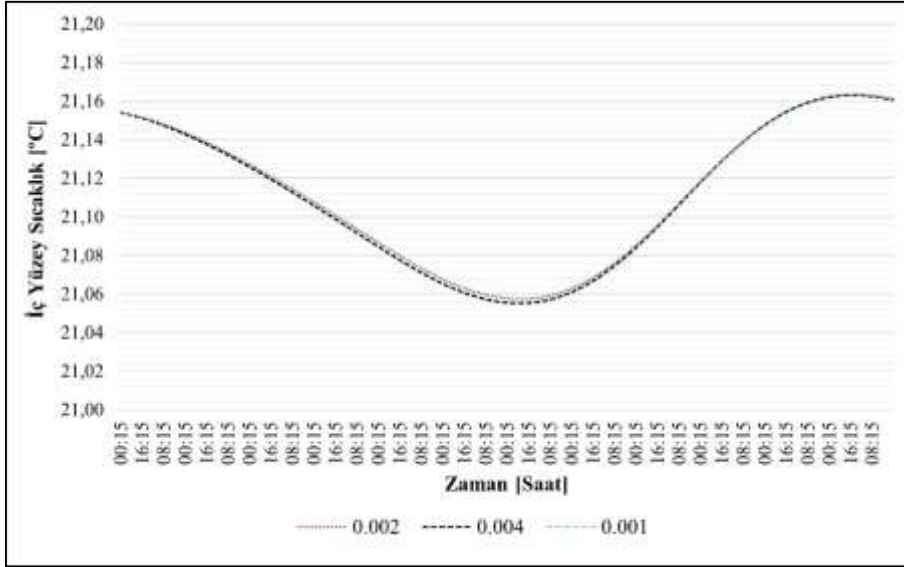
FDM'nin gün boyunca termal etkisini analiz etmek ve bölgenin ısıtma ve soğutma mevsimlerinde hangi FDM'nin daha iyi performans gösterdiğini belirlemek için bu çalışma için geliştirilen bir MATLAB kodunu kullanarak dinamik bir simülasyon

gerçekleştirilmiştir. Geliştirilen kod, duvar kesitinde farklı konumlardaki ve farklı erime sıcaklıklarındaki FDM'lerin olduğu 7 farklı senaryonun gizli ısılarının sayısal olarak analiz edildiği Arıcı ve diğerlerinin (2022)'nin 3 numaralı durum için elde ettiği sonuçlar ile doğrulanmıştır (Şekil 3.4). Erime sıcaklığı  $25^{\circ}\text{C}$ , ergime ısısı  $2000 \text{ (J/kg.K)}$ , kalınlığı  $30 \text{ mm}$  olan faz değiştiren malzeme kullanılmıştır. Kocaeli iline ait dış hava sıcaklığı ve güneş ışınlamının günlük değişimi kullanılarak sonuçlar karşılaştırılmıştır. İç ortam sıcaklığı  $24^{\circ}\text{C}$ , iç ortam taşınım ısı transferi katsayısı  $7.7 \text{ (W/m}^2\text{K)}$  kabul edilmiştir. Bu çalışmada geliştirilen kod ile elde edilen sonuçlar ile Arıcı ve diğerlerinin (2022)'nin çalışmasındaki sonuçların karşılaştırması Şekil 3.4'te verilmiştir. Şekilde görüldüğü üzere elde edilen sonuçların ortalama  $\%0,8$ 'lik bir sapma ile referans çalışmayla uyum içerisinde olduğu görülmektedir.



Şekil 3.4. Matematiksel modelin doğrulanması

Modelde, uzamsal ve zamansal çözünürlükler arasında uygun bir ilişki sağlayarak sayısal modelin kararlılığını ve yakınsamasını sağlamak için Courant-Friedrichs-Lewy (CFL) koşulu (Courant ve diğerleri, 1928) kullanılmıştır. Maksimum termal difüzyivite ( $t_{diff,max}$ )  $6.3492 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$  olarak belirlenmiştir. Konum adımını belirlerken duvarın katman kalınlıkları dikkate alınmıştır. Her katmandan sıcaklık verisi alabilmek için katman kalınlığına bölünebilen bir konum adımı seçilmiştir. Bu seçim öncesinde farklı  $\Delta x$  değeri (0.001, 0.002, 0.004) için son katmanın iç yüzey sıcaklığındaki değişim grafiği çizdirilmiştir (Şekil 3.5).



Şekil 3.5. Farklı konum adımı değerlerindeki iç yüzey sıcaklığı değişimleri

Farklı  $\Delta x$  değeri için yapılan analizde aynı konum için aynı sıcaklık değerlerinde önemli bir değişiklik gözlenmemiştir (Şekil 3.5). Bu nedenle, daha ileri analizlerde 0.004 konum adımı, bu konum adımı için CFL koşulu ile belirlenen ( $CFL \leq \Delta x$ ) 1,2 saniye zaman adımı kullanılmıştır.

SYM-FDM duvar sisteminin yüksek ısı performans göstermesi için tuğla içerisine gömülü olarak kullanılacak olan faz değiştiren malzemenin uygulanacak bölgenin iklim koşullarına uygun seçilmesi gerekmektedir. Bu nedenle Ankara ilinin iklim koşullarını fonksiyonlarla ifade edebilmek amacı ile Bulut ve diğerlerinin (2013) çalışmalarında, Türkiye'deki şehirlere ait günlük maksimum ve minimum sıcaklığı veren fonksiyon parametreleri, 15 yıllık ölçülen veriler yardımıyla belirlemiştir. Çalışmada verilen fonksiyon parametreleri ile gün içerisinde meydana gelen maksimum ve minimum sıcaklıklar Eş. 3.1 ve Eş. 3.2 ile hesaplanmıştır.

$$T_{MAX} = T_1 - (T_1 - T_2) \cos \left[ \frac{2\pi}{365} (n - 25) \right] \quad (3.1)$$

$$T_{min} = T_3 - (T_3 - T_4) \cos \left[ \frac{2\pi}{365} (n - 25) \right] \quad (3.2)$$

Burada  $T_{\max}$  ve  $T_{\min}$  sırasıyla gün içerisinde meydana gelen maksimum ve minimum sıcaklığı,  $T_1$ ,  $T_2$ ,  $T_3$  ve  $T_4$  fonksiyon parametrelerini göstermektedir,  $n$  ise Ocaktan itibaren yılın günlerini göstermektedir. Bu çalışmada, Saatlik güneş ışınlamını belirlemek için ASHRAE bulutsuz gökyüzü teorik modeli (ASHRAE Standart 55, 2003) kullanılmıştır. Bakırcı (2009) çalışmasında her ayın 21'i için ASHRAE güneş radyasyonu sabiti, atmosferik sönümleme katsayısı ve gökyüzü yayılım faktörüne ulaşıldığı için bu çalışmada ısıtma dönemi için 21 Ocak, soğutma dönemi için 21 Temmuz günleri seçilmiştir.

Isıtma ve soğutma durumuna göre Eş. 3.1 ve Eş. 3.2 kullanılarak hesaplanan maksimum ve minimum sıcaklıklar Çizelge 3.2'te verilmiştir.

Çizelge 3.2. Ankara ilinin 21 Ocak ve 21 Temmuz tarihleri için hesaplanan minimum ve maksimum sıcaklıklar

|        | 21 OCAK                       |                               | 21 TEMMUZ                     |                               |
|--------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
|        | $T_{\max} (^{\circ}\text{C})$ | $T_{\min} (^{\circ}\text{C})$ | $T_{\max} (^{\circ}\text{C})$ | $T_{\min} (^{\circ}\text{C})$ |
| Ankara | 4,75                          | -3,26                         | 30,38                         | 15,53                         |

Bulut ve diğerleri (2015) dış hava sıcaklığının gün boyunca değişimini iki ayrı periyoda ayırmışlar ve periyodlar için eşitlikler önermişlerdir. İki ayrı periyoda için dış hava sıcaklığının gün boyunca değişimi Eş. 3.3 ve Eş. 3.4'te verilen formüller ile hesaplanmaktadır.

$$T_d(t) = T_{\min} + (T_{\max} - T_{\min}) \sin \left[ \frac{\pi}{2} \left( \frac{t - t_{\min}}{t_{\max} - t_{\min}} \right) \right]^{1,4} \quad (3.3)$$

$$T_d(t) = T_{\max} + (T_{\max} - T_{\min}) \sin \left[ \frac{\pi}{2} \left( \frac{t - t_{\max}}{24 + t_{\min} - t_{\max}} \right) \right]^{1,2} \quad (3.4)$$

Eş. 3.3 ve Eş. 3.4'te verilen formüllerde  $T_d(t)$  gün boyunca değişen dış hava sıcaklığını göstermektedir. Eş. 3.3 birinci periyodun sıcaklık değişimini vermektedir ve bu bölge minimum sıcaklığın olduğu saatten başlayarak maksimum sıcaklığın olduğu saate kadar olan süreyi kapsamaktadır. Eş. 3.4 ise ikinci periyodun sıcaklık değişimini vermektedir ve maksimum sıcaklığın olduğu saatten minimum sıcaklığın olduğu saate kadar olan süreyi kapsamaktadır. İkinci periyotta ifade edilen herhangi bir zaman  $t \leq t_{\min}$  ise  $t = t + 24$  denklemi

kullanılmaktadır.  $t_{\min}$  ve  $t_{\max}$  sırasıyla minimum ve maksimum sıcaklığının olduğu zamanları göstermektedir. Hesabı Eş. 3.5. ve Eş. 3.6 ile yapılmaktadır (Bulut ve diğerleri, 2015).

$$t_{\min} = 12(t_d / 2) \quad (3.5)$$

$$t_{\max} = 12 + (t_{\min}(12 - t_{\min})) / 13,5 \quad (3.6)$$

Eş. 3.5' de verilen formülde  $t_d$  gün uzunluğunu ifade etmektedir. Hesabı Eş. 3.7'de verilen formülasyon ile yapılmaktadır.

$$t_d = \frac{2}{15} \cos^{-1}(-\tan(\phi) \tan(\delta)) \quad (3.7)$$

Eş. 3.7'de verilen formülde  $\phi$  enlem açısını ifade etmektedir.  $\delta$  ise güneşin doğrultusu ile ekvator düzlemi arasındaki açı olan deklinasyon açısını göstermektedir ve Eş. 3.8'deki gibi hesaplanmaktadır.

$$\delta = 23,45 \sin\left(\frac{2\pi}{365}(n + 284)\right) \quad (3.8)$$

Çalışmada, saatlik güneş ışınlamını belirlemek için ASHREA bulutsuz gökyüzü teorik modeli kullanıldı ve Eş. 3.9'da verilen formül ile hesaplandı (Bakırcı, 2009).

$$I(t) = Ae^{(-B/\cos(\phi_z))} \cos(\phi_z) + C(Ae^{(-B/\cos(\phi_z))} \cos(\phi_z)) \quad (3.9)$$

Burada A belirgin güneş radyasyonu sabiti, B atmosferik sönümleme katsayısı, C ise gökyüzü yayılım faktörüdür. Bu çalışmada analizi yapmak için seçilen 21 Ocak ve 21 Temmuz günleri için A, B ve C sabitleri Çizelge 3.3'te verilmiştir.

Çizelge 3.3. ASHREA Sabitleri (Bakırcı, 2009)

| Tarih     | A(W/m <sup>2</sup> ) | B     | C     |
|-----------|----------------------|-------|-------|
| 21 Ocak   | 1229,475             | 0,142 | 0,058 |
| 21 Temmuz | 1084,460             | 0,207 | 0,136 |

Eş. 3.10’da verilen  $\cos(\phi_z)$  güneşin doğrultusu ile dikey eksen arasındaki açı olan zenit açısını ifade etmektedir ve hesabı Eş. 3.10 ile hesaplanmaktadır (Bakırcı, 2009).

$$\cos(\phi_z) = \cos(\delta) \cos(w) + \sin(\delta) \sin(\phi) \quad (3.10)$$

Eş. 3.10’da verilen formülde  $w$  saat açısını göstermektedir ve Eş. 3.11 ile hesaplanmaktadır.

$$w = 15(12 - t_s) \quad (3.11)$$

Eş. 3.11’de verilen denklemde  $t_s$  güneş saatini göstermektedir ve hesabı Eş. 3.12’de verilen denklem ile yapılmaktadır.

$$t_s = t_y + t_e / 60 - 4 / 60(\lambda_s - \lambda_1) \quad (3.12)$$

Eş. 3.12’de verilen denklemde  $t_y$  yerel saati göstermektedir.  $s$  ve  $\lambda_1$  sırasıyla standart ve yerel boylamlardır. Türkiye için standart boylam  $45^\circ$  doğu boylamıdır. Bu çalışma için seçilen Ankara ilinin enlemi  $39.57$  boylamı  $32.53$ ’tür. Eş. 3.12’deki  $t_e$  zaman eşitliğini ifade etmektedir ve Eş. 3.13’teki gibi hesaplanmaktadır (Bakırcı, 2009).

$$t_e = 9,87 \sin\left(\frac{4\pi(n-81)}{365}\right) - 7,53 \cos\left(\frac{2\pi(n-81)}{365}\right) - 1,5 \sin\left(\frac{2\pi(n-81)}{365}\right) \quad (3.13)$$

Bu çalışmada gökyüzü sıcaklığının değişimi, Swinbank'ın (1963) gökyüzü sıcaklığını verilen dış hava sıcaklığının bir fonksiyonu olarak önerdiği Eş. 3.14 ile belirlenmiştir.

$$T_{sky}(t) = 0,0552 \times T_d(t)^{1,5} \quad (3.14)$$

İklim koşullarının fonksiyonlarla ifade edilmesi ile farklı erime sıcaklıklarına sahip faz değiştiren malzemelerinin Ankara iklim koşullarındaki analizi zamana bağlı olarak gerçekleştirilmiştir. Bu analiz için kabul edilen varsayımlar;

- Bu çalışmada, duvar boyunca ısı transferinin tek boyutlu olduğu,

- Faz değiştiren malzemenin tuğlanın gövdesindeki boşluğu tamamen doldurduğu,
- FDM ve tuğla arasındaki doğal konveksiyon ihmal edildiği,
- Faz değiştiren malzemenin başlangıçta katı fazda olduğu ve erime noktasına geldiği anda öncelikle erime/katılaşma sonrasında tamamen erimenin gerçekleştiği,
- şekil 3.6’da gösterildiği üzere iki farklı senaryo dikkate alındığı kabul edilmiştir.



şekil 3.6. Saydam yalıtım ve FDM entegreli dış duvar kesiti

Bu çalışmada, duvar boyunca ısı transferinin tek boyutlu olduğu kabul edildi. Duvarda bina yapı malzemelerinde ve faz değiştiren malzeme tabakasında faz değişimi gerçekleşmediği durumda, bir başka deyişle malzemenin tümünün katı ya da sıvı fazda olduğu durumda iletimle olan ısı geçişi Eş. 3.15’teki gibidir;

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (3.15)$$

Burada  $\alpha(=k/\rho C_p)$  malzemelerin ısı yayılım katsayısını göstermektedir. Faz değişimi sırasında, bir başka deyişle erime/katılaşmanın gerçekleştiği esnada ısı geçişi Eş. 3.16’da ki gibidir.

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} - \frac{L_H}{C_p} \frac{\partial f}{\partial t} \quad (3.16)$$

Burada  $L_H$  faz değiştiren malzemenin erime ısısını,  $f$  ise faz değişiminin gerçekleştiği sırada malzeme içerisindeki sıvı oranını göstermektedir ve Eş. 3.17’de verildi (Aketouane ve diğerleri, 2018);

$$f(t) = \begin{cases} T_{pcm} \geq T_m - \frac{\Delta T}{2} & \text{ise } 0 \\ T_m - \frac{\Delta T}{2} \leq T_{pcm} \leq T_m + \frac{\Delta T}{2} & \text{ise } \frac{1}{\Delta T} (T_m + \frac{\Delta T}{2} - T_{pcm}) \\ T_{pcm} \leq T_m - \frac{\Delta T}{2} & \text{ise } 1 \end{cases} \quad (3.17)$$

Burada  $T_m$  faz değiştiren malzemenin erime sıcaklığını göstermektedir. Çalışmada, duvarın dış ve iç yüzeyindeki sınır şartları sırasıyla Eş. 3.18 ve Eş. 3.19'da verilmiştir;

$$-k \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_0 = h_0 [T_d(t) - T_{dy}(t)] + \alpha_G I(t) + \varepsilon \sigma [T_{sky}(t)^4 - T_{dy}(t)^4] \quad (3.18)$$

$$-k \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_i = h_i [T_{iy}(t) - T_{oda}] \quad (3.19)$$

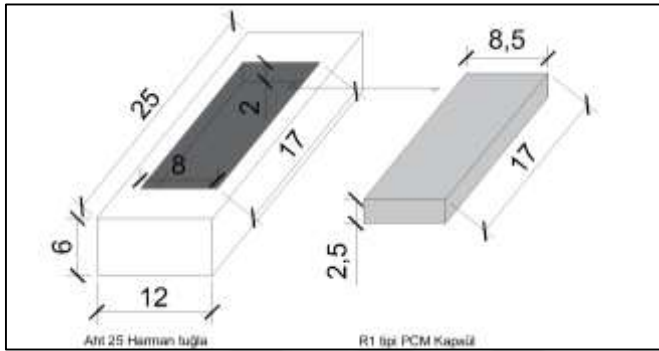
Burada,  $T_{dy}(t)$  ve  $T_{iy}(t)$  sırasıyla duvar dış yüzey ve iç yüzey sıcaklığını,  $T_d(t)$  gün boyunca değişen dış hava sıcaklığını,  $T_{oda}$  oda sıcaklığını göstermektedir. Isıtma ve soğutma durumu için oda sıcaklığı 21°C olarak alınmıştır.  $h_0$  ve  $h_i$  sırasıyla dış ortam ve iç ortam ile duvar yüzeyi arasındaki ısı taşınım katsayısını göstermektedir ve bu değerler sırasıyla 22 ve 9 W/m<sup>2</sup>K olarak alınmıştır (Charai ve diğerleri, 2021).  $\alpha_G$  güneş ışıınımını yutma oranını (0,6),  $\varepsilon$  ışıınım neşretme katsayısını (0,4),  $\sigma$  Stefan-Boltzmann sabitini (5,67 10<sup>8</sup> W/m<sup>2</sup>K<sup>4</sup>) göstermektedir (Çengel, 2011).

### 3.3. Deneysel Çalışma

Çalışmanın bu bölümünde güney duvarında 3 farklı uygulamada saydam yalıtımlı gizli ısı depolama duvarı bulunan 1 m<sup>3</sup> hacminde oda bir de tüm duvarları opak yalıtımlı standart duvarlardan oluşan yine 1 m<sup>3</sup> hacminde oda inşa edilmiştir. Bu duvarların yaz ve kış aylarında atmosferik koşullar etkisindeki ısı davranışlarının belirlenmesi amacıyla deneysel ölçümler yapılmıştır. Ölçümler, ısıtma dönemini olan Aralık, Ocak, şubat, aylarını ve soğutma dönemi olan Haziran, Temmuz, Ağustos aylarını kapsayacaktır. Bu bölümde; deneysel çalışmaya hazırlık, ısıl performansın ve iç ortam konfor koşullarının incelendiği odaların inşası, ölçüm ve kayıt sistemi olmak üzere üç ana bölümden oluşmaktadır.



boyutlarıyla sınırlandırılarak yapılmıştır. Bu araştırmalar sonucunda ortasında net bir boşluğu olan harman tuğlanın kullanılabileceğine karar verilmiştir. 25 cm x 12 cm x 6 cm boyutunda iç gövdesindeki boşluk 17 cm x 8 cm x 2 cm olan harman tuğla bu çalışma için seçilmiştir (Şekil 3.7). Seçilen bu tuğla, Rubitherm firmasının R1 tipi kapsülünün entegre edilebileceği ve minimum ısıl temas direnci ile karşılaşacağımız bir malzeme olmuştur. Bu nedenle duvar malzemesi olarak harman tuğla seçilmiştir.



Şekil 3.7. Harman tuğla ve R1 termal paket ile kapsülün birleşimi

Tasarımı netleşen SYM-FDM duvarı, dört farklı duvar kuruluşuna sahip 100 cm x 100 cm x 100 cm boyutlarında, üç cephesi opak (XPS), bir cephesi saydam (doğu cephesi), zemin ve çatısı yalıtımlı test ünitelerinin güney cephesinde kullanılacaktır. Ölçümleri yapılacak olan duvar kuruluşları; havalandırmaz SYM-FDM duvarı (1), havalandırmaz, yalıtım ünitesi ile termal depolama arasında gölgeleme elemanı olarak beyaz storun kullanıldığı SYM-FDM duvarı (2), havalandırılabilir SYM-FDM duvarı (3) ve opak yalıtımlı standart konut duvarı (4) olacak şekilde dört deney ünitesi inşa edilmiştir.

Deneyisel çalışma için tariflenen deney ünitelerinin analizlerin yapılabilmesi için olabildiğince gölge almayan açık bir alanda inşa edilmesi gerekmektedir. Gazi Üniversitesi Mimarlık Fakültesi ve Mühendislik Fakültesinin bulunduğu Maltepe kampüsünde alan araştırmaları yapılmıştır. Hem yaz hem de kış koşullarında ölçüm alacağımız bu deney ünitelerinin inşa edileceği yer aynı zamanda öğrenciler tarafından ulaşılması daha sınırlı olan diğer bir ifade ile daha korunaklı olması yer seçiminde diğer bir kriter olmuştur. Yapılan alan araştırmaları sonucunda Mimarlık Fakültesi İdari personel birimlerinin önündeki bahçe alanı seçilmiştir (Resim 3.2).

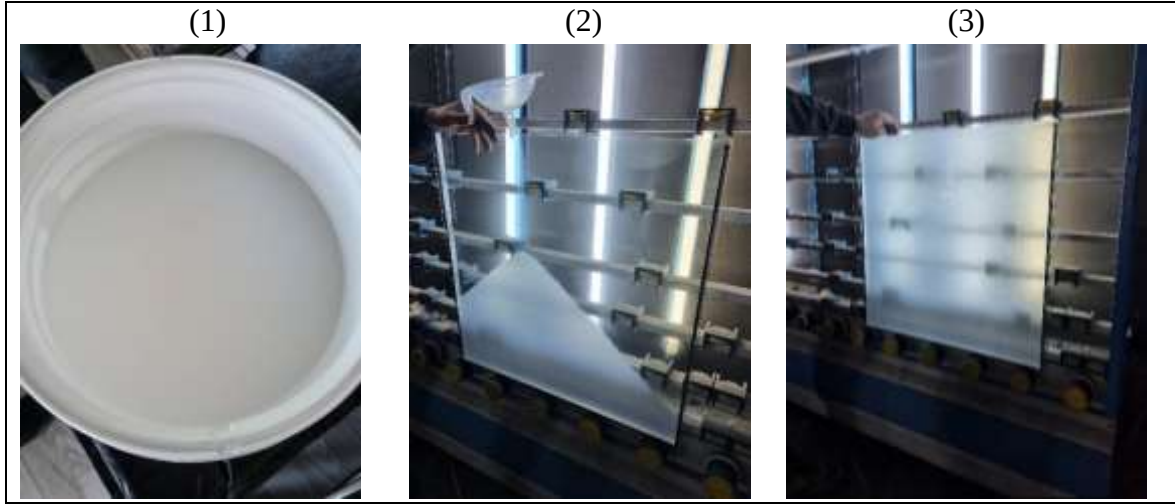


Resim 3.2. Deney ünitelerinin inşa edildiği alanın uydu görünümü

Deney ünitelerinin yerleşimleri ile ilgili bir diğer konu, ünitelerin birbirine gölge oluşturmayacak şekilde yerleşimlerinin yapılmasıdır. Bunun için gölge boyunun en uzun olduğu 21 Aralık günü dikkate alınarak Sketchup (Url-2) programında gölge analizi yapılmıştır. Yapılan gölge analizinde deney üniteleri arasına 3 metre mesafe konulduğunda deney ünitelerinin birbiri üzerine gölge düşürmediği tespit edilmiştir.

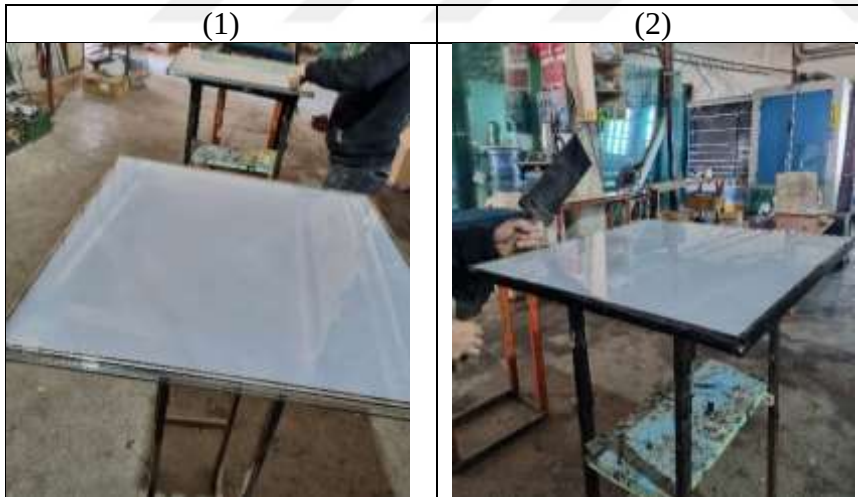
### 3.3.2. Deney ünitelerinin inşası

Bu aşamada öncelikle, Cabot firmasından temin edilen LR1000 granül aerogel dolgulu cam üniteleri hazırlanmıştır. 4 mm iki cam arasındaki 16 mm boşluğa aerogelin doldurulması için camın 3 tarafı cam çitası ile sabitlenmiş, Aerogel minimum hava kalacak şekilde doldurulmuştur (Resim 3.3).



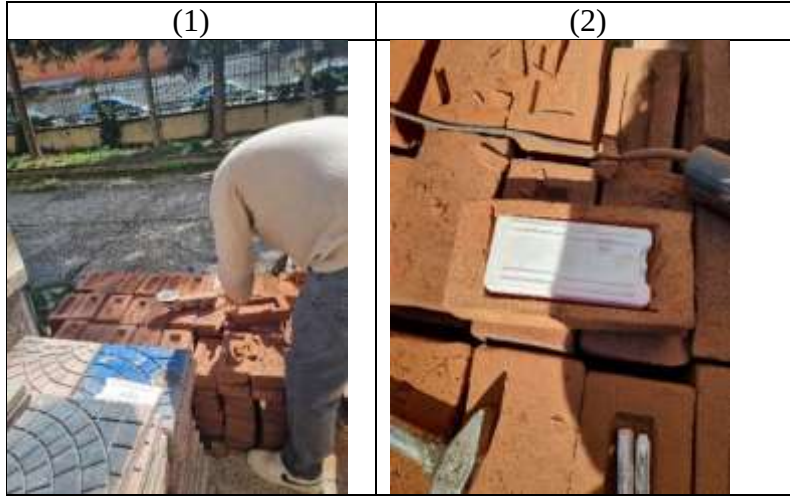
Resim 3.3. (1) LR1000 Granül Aerogel, (2,3) Aerogel'in çift cam arasına dolum uygulaması

Aerogelin çift cam arasına dolumu yapıldıktan sonra üst kısmı da cam çitası ile kapatılmıştır. Cam – aerogel – cam'dan oluşan saydam yalıtım ünitesinin hava sızdırmazlığını sağlamak için çitanın etrafına yalıtımlı ısıcamlar için iki bileşenli Polisülfid (polysulfid) esaslı macun olan tiyakol uygulanmıştır (Resim 3.4).



Resim 3.4. (1) Granül Aerogel dolgulu çift camın cam çitası uygulaması, (2) Sızdırmazlığı sağlamak için cam çitasının etrafına tiyakol uygulanması

İş paketinin bu aşamasında yapılan bir diğer çalışma faz değiştiren malzemenin tuğla gövdesine entegre edilmesi olmuştur. R1 tipi makrokapsüllere doldurulmuş halde temin edilen FDM'nin boyutları ile harman tuğlanın gövdesindeki boşluğun ölçüleri birebir uyumlu olmaması nedeniyle, FDM'nin sığacağı ölçülerde her bir harman tuğlanın gövdesi jet taşı ile açılmış, malzemenin tuğla gövdesine entegrasyonu tamamlanmıştır (Resim 3.5).



Resim 3.5. (1) Tuğla gövdesindeki boşluğun kapsüllenmiş FDM ölçülerinde açılması, (2) R1 makrokapsül ile kapsüllenmiş FDM'in tuğla gövdesine yerleştirilmesi

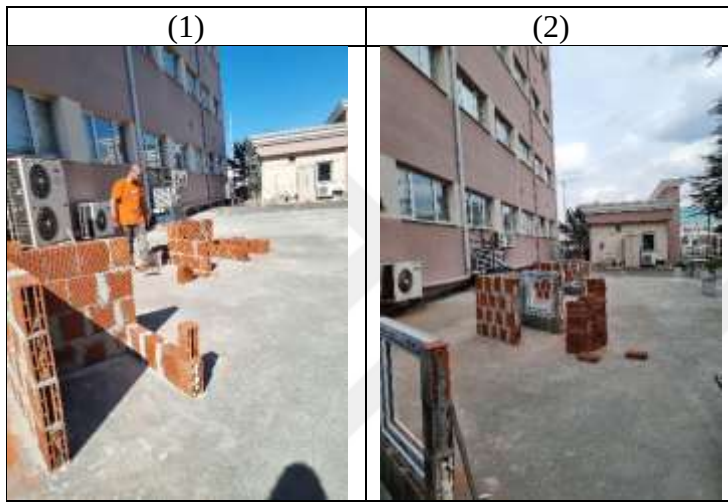
Her bir tuğla için yapılan bu uygulama el işçiliği ile yapıldığı için tuğlanın gövdesindeki boşluğun ölçülerinde farklılıklar görülmüştür. Bu durumun tuğla gövdesindeki boşlukla FDM arasında ısıl temas direncinin oluşmasının önüne geçmek için toz halindeki kil kaynaklı bentonit malzemesinin tuğla ile benzer yapıda olması, farklı bir bağlayıcı malzeme kullanmadan su ile macun kıvamına getirilebilmesi nedeniyle boşlukları doldurmak için kullanılmıştır (Resim 3.6).



Resim 3.6. (1) ve (2) Harman Tuğla gövdesindeki boşluk ile FDM arasına su ile macun kıvamına getirilen bentonitin uygulanması

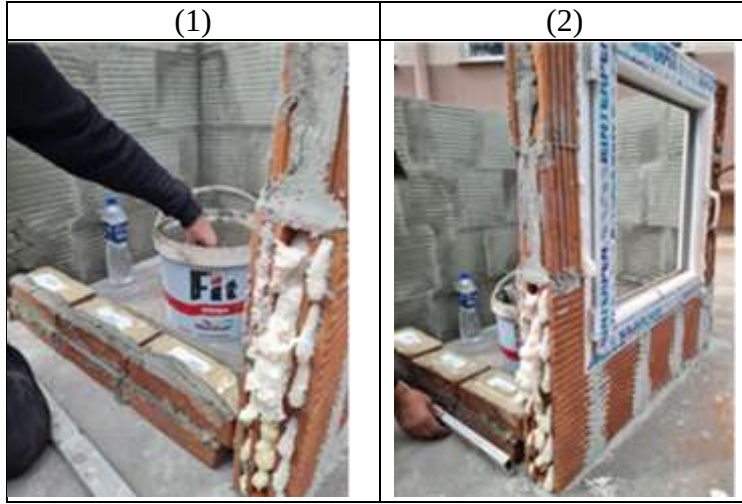
Faz değiştiren malzeme gömülü tuğla ile saydam yalıtım ünitesi uygulamaya hazır hale getirildikten sonra deney ünitelerinin inşaatına başlanmıştır. Deney odalardan biri (4. oda), hiçbir yüzeyine SYM-FDM duvarı uygulanmayacak şekilde referans oda olarak tasarlanmıştır. Dördüncü odanın tüm duvarları tuğla ile örülecek ve dıştan opak yalıtım

uygulanacak şekilde planlaması yapılmıştır. Diğer dört odanın güney cephelerini oluşturan duvarlar farklı uygulama biçimleri ile SYM-FDM duvarı olacak şekilde planlaması yapılmıştır. Bu dört odanın diğer duvarları da 1.oda gibi tuğla ile örülüp, dıştan opak yalıtım uygulanmıştır (Resim 3.7). Deney ünitelerinin kuzey, doğu ve batı duvarı standart duvar, güney duvarı ise üç deney ünitesinde saydam yalıtımlı gizli ısı depolama duvarı olacak şekilde kurgulanmıştır. Uygulama detayları kesinleşen deney odalarının seçilen alan üzerinde yerleri işaretlenerek bu bölümde yapılacak çalışmaların ikinci aşamasına geçilmiştir.



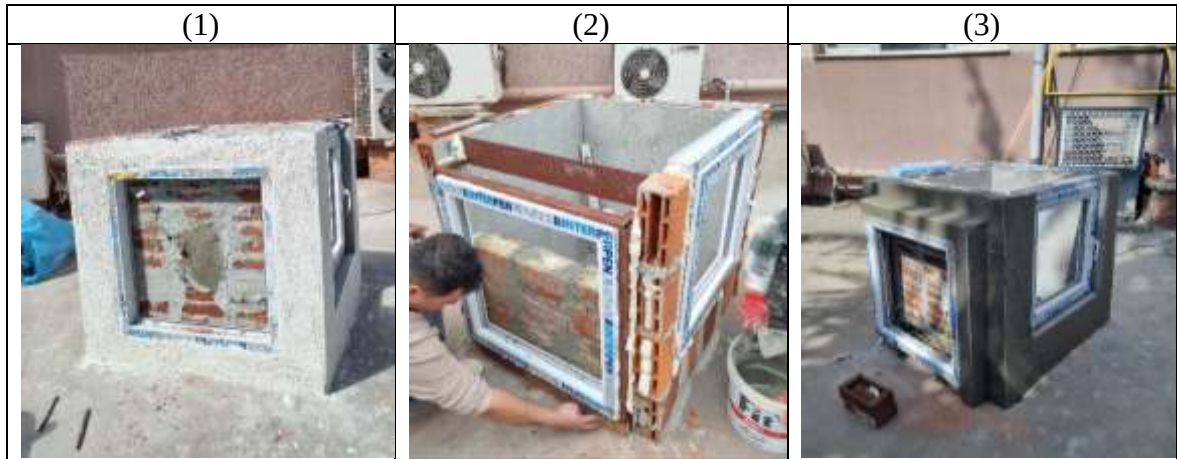
Resim 3.7. (1) ve (2) Deney ünitelerinin kuzey, doğu ve batı cephelerine delikli tuğlanın örülmesi

Deney ünitelerinin kuzey, doğu ve batı duvarlarının örümü yapıldıktan sonra 1, 2 ve 3 numaralı deney ünitelerinin güney duvarına uygulanacak saydam yalıtımlı gizli ısı depolama duvarının FDM entegreli tuğlalarının örülmesi işlemine başlamış, FDM entegreli tuğlaların örülmesi, bir RT18HC gömülü tuğla bir de RT22HC gömülü tuğla olacak şekilde karma düzende yapılmıştır (Resim 3.8).



Resim 3.8. (1) ve (2) Isıtma (RT18HC) ve Soğutma (RT22HC) döneminde kullanılacak olan FDM'lerin olduğu ısı depolama duvarının karma düzende örülmesi

Duvar örülmesi tamamlandıktan sonra saydam yalıtım ünitelerinin montajı yapılmıştır. 1 numaralı deney ünitesi havalandırmaz SYM-FDM duvarı, 2 numaralı deney ünitesi havalandırmalı SYM-FDM duvarı, 3 numaralı deney ünitesi havalandırmaz gölgeleme elemanı olarak beyaz storun kullanıldığı SYM-FDM duvarı olarak inşa edilmiştir (Resim 3.9).



Resim 3.9. (1) Tuğla gövdesindeki boşluğun kapsüllenmiş FDM ölçülerinde açılması, (2) R1 makrokapsül ile kapsüllenmiş FDM'in tuğla gövdesine yerleştirilmesi

Güney duvarı SYM-FDM duvarı olan havalandırmalı odanın saydam yalıtım ünitesi ile duvar dış yüzeyi arasında, oda yüksekliği ve ısı akışı arasındaki ilişki dikkate alınarak 5 cm hava boşluğu bırakılmıştır. Duvarların alt ve üst kısmına da diğer odalardan farklı olarak 8x50 cm boyutlarında havalandırma boşlukları bırakılmıştır (Resim 3.9). Havalandırma



Çizelge 3.4. (devam). Deney odalarının plan ve kesitleri

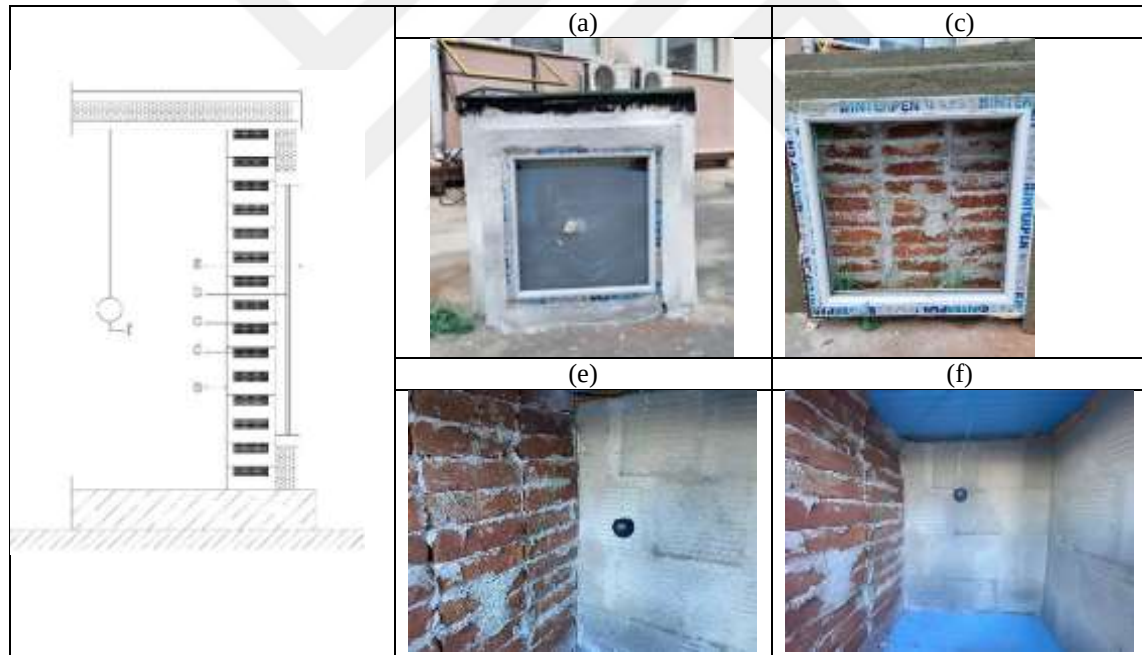
|  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
|--|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
|  | <p>3. ODA:</p> <p>Güney duvarında saydam yalıtım ünitesi ile gizli ısı depolama duvarı arasına gölgeleme elemanı olarak beyaz stor uygulanmıştır. Diğer duvarların tüm dış yüzeyine 5 cm opak yalıtım (XPS) uygulanmıştır. Gölgeleme elemanı ısıtma döneminde güneş ışınımının etkili olduğu gündüz saatlerinde açık tutulmuş, akşam saatlerinde kapatılmıştır. Soğutma döneminde ise güneş ışınımının etkili olduğu gündüz saatlerinde perde kapatılmış, akşam saatlerinde açılmıştır.</p> |
|  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
|  | <p>4. ODA:</p> <p>Dört cephesi de yatay delikli tuğla ile örülmüş olup, dış yüzeyine tamamen 5 cm opak yalıtım (XPS) uygulanmıştır.</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |



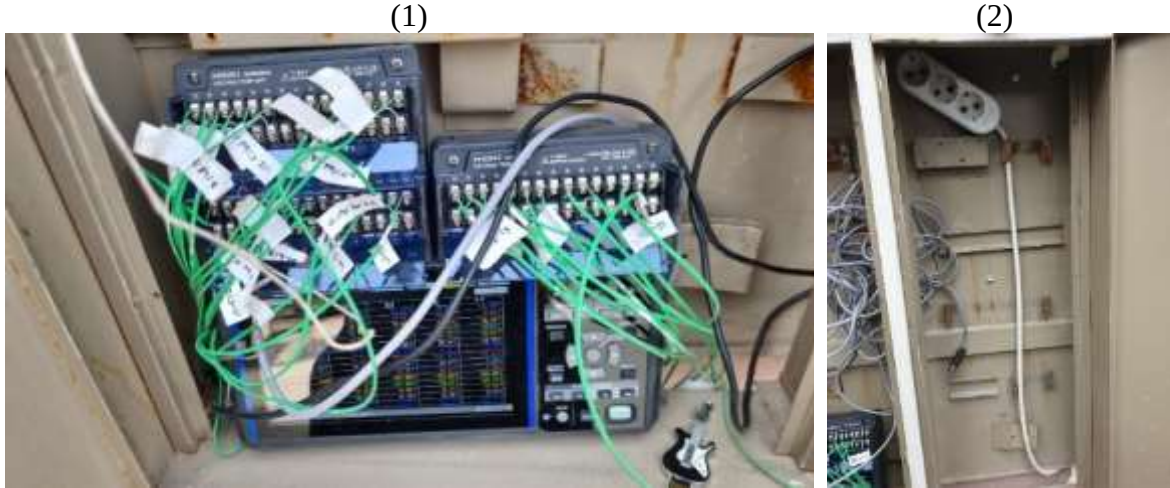
Çizelge 3.6. Deney ünitelerine yerleştirilen termokuplların ölçüm alınan nokta ve açıklama bilgisi

| Ölçüm Alınan Nokta | Açıklaması                                                                                                                                                                                                                                                          |
|--------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| a                  | SYM-FDM duvar çeşitleri için camın dış ortama bakan yüzeyin sıcaklığını ölçmek için, standart duvar için tuğla duvarın dış ortam sıcaklığını ölçmek için termokupl yerleştirilmiştir.                                                                               |
| b                  | SYM-FDM duvar çeşitleri için camın hava boşluğu ile temas eden yüzey sıcaklığını ölçmek için termokupl yerleştirilmiştir.                                                                                                                                           |
| c                  | SYM-FDM duvar çeşitlerinin FDM entegreli harman tuğlanın hava boşluğu ile temas eden yüzeyin sıcaklığını ölçmek için termokupl yerleştirilmiştir.                                                                                                                   |
| d                  | SYM-FDM duvar çeşitlerinin FDM entegreli harman tuğla ile FDM'in temas ettiği yüzey sıcaklığını ölçmek için termokupl yerleştirilmiştir.                                                                                                                            |
| e                  | SYM-FDM duvar çeşitlerinin FDM entegreli harman tuğlanın iç ortama bakan yüzeyin sıcaklığını ölçmek için termokupl yerleştirilmiştir.                                                                                                                               |
| f                  | Isıl performans ölçümleri yapılan 4 deney ünitesinin ortalama radyant sıcaklığını (mean radiant temperature) ölçmek için odaların ortasına ve hacmin de orta noktasına gelecek şekilde siyah renge boyanan 40 mm çapındaki topun içine termokupl yerleştirilmiştir. |

Çizelge 3.7. Termokuplların deney odalarına yerleştirildiği yerler ve kodları



Deney ünitelerinden toplam 30 noktada alınan anlık sıcaklık verileri 45 kanallı HIOKI LR8450 Datalogger'ına kaydedilmektedir. Datalogger dan kesintisiz ölçüm almak için deney ünitelerinin orta noktasına denk gelen, Mimarlık Fakültesi binasının dış cephesine pano montaj edilmiş ve Datalogger için elektrik hattı çekilmiştir (Şekil 3.8). Bu sayede kesintisiz bir şekilde ölçüm alınmaktadır. Bu ölçüm noktalarının yanına günlük ışıınım şiddeti EKO MS-802 Piranometre ile ölçülmektedir. Dataloggerın ölçüm kanalının birinde Piranometre'den ölçülen günlük ışıınım şiddetinin bağlantısı bulunmaktadır.



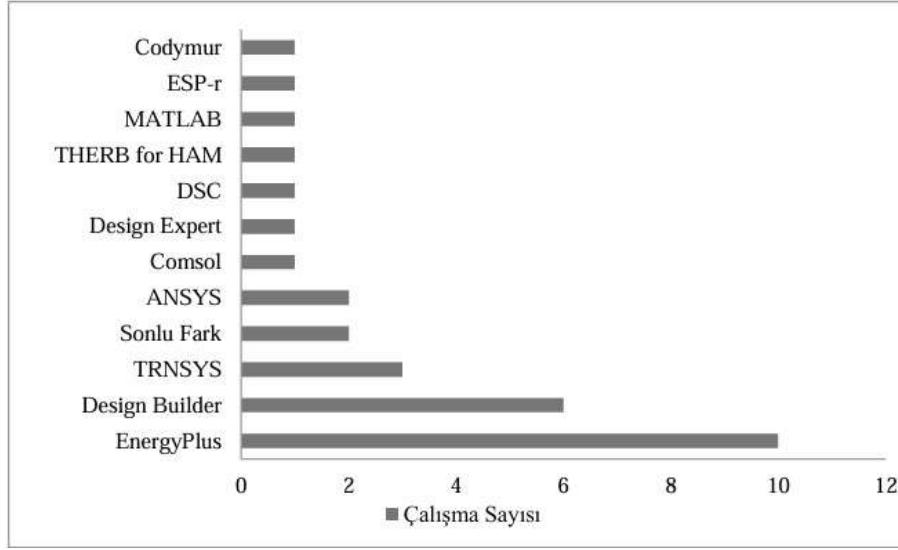
Şekil 3.8. Hioki LR8450 Datalogger (1), Datalogger'ın sürekli çalışması için pano ve elektrik hat düzenlemesi (2).

### 3.4. Bina Enerji Performans Analizi

Bu bölümde, Deneysel çalışma sonucu performansı en yüksek çıkan SYM-FDM duvar uygulamasının simülasyon programında referans konut binasının cephesine uygulanması ile yapı ölçeğinde performans analizlerinin yapılmasına odaklanmıştır. Bunun için bu bölümdeki çalışmalar sırasıyla, analiz programının seçilmesi, referans konut binasının belirlenmesi ve simülasyon ayarlarının yapılması iş adımları ile tamamlanmıştır.

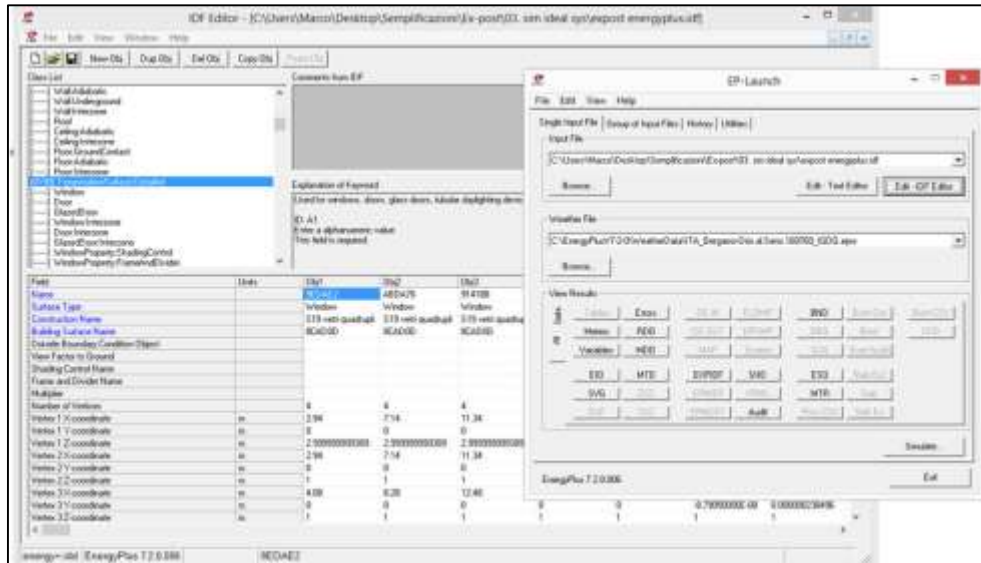
#### 3.4.1. Bina enerji simülasyon programının seçimi

Faz değiştiren malzeme entegreli duvar sisteminin analizi için kullanılacak simülasyon programı belirlemek için önceki çalışmalar analiz edilmiştir. Çalışmalarda kullanılan enerji simülasyon programları ve kullanım yoğunlukları incelendiğinde FDM entegre bina simülasyonlarında EnergyPlus' ın en fazla kullanılan enerji simülasyon programı olduğu görülmüştür (Fiorito, 2012; Guarino ve diğerleri, 2015; Ramakrishnan ve diğerleri, 2016; Han ve Taylor, 2015; Guarino ve diğerleri, 2015; Li ve diğerleri, 2015; Alama ve diğerleri, 2016; Pisello ve diğerleri, 2015; Soudian ve Berardi, 2017; Evola ve diğerleri, 2013). İkinci sırada yine EnergyPlus tabanlı bir yazılım aracı olan DesignBuilder (Karaoulis, 2017; Nazi ve diğerleri, 2017; Auzeby ve diğerleri, 2017; Köse ve Manioğlu, 2018; Bejan ve Catalina, 2016; Sajjadian ve diğerleri, 215), üçüncü sırada ise TRNSYS (Panayiotou ve diğerleri, 2016; Meng ve diğerleri, 2017; Liv d., 2019) yer almaktadır (Şekil 3.9).



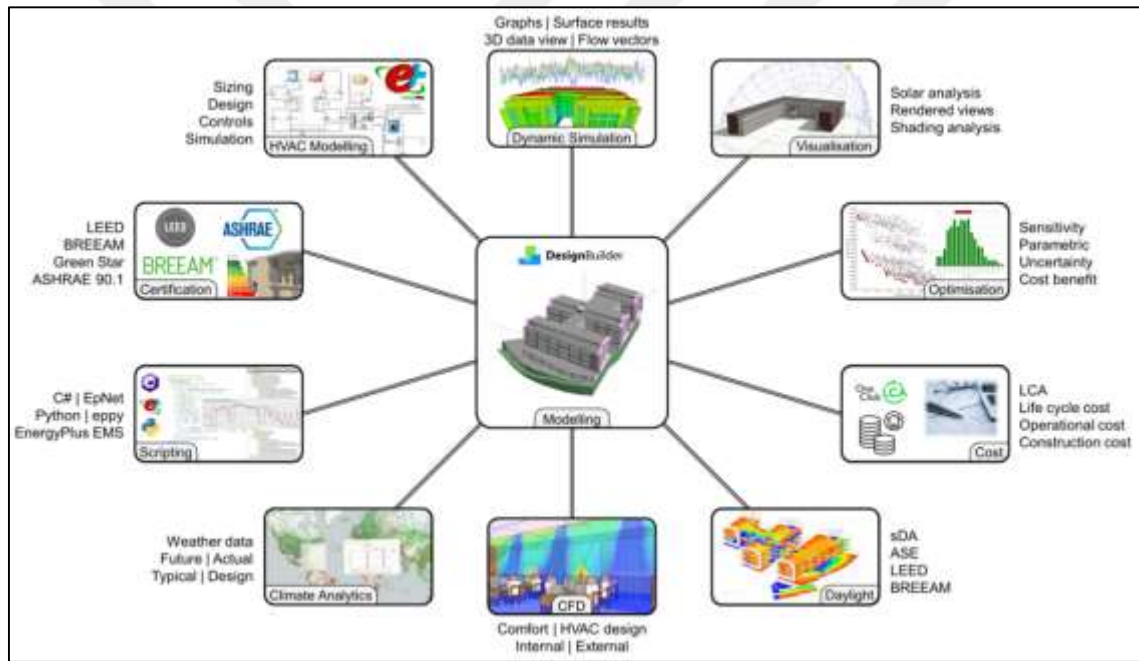
Şekil 3.9. FDM entegreli bina simülasyon çalışmalarında en çok tercih edilen programlar (Saylam Canım, 2022)

EnergyPlus, A.B.D. Enerji Bakanlığı (DOE-EERE, 2014) tarafından desteklenip, sunulan, açık kaynak kodlu, ücretsiz bir enerji etkinliği değerlendirme aracıdır (Şekil 3.10). Kapsamlı bina tasarım seçenekleri sayesinde bina enerji çalışmaları için güçlü ve ideal bir programdır. Çeşitli sistemlerden oluşan binaların ısıtılması ve soğutulması için gerekli enerji hesaplamalarını gerçekleştirmek için birlikte çalışan birçok program modülünün toplamından oluşmaktadır. EnergyPlus ile modüler sistemler, ısıl denge amacı ile kullanılan yeşil kabuk sistemler, fotovoltaik sistemler ve su bulunduran sistemler gibi birçok yeni sistemlerin simülasyonları yapılabilmektedir.



Şekil 3.10. Energy Plus kullanıcı arayüzü (Picco, 2014).

DesignBuilder ise yapı tasarımlarının enerji, karbon, aydınlatma ve konfor açılarından performansını ölçmek ve kontrol etmek için geliştirilmiş EnergyPlus simülasyon motorunu kullanan bir yazılım aracıdır (Url-6). DesignBuilder EnergyPlus dinamik termal simülasyon motoruna grafiksel arayüz oluşturan ilk ve en kapsamlı programdır. Bu grafiksel arayüzü sayesinde binalar tasarımlarının, enerji performanslarının irdelenmesine destek olmak amacıyla 3 boyutlu olarak görüntülenmesine olanak sağlamaktadır. DesignBuilder programının EnergyPlus simülasyon motorunu kullanıyor olması ve arayüzünün daha kullanıcı dostu olması ayrıca birçok bilimsel çalışmada kullanılmasının geçerliliğini ve güvenilirliğini desteklemesi nedeniyle çalışmada kullanılacak simülasyon aracı olarak seçilmiştir (Şekil 3.11).



Şekil 3.11. DesignBuilder programının çok fonksiyonlu analiz şeması (DesignBuilder)

### 3.4.2. Referans konut binasının seçimi

Simülasyon için modellenecek olan referans konut binası, Toplu Konut İdaresinin Türkiye'nin her ilinde konut binası inşa etmesi nedeniyle; Ankara TOKİ Turkuaz Vadisi Projesinin 2+1, 85 m<sup>2</sup> brüt daire alanına sahip olan CK Tipi kat planı kullanılmıştır (Şekil 3.12). Konutta; salon, açık mutfak ve iki yatak odası bulunmaktadır. Güney cephesinde salon, mutfak ve yatak odası; doğu cephesinde ebeveyn yatak odası ve çocuk yatak odası, kuzey cephesinde ebeveyn yatak odası, banyo ve tuvalet, doğu cephesinde ise giriş ve

mutfak bulunmaktadır. Referans konut binası 14 katlı olup her katında aynı plan yapısında dört daire bulunmaktadır ancak performans analizleri bir daire üzerinden yapılacaktır.



Şekil 3.12. Simülasyon aracı ile test edilecek konut binası planı

Simülasyon programında modellenecek olan referans konut binasının bina kabuğu bileşenlerinde kullanılacak malzemeler TOKİ inşaat mahal listesi dikkate alınarak belirlenmiştir. Modellenen konut binasında kullanılan malzemeler ve özellikleri Çizelge 3.8’ da verilmiştir.

Çizelge 3.8. Referans konut binasının, yapı kabuğu bileşenlerinin fiziksel ve boyutsal özellikleri

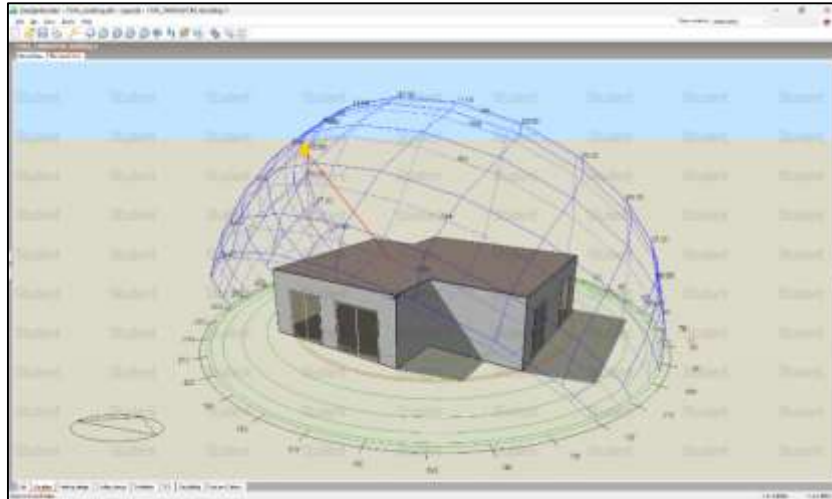
|       |                     | d (mm) | k [W/mK] | U [W/m²K] |
|-------|---------------------|--------|----------|-----------|
| ÇATI  | Çakıl               | 50     | 0,36     | 0,335     |
|       | Keçe                | 10     | 0,05     |           |
|       | Su Yalıtımı         | 13     | 0,027    |           |
|       | Eğim Betonu         | 50     | 0,16     |           |
|       | XPS Isı Yalıtımı    | 70     | 0,034    |           |
|       | B.A Döşeme          | 120    | 2,5      |           |
|       | Alçı Sıva           | 0,25   | 0,25     |           |
| DUVAR | Dış sıva            | 20     | 1        | 0,455     |
|       | XPS ısı yalıtımı    | 50     | 0,034    |           |
|       | Düşey delikli tuğla | 290    | 0,40     |           |
|       | Alçı Sıva           | 20     | 0,04     |           |

Çizelge 3.8. (devam) Referans konut binasının, yapı kabuğu bileşenlerinin fiziksel ve boyutsal özellikleri

|               |                  |     |       |       |
|---------------|------------------|-----|-------|-------|
| SYM-FDM DUVAR | Cam              | 4   | 0,96  | 0,155 |
|               | Granül Aerogel   | 16  | 0,012 |       |
|               | Hava             | 100 | 0,025 |       |
|               | Sıva             | 20  | 0,4   |       |
|               | Harman Tuğla     | 120 | 0,32  |       |
|               | RT18HC           | 80  | 0,2   |       |
|               | RT22HC           | 80  | 0,2   |       |
|               |                  |     |       |       |
| ZEMİN         | Ahşap parke      | 20  | 0,14  | 0,202 |
|               | Koruma betonu    | 50  | 0,16  |       |
|               | XPS ısı yalıtımı | 70  | 0,034 |       |
|               | Eğim betonu      | 50  | 0,16  |       |
|               | Su yalıtımı      | 13  | 0,027 |       |
|               | Grobeton         | 100 | 0,16  |       |
|               | Blokaj           | 150 | 0,36  |       |
|               |                  |     |       |       |
| PENCERE       | Cam + hava+Cam   | 24  | -     | 2,715 |
|               | PVC Doğrama      | -   | -     | 2,155 |

### 3.4.3. Referans konut binasının modellenmesi ve simülasyon ayarlarının yapılması

Simülasyon için oluşturulacak modelin çeşitli dış çevre faktörlerinden etkilenmeyip kendi performansını gerçekleştirebilmesi için, dört tarafı da gölgelenmeyen ve eğimsiz bir arazide yer şekilde modellenmesi yapılmıştır (Şekil 3.13).

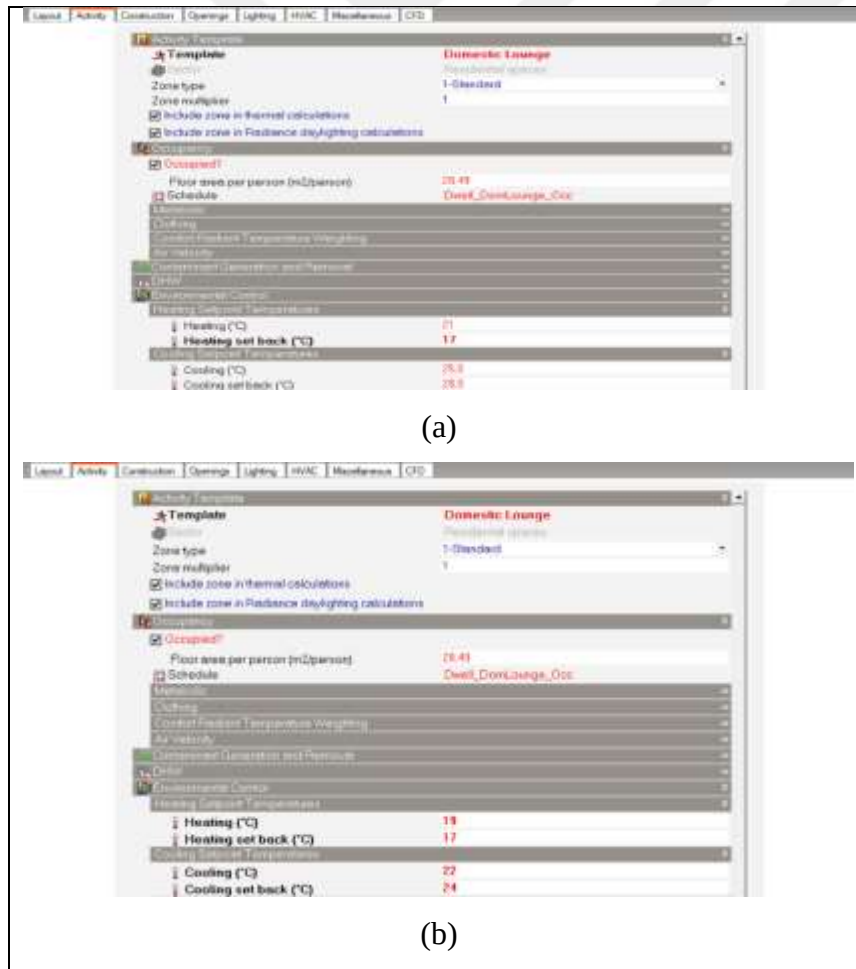


Şekil 3.13. Referans konut binasının modeli

Analizlerde öngörülen kabul ve sınırlılıklar; ısıtma ve soğutma yüklerine etkisini görebilmek için konutta soğutma döneminde basit HVAC sistemi ile elektrik enerjisinin ısıtma döneminde doğal gaz enerjisi kullanan kombi sisteminin kullanıldığı, mekanik havalandırma kullanılmadığı varsayılmıştır. Konutta iç ısı kazancını etkileyen faktör olarak 3 kişilik bir

ailenin yaşadığı varsayılmıştır. İç ortam sıcaklığı ısıtma dönemi için 21°C, soğutma dönemi için 24°C olarak kabul edilmiştir. SYM-FDM duvarı ortalama ışınsal sıcaklığın köşe etkisinden dolayı performansının etkilenmemesi için uygulandığı cephenin orta noktasına merkezlenerek konumlandırılmıştır.

Faz değiştiren malzemenin enerji yüküne etkisini analiz edebilmek için ısıtma ve soğutma için kullanılacak sistemlerin sıcaklık aralığını doğru belirlemek önemlidir. Bu nedenle konutun ısıtma döneminde 17°C ve 21°C aralığında ısıtıldığı, soğutma döneminde ise 25°C ve 28°C sıcaklık aralığında soğutulduğu kabul edilmiştir. FDM'in entegre edildiği cephedeki hacmin ısıtma sıcaklık aralığı 17°C-19°C, soğutma sıcaklık ayarı ise 22°C- 24°C aralığına ayarlanarak iç ortam sıcaklığının FDM'in çalışmasını olumsuz etkilemesinin önüne geçilmiştir (Şekil 3.14).



Şekil 3.14. (a) Standart duvarlı hacmin ısıtma-soğutma dönemi mekanik sistemin çalışma sıcaklığı, (b) SYM-FDM duvarının bulunduğu hacmin ısıtma-soğutma dönemi mekanik sistemin çalışma sıcaklığı

Konut sakinlerinin ihtiyaçlarını karşılayabilmesi için yapıda bulunan ekipmanlar hacmin fonksiyonuna uygun şekilde aktif hale getirilmiş ve belirli bir programda çalışarak ısı yayılımı yapmaları sağlanmıştır. Bu sayede hesaplanan ısıtma-soğutma yükünün gerçekçi değere yakın olması için iç ısı kazancının da etkisi hesaplanmıştır. Analizde basit HVAC sistemi seçilmiş olup ideal yüklerin hesaplanması sağlanmıştır (Şekil 3.15).

The screenshot shows the 'Model Options' dialog box with the following settings:

- Construction and Glazing Data:**
  - Construction and glazing data: General
  - Multi-state electrochromic control method: 1-Sensor groups
- Gains Data:**
  - Gains data: Early
  - Gain definition level: 1-Globally in model options
  - Occupancy method: 2-Area per person
  - Occupancy latent gains: 1-Dynamic calculation
  - Equipment gain units: 1-Power density
  - Lighting gain units: 2-Normalised power density
- Timing:**
  - Timing: Schedules
  - Internal gains operate with occupancy: ☒
- HVAC:**
  - HVAC: Simple
  - HVAC sizing: 3-Autosize
  - Simple HVAC autosize method: 1-EnergyPlus
  - Specify Simple/Design HVAC details: ☒
  - Auxiliary energy calculations: 2-Separate fans and pumps
  - Mechanical ventilation method: 2-Ideal loads
- Natural Ventilation and Infiltration:**
  - Natural ventilation: Scheduled
  - Infiltration units: 1-ac/h
  - Imported Surfaces: ☒
  - Shade surfaces: ☒

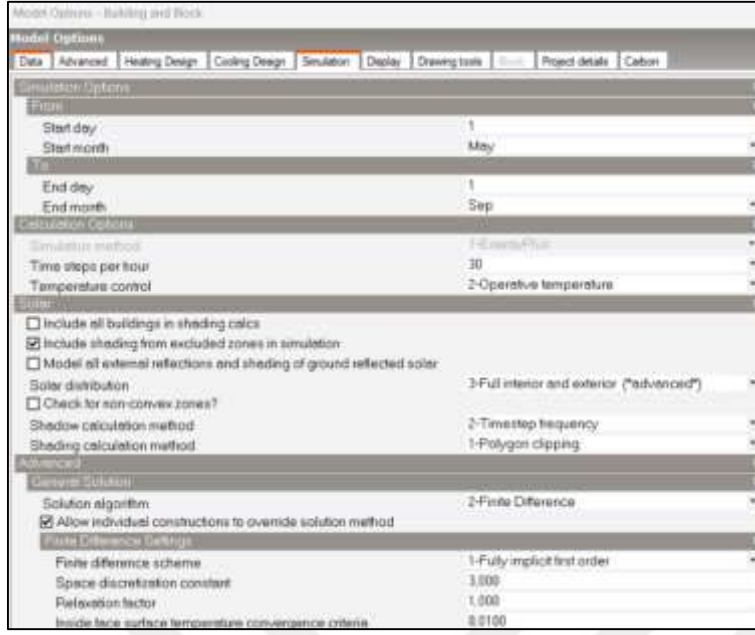
Şekil 3.15. HVAC sistemi ile ilgili programda kabul edilen ayarlar

HVAC sistemi ayalarında, ısıtma sistemi performans katsayısı Türkiye'de evsel doğalgaz tüketicileri tarafından kullanılan cihazların ortalama yanma verimi 0,85 değeri (Url-7), soğutma sistemi için elektrikli soğutma sistemlerinde ortalama enerji verimliliği performans katsayısı olarak kabul edilen 3 değeri (Mangan ve Oral, 2016) alınmıştır. HVAC sistemi enerji kaybı olmadan %100 verimle çalışır kabul edilmiştir (Şekil 3.16).



Şekil 3.16. Simülasyonun HVAC ayarları

Simülasyonda enerji ve sıcaklık alanlarının zamana bağlı çözümü için EnergyPlus'ın çözüm motoru olarak Sonlu Farklar yöntemi seçilmiştir. Bu yöntem, diferansiyel ısı transfer denklemlerinin sayısal olarak çözülmesini sağlar ve özellikle faz değiştiren malzemeler (FDM) gibi yüksek ısısal kütleli ve geçici davranış gösteren yapı bileşenlerinin modellenmesinde tercih edilmektedir. Uygulamada, çözüm stabilitesini ve doğruluğunu dengelemek amacıyla "Fully Implicit First Order" şeması kullanılmıştır. Bu yaklaşım, her zaman adımında denklemlerin ileriye dönük tahmini yerine geriye dönük çözümle hesaplandığı, dolayısıyla daha kararlı sonuçlar verdiği bilinen bir yöntemdir. Ayrıca, çözüm hassasiyetini kontrol eden relaksasyon katsayısı 1,00 uzay ayrıştırma sabiti 3,00 ve iç yüzey sıcaklığı yakınsama kriteri 0,010 değerleri alınarak bu parametreler de EnergyPlus varsayılanlarına uygun olarak belirlenmiştir. Bu sayısal çözüm yaklaşımı, özellikle FDM içeren duvar sistemlerinde, sıcaklık salınımlarını ve faz geçişlerini doğru şekilde çözmek amacıyla yapılandırılmıştır (Şekil 3.17).



Şekil 3.17. Simülasyon genel çözüm algoritması ayarları

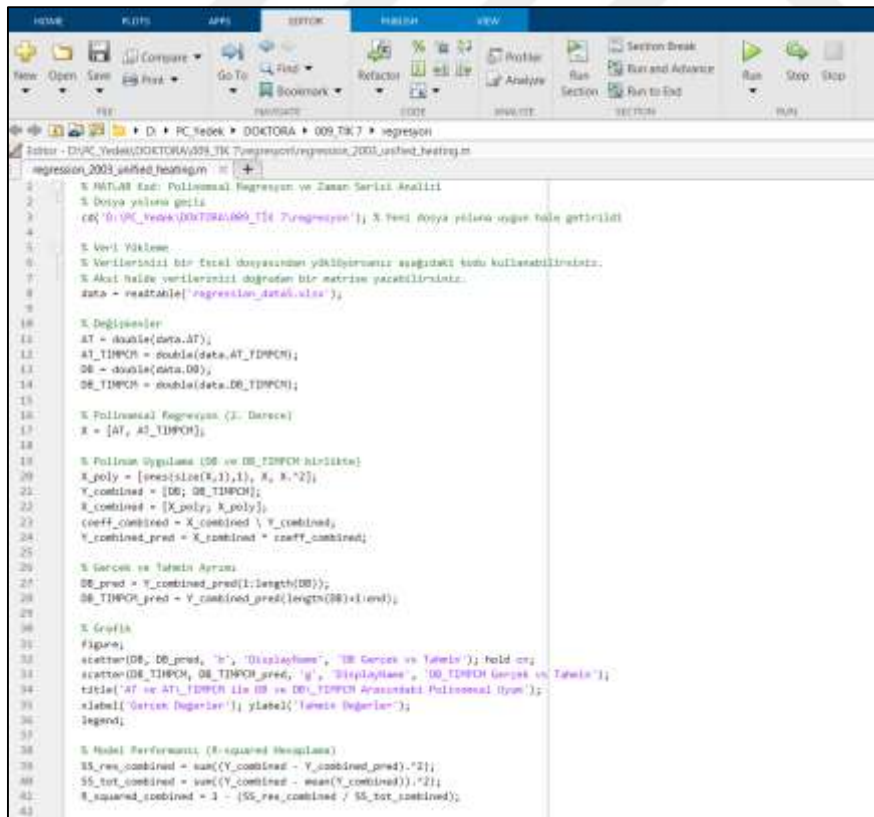
Simülasyonda hem ısıtma hem soğutma hem de yıllık hesaplamalar için iç ve dış yüzey konveksiyon algoritması olarak “AdaptiveConvectionAlgorithm” tercih edilmiştir (Şekil 3.18). Bu yaklaşım, FDM içeren duvar sistemlerinde yüzey sıcaklıklarının dinamik değişimini doğru şekilde yansıtmakta hem serbest hem zorlanmış konveksiyon etkilerini kapsayarak FDM’nin termal tepki süresini ve enerji alışveriş kapasitesini daha gerçekçi şekilde modellemektedir.



Şekil 3.18. Isıtma ve Soğutma analizleri için iç yüzey ve dış yüzey konveksiyon ayarları

Simülasyon ayarlarının tamamlanması ile performans analizi için gerekli hazırlıklar tamamlanmıştır. Simülasyon çalışmaları deneysel çalışmanın gerçekleştirildiği zaman aralıkları için yapılmıştır. Isıtma dönemi analizleri için aralık, ocak, şubat aylarına, soğutma dönemi analizleri için haziran, temmuz, ağustos aylarına ait enerji yükü, radyant ve operatif sıcaklıklar analiz edilmiştir.

Simülasyon çalışmasının doğrulunun saptanması için deneysel çalışmadan elde edilen gerçek zamanlı ölçüm sonuçları ile arasındaki benzeşim oranı MATLAB programında yapılan regresyon analizi sonucunda elde edilen polinomsal uyum ile bulunmuştur (Şekil 3.19). İki değişken arasındaki ilişkinin veya birden çok değişken arasındaki ilişkinin incelendiği çalışmalar analiz edildiğinde de sıklıkla regresyon analizi yönteminin tercih edildiği görülmektedir (Kheiri, F. 2018; Evins, 2013; Griego ve diğerleri, 2012; Machairas ve diğerleri, 2014; Liang, 2017). Regresyon analizi bağımlı değişken ile bir veya daha çok bağımsız değişken arasındaki ilişkiyi incelemek amacıyla kullanılan bir analiz yöntemidir (Kheiri, F. 2018).



```

1 % MATLAB End: Polynomial Regression ve Zaman Serisi Analizi
2 % Dosya yolumu girin
3 cd('D:\PC\Hedek\DOKTORA\009_TK7\regresyon'); % Teori dosya yolumu doğru buldu getirildi
4
5 % Veri Yükleme
6 % Verilerinizi bir excel dosyasından yükleyebilirsiniz aşağıdaki kodu kullanabilirsiniz.
7 % Aksi halde verilerinizi doğrudan bir matrisle yazabilirsiniz.
8 data = readtable('regresyon_data.xlsx');
9
10 % Değişkenler
11 AT = double(data.AT);
12 AT_T1MPCH = double(data.AT_T1MPCH);
13 DB = double(data.DB);
14 DB_T1MPCH = double(data.DB_T1MPCH);
15
16 % Polynomial Regression (2. Derece)
17 R = [AT, AT_T1MPCH];
18
19 % Polinom Uygulama (DB ve DB_T1MPCH ile ilgili)
20 R_poly = [ones(size(R,1),1), R, R.^2];
21 Y_combined = [DB; DB_T1MPCH];
22 R_combined = [R_poly; R_poly];
23 coeff_combined = R_combined \ Y_combined;
24 Y_combined_pred = R_combined * coeff_combined;
25
26 % Gerçek ve Tahmin Ayrımı
27 DB_pred = Y_combined_pred(1:length(DB));
28 DB_T1MPCH_pred = Y_combined_pred(length(DB)+1:end);
29
30 % Grafik
31 figure;
32 scatter(DB, DB_pred, 'b', 'Displayname', 'DB Gerçek ve Tahmin'); hold on;
33 scatter(DB_T1MPCH, DB_T1MPCH_pred, 'g', 'Displayname', 'DB_T1MPCH Gerçek ve Tahmin');
34 title('AT ve AT_T1MPCH ile DB ve DB_T1MPCH Arasındaki Polynomial İlişim');
35 xlabel('Gerçek Değerler'); ylabel('Tahmin Değerler');
36 legend;
37
38 % Model Performansı (R-squared hesaplama)
39 SS_res_combined = sum((Y_combined - Y_combined_pred).^2);
40 SS_tot_combined = sum((Y_combined - mean(Y_combined)).^2);
41 R_squared_combined = 1 - (SS_res_combined / SS_tot_combined);
42

```

Şekil 3.19. Regresyon analizinin yapıldığı MATLAB kodu

Regresyon analizinde, SYM-FDM duvarı bileşeni olan Faz değiştiren malzemenin hava sıcaklığına bağlı olarak çalışır olma durumu değiştiği için deneysel çalışmadan edinilen hava sıcaklığı verisi ve duvar iç yüzey sıcaklığı verisi, DesignBuilder'dan edinilen hava sıcaklığı verisi ve duvar iç yüzey sıcaklık verisi karşılaştırıldı. Analizin gerçekleştirilmesi için bağımlı ve bağımsız değişkenler belirlendi. Regresyon analizinde bağımsız değişken, modelin girdisidir ve bağımlı değişken, bu girdiye göre tahmin edilen çıktıdır. Bu durumda Gerçek sıcaklık verisi DÇ (Deney çalışma), Meteonorm'un tahmin ettiği DB (DesignBuilder) verisinin doğruluğunu kontrol etmek için referans alınır (Çizelge 3.9).

Çizelge 3. 9. Regresyon analizi girdileri ve açıklaması

| Değişken Türü             | Veri | Açıklama                                                                                                                         |
|---------------------------|------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Bağımsız Değişken (Girdi) | DÇ   | Doğru referans verisi olarak kabul edilir. Bu veri, dış etkenlere bağlı olarak ölçülmüş gerçek sıcaklık değerlerini temsil eder. |
| Bağımlı değişken (Çıktı)  | DB   | DÇ'ye göre tahmin edilen veya hesaplanan bir çıktıdır. Yani, DB verisinin doğruluğu, DÇ verisi ile olan uyumuna bağlıdır.        |

Bu kabuller çerçevesinde, referans konut binasının pencere duvar oranı sabit tutulmuş standart duvar ile SYM-FDM duvarı oranı %100- %20 aralığında değiştirilerek her cephe için analizler gerçekleştirilmiştir. SYM-FDM duvarının yönlerle bağlı performans etkisini gözlemek için analizi yapılan cephe dışındaki diğer üç cephenin pencere duvar oranı sabit tutulmuştur.

### 3.5. SYM-FDM Duvarının Performans ve Maliyet Bağlamında Optimizasyonu

Bu bölümde, saydam yalıtımlı duvar sisteminin yapı kabuğunda kullanımının optimum boyutlandırma ve maliyet etkinliği bağlamında optimizasyonun sağlanması için tasarım değişkenlerinin belirlenmesi amaçlanmaktadır. Belirlenecek olan tasarım değişkenleri ile duvar sisteminin yapı kabuğuna entegre edildiği referans konut binasının farklı mimari konfigürasyonu DesignBuilder simülasyon aracı ile test edilecektir. Tasarım değişkenlerini belirlemek üzere yapılan literatür çalışmasında; bina kabuğu, mekanik sistemler, bina formu ana başlıkları ve bu başlıkların altında tasarım değişken parametrelerinin tanımlandığı görülmüştür (Ahmad, 2002; Mardaljevic, 1999; Third-Party Graphical User Interfaces; 2017; Kim ve diğerleri, 2016; Url-9; Miller ve Goldberg, 1995; Hasan, A. 1999; Crabb ve diğerleri, 1987; Ouarghi ve Krarti, 2006; Conraud-Bianchi, 2008). Bu ana başlıkların alt parametreleri incelenmiş ve önerilen duvar sisteminin optimum boyutlandırma ve maliyet etkinliği bağlamında performans analizinin farklı mimari konfigürasyonlar ile yapılmasını

sağlayacak olan tasarım değişken parametreleri belirlenmiştir. Belirlenen bu tasarım değişkenlerinden ilki pencere – duvar oranıdır. Bu çalışmada TOKI Turkuaz Konut Binasının CK tipi plan tipindeki pencere duvar oranı korunacaktır. Çalışmadaki duvar alanı SYM-FDM duvarı uygulanabilir alan olarak kabul edilecek ve SYM-FDM duvar alan yüzdesi %20’lik adımla %0’dan %100’e kadar incelenecektir. Binadaki optimum SYM-FDM duvar oranını belirlemek için çalışılan cephedeki öncelikle %20’lik alanında geliştirilen yenilikçi duvarın uygulandığı kabul edilecek ardından o cephede duvar yüzdesi değiştirilerek ısıtma yükü, soğutma yükü, ortalama sıcaklık verileri her oran için elde edilecektir. Bu analiz sırasında çalışan cephede SYM-FDM duvar alanı belirlenen adımlarla değiştirilirken diğer üç cephe projedeki hali ile korunacaktır. Bunun sonucunda çalışılan cephedeki SYM-FDM duvar alanının binanın tümüne performans etkisi elde edilecektir. Böylece diğer bir tasarım değişkeni olan yönlenme parametresi için de referans verilmiş olacaktır.

Belirlenen bu tasarım değişken parametreleri ile SYM-FDM duvarının her cephedeki farklı oranları için bina enerji performansı ve maliyet etkinliğine dayalı veriler elde edilecektir. Verilerin kaydedildiği bu değişkenler arasındaki ilişki Asgari–Azami Normalleştirilmesi (min. – maks. normalizasyonu) ile kurulacaktır. Bu yöntem ile verilerin içindeki en düşük ve en yüksek değerler belirlenir, diğer veriler bu değerlere göre normalleştirilir (Han ve diğerleri, 2012). Yöntemin amacı en düşük değeri 0, en büyük değeri ise 1 kabul ederek diğer tüm verileri 0-1 aralığına yerleştirmek ve ortak bir sayı sisteminde verileri karşılaştırmaktır (Eş. 3.24).

$$X_{\text{normal}} = \frac{X - X_{\text{min.}}}{X_{\text{mak.}} - X_{\text{min.}}} \quad (3.24)$$

Normalize edilen değerler grafik üzerinden karşılaştırılacaktır. Grafik üzerinde iki eğrinin çakıştığı nokta duvarın ilgili cephede uygulanması için belirlenen optimum değer veya değer aralığı olarak kabul edilecektir.

### 3.5.1. Ekonomik değerlendirme

Duvar sisteminin yapılarda iyi nitelikli olarak uygulanması; sistemlerin yüksek verimle çalışmasına, mimariyle ilişkinin sağlanmasına ve ekonomik olarak yapılabilir olmasına

bağlıdır. Bu nedenle uygulayıcının ve tasarımcının bilgi sahibi olmak isteyeceği bir diğer konu ise geri ödeme süresi ile ilgili yapılacak bilgilenmedir. Geri ödeme süresi hesabı ile yapılan analiz, teknik ekonomik analiz çalışmalarında (Kong ve diğerleri, 2014; Zwanzig ve diğerleri, 2013; Becker, 2014; Sajjadian ve diğerleri, 2015) yaygın olarak kullanılan yöntemlerden biridir. Bu yöntemde herhangi bir oran kıyaslanmasına girilmez ve maliyetin tamamlanıp, kazanca geçileceği zaman aralığına bakılır (Biezma ve San Cristobal, 2006). Bunun için öncelikle yıllık enerji maliyetinin tespit edilmesi gerekmektedir. Yıllık enerji maliyeti SYM-FDM duvarının her cephedeki bulunma oranına göre ayrı ayrı hesaplanacaktır.

Yıllık enerji maliyeti  $C_y$  (\$), yıllık ısıtma enerjisi maliyeti  $C_h$  (\$) ve yıllık soğutma enerjisi maliyetinin  $C_c$  (\$) toplamına eşittir.

$$C_y = C_h + C_c \quad (3.20)$$

Isıtma için yıllık enerji maliyeti ( $C_h$ ) Eş. 3.21 ile hesaplanmaktadır.

$$C_h = \frac{Q_{h,yıl}}{(H_u \times n_k)} \times C_f \quad (3.21)$$

$C_f$  yakıt birim fiyatı (\$/m<sup>3</sup>),  $H_u$  (kWh/m<sup>3</sup>) kullanılan yakıtın alt ısı değeri ve  $n_k$  ısıtma sisteminin verimidir. Bu hesaplamalarda kullanılan yakıtın birim fiyatı ve alt ısı değeri BOTAŞ (2022) verilerinden elde edilecektir. Soğutma için yıllık enerji maliyeti ( $C_c$ ) Eş. 3.22 ile hesaplanmaktadır

$$C_c = \frac{Q_{c,yıl}}{COP} \times C_e \quad (3.22)$$

$C_e$  elektrik birim fiyatı (\$/kWh) TÜİK verilerinden ve soğutma sisteminin performans katsayısı (COP) değeri Mangan ve Oral'ın (2016) yaptığı çalışmadan alınacaktır.

Saydam yalıtımlı gizli ısı depolama duvarının maliyetini firmadan alınan birim fiyat bilgisi ile kullanım alanı çarpımıyla elde edilecek olup  $C_{SYM-FDM\ DUVAR}$  (\$/m<sup>2</sup>) sonuç olarak, enerji maliyeti ve SYM-FDM duvar maliyeti ve standart duvar maliyetinden elde edilen toplam maliyet  $C_T$  (\$/m<sup>2</sup>) Eş. 3.23 ile hesaplanmaktadır.

$$C_T = (C_h + C_c) + C_{SYM-FDM\ DUVAR} \quad (3.23)$$

Burada; yıllık ısıtma maliyeti  $C_h$ , yıllık soğutma maliyeti  $C_c$ , önerilen duvar sisteminin maliyeti  $C_{SYM-FDM\ DUVAR}$  ile ifade edilecektir. Geri ödeme süresi (yıl); saydam yalıtımlı gizli ısı depolama duvarı maliyetinin  $C_{SYM-FDM\ DUVAR}$  (\$/m<sup>2</sup>), yıllık yakıt tasarrufuna bölünmesiyle hesaplanacaktır. Yıllık yakıt tasarrufu ( $C_{yyt}$ ), standart konut binasının yıllık enerji maliyetinden  $C_{sk}$  (\$/m<sup>2</sup>), saydam yalıtımlı gizli ısı depolama duvarı entegreli konut binasının yıllık enerji maliyetinin  $C_{dek}$  (\$/m<sup>2</sup>) çıkartılmasıyla elde edilecektir. Geri ödeme süresi Eş. 3.24 ve Eş. 3.25 ile hesaplanmaktadır.

$$C_{yyt} = C_{yo} - C_y \quad (3.24)$$

$$Geri\ Ödeme\ Süresi = \frac{C_{TIM-PCM\ DUVAR}}{C_{yyt}} \quad (3.25)$$

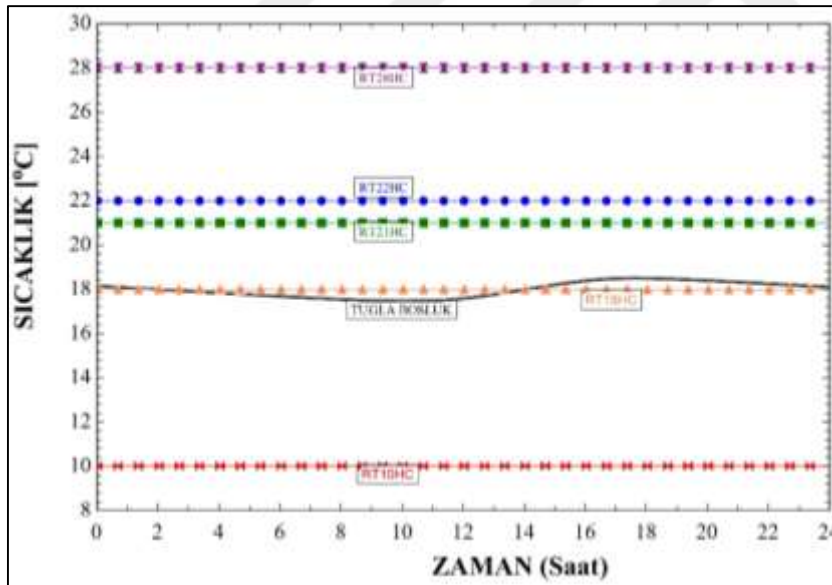
Saydam yalıtımlı gizli ısı depolama duvarının ekonomik değerlendirmesi için kullanılacak olan geri ödeme süresi metodu, yatırımın ne kadar uygulanabilir olacağını görme fırsatı sunacaktır.

## 4. BULGULAR VE TARTIŞMA

Çalışma kapsamında belirlenen araştırma sorularını cevaplamak ve objektif bir değerlendirme amacıyla, dört aşamada bulgular elde edilmiş, son aşama olarak da ortak paydaya alınıp karşılaştırması yapılmıştır. Bulgular alt başlıklar içerisinde detaylandırılmıştır.

### 4.1. Matematiksel Analiz

SYM-FDM duvarının ısıtma ve soğutma döneminde yüksek termal performans göstermesi, doğru FDM'nin seçilmesine bağlıdır. Bu nedenle öncelikle Ankara ilinin 21 Ocak ve 21 Temmuz tarihli meteoroloji verileri kullanılarak bu tarihlerdeki FDM'lerin hal değişim durumları MATLAB'de geliştirilen kod ile incelenmiştir. Farklı erime sıcaklığındaki FDM'lerin 21 Ocak tarihli ısıtma iklim koşulundaki davranışları Şekil 4.1'de gösterilmiştir.

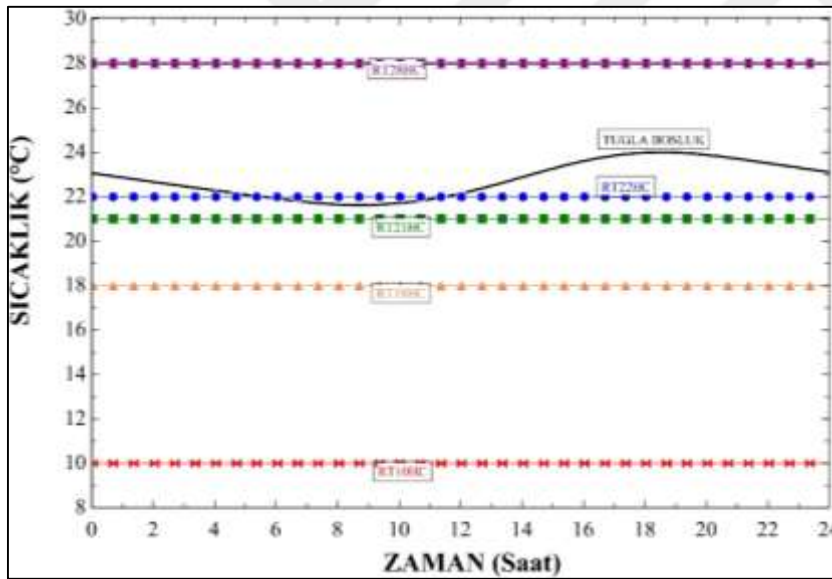


Şekil 4.1. Isıtma döneminde faz değiştiren malzemelerin (a) RT10HC, (b) RT18HC, (c) RT21HC, (d) RT22HC, (e) RT28HC faz değişim durumu.

Grafikte verilen “Tuğla Boşluk” eğrisi, FDM'nin entegre edileceği boşluğun orta noktasına denk gelen konum adımıdan alınan saatlik sıcaklık verisini ifade etmektedir. Farklı erime sıcaklığına sahip FDM'lerin erime sıcaklık eğrileri hal değişimi gösterdiği sıcaklıkları vermektedir. Grafikten yapılan okumada, tuğla boşluk sıcaklığı gün içerisinde 17°C ile 19°C arasında bir sıcaklık eğrisi çizmektedir. Bu durumda RT10HC malzemesinin bu sıcaklık

aralığında sürekli eriyik durumda olduğu ve hal değişimi göstermediği görülmektedir. RT21HC, RT22HC ve RT28HC malzemelerinin ise hücrenin gün içerisindeki sıcaklık aralığında faz değişimi göstermeyerek sürekli katı halde kaldığı görülmektedir. Tuğla boşluk sıcaklık eğrisinin düştüğü gece saatlerinde bölgenin sıcaklık eğrisinin RT18HC'nin sıcaklık eğrisi ile çakıştığı ve malzemenin çakıştığı noktada ortama sıcaklık vererek katı faza döndüğü, tuğla boşluk sıcaklığının yükseldiği saatlerde ise boşluğa ait eğrinin yine malzemenin sıcaklık çizgisi ile çakışarak endotermik bir süreç sonucunda sıvı faza döndüğü görülmektedir. Bu nedenle ısıtma dönemi performans analizi için RT18HC malzemesi seçilmiştir.

Soğutma dönemi için 21 Temmuz tarihindeki sıcaklık verileri ile yapılan analizde tuğla boşluğunun gün içerisinde saatlik ulaştığı sıcaklık eğrisini ve FDM'lerinin erime sıcaklık çizgileri olan ilişkisini gösteren grafik Şekil 4.2'de verilmiştir.



Şekil 4.2. Soğutma döneminde faz değiştiren malzemelerin (a) RT10HC, (b) RT18HC, (c) RT21HC, (d) RT22HC, (e) RT28HC faz değişim durumu.

Grafikte, faz değiştiren malzemenin gömüleceği boşluğun orta noktasından alınan sıcaklık verisi tuğla boşluk eğrisi ile gösterilmiştir. Grafik eğrilerine göre, tuğla boşluk sıcaklığı gün içerisinde 21,5°C ile 25°C aralığında değişim göstermektedir. RT10HC, RT18HC ve RT21HC bu sıcaklık aralığında hal değişimi göstermeyerek sürekli sıvı fazda kaldığı görülmektedir. RT28HC ise sürekli kat fazda kalarak hal değişimi göstermemiştir. Modül sıcaklık eğrisi ile RT22HC'nin erime sıcaklığı eğrisinin ilişkisi incelendiğinde iki eğrisinin

sabaha karşı sıcaklığın düştüğü saatte çakıştığı ve RT22HC'nin bu zaman aralığında hal değiştirerek katı faza geçtiği ve ortama ısı yaydığı görülmektedir. Sıcaklığın yükseldiği öğlen saatlerinde ise tuğla boşluk sıcaklık eğrisi ile RT22HC çizgisi tekrar çakışmaktadır. Bu zaman aralığında da RT22HC hal değiştirerek sıvı faza geçtiği grafik üzerinden yorumlanmaktadır. Bu nedenle 21 Temmuz soğutma dönemi analizleri için RT22HC malzemesi duvar sisteminde kullanılmak üzere seçilmiştir.

SYM-FDM duvarında kullanılacak malzemelerin kararı matematiksel analiz sonucunda elde edilen veriler dikkate alınarak tamamlanmıştır. Bu analizler sonucunda ısıtma ve soğutma döneminde iki farklı malzemenin performans göstermesi SYM-FDM duvar sisteminin tasarımını doğrudan etkilemiştir. Deneysel çalışmada inşa edilecek SYM-FDM duvar sistemi dıştan içeri doğru, granül aerjel dolgulu pencere sistemi, hava boşluğu, R1 tipi makrokapsüllü RT18HC ve RT22HC malzemelerinin entegre edildiği harman tuğlaların aynı oranda örülmesi ile oluşturulan termal depolama duvarı olacak şekilde tasarımı tamamlanmıştır.

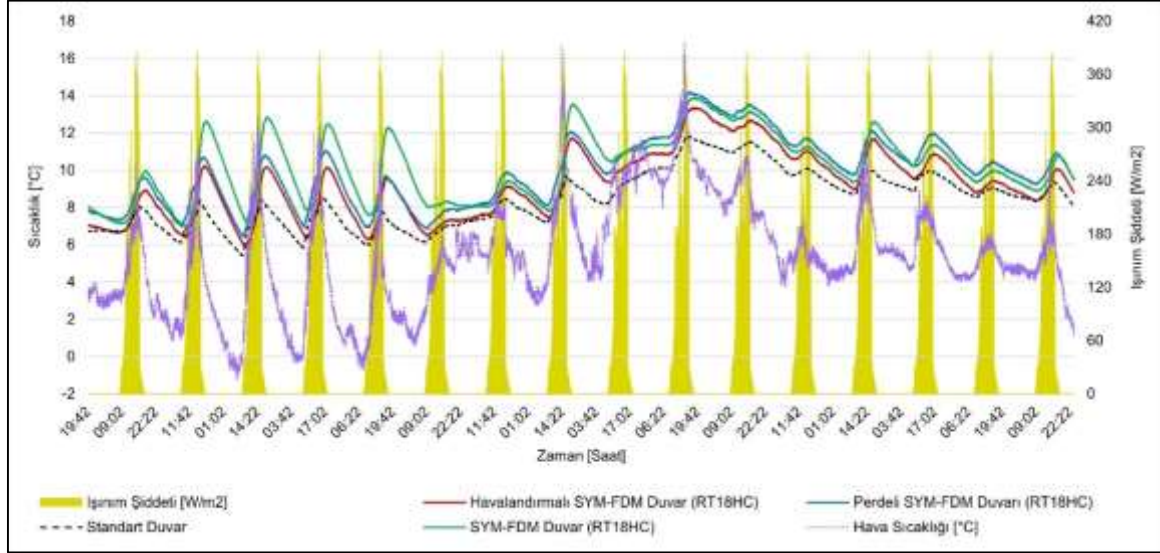
## 4.2. Deneysel Çalışma

Bu bölümde güney duvarına farklı uygulama tipinde SYM-FDM duvarı entegre edilen üç deney ünitesi ve dört cephesinde de standart duvar bulunan deney ünitesi olmak üzere toplamda 4 deney ünitesinden belirlenen noktalardan alınan sıcaklık verilerinin analizine odaklanılmıştır. Farklı uygulama tipindeki SYM-FDM duvarlarının yaz ve kış aylarında atmosferik koşullar etkisindeki ısı davranışlarının belirlenmesi amacıyla deneysel ölçümler yapılmıştır. Ölçümler, iç mekânlarda ek ısıtmanın istendiği Aralık, Ocak, Şubat aylarını ve ek soğutmanın istendiği Temmuz, Ağustos aylarını kapsayan toplamda 6 aylık dönemi kapsamaktadır.

### 4.2.1. Isıtma dönemi

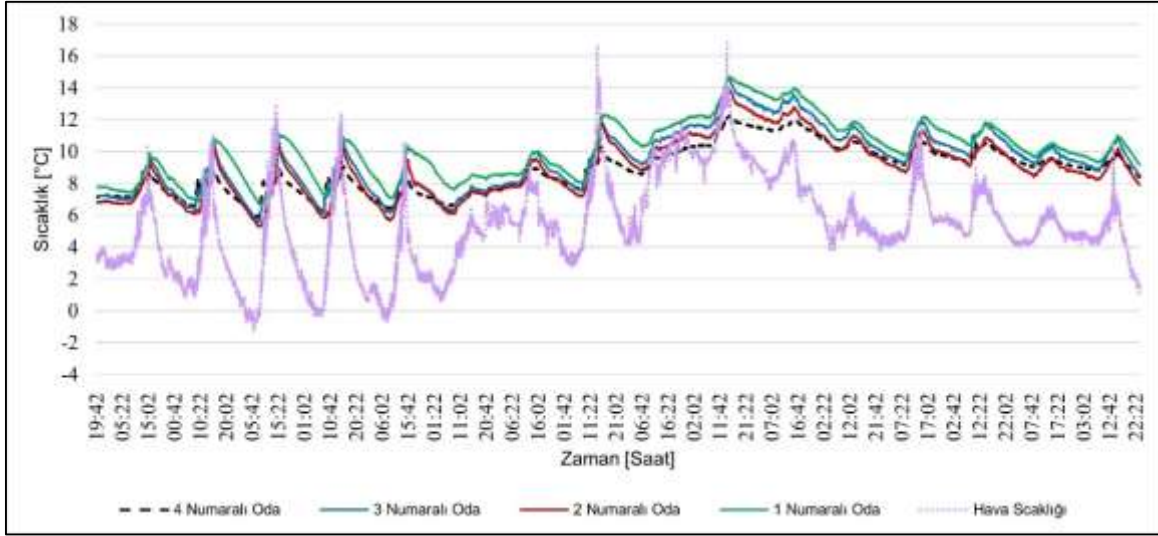
Isıtma döneminin başlangıcını temsil eden aralık ayında, güney cephesine farklı uygulama tiplerinde SYM-FDM duvarının entegre edildiği üç ayrı deney ünitesi ile tüm cepheleri opak yalıtımlı standart duvarlardan oluşan referans deney ünitesinden elde edilen gerçek zamanlı sıcaklık ölçüm verileri değerlendirilmiştir. Bu kapsamda, söz konusu dört deney ünitesinde belirlenen referans noktalar üzerinden elde edilen sıcaklık verileri, SYM-FDM

uygulamasının iç mekân termal profiline etkisini analiz etmek amacıyla elde edilen verilere ait hazırlanan grafikler Şekil 4.3'te sunulmaktadır.



Şekil 4.3. Aralık ayı duvar iç yüzey sıcaklığı, hava sıcaklığı ve ışıınım şiddeti gerçek zamanlı ölçüm verileri

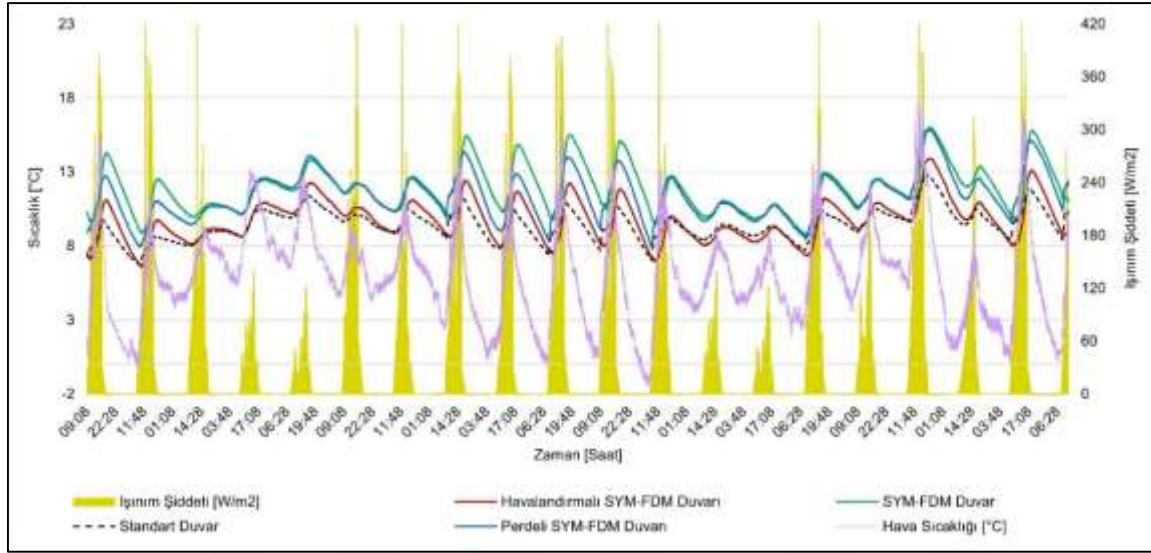
Şekil 4.3'te verilen grafik, 15.12.2024 – 31.12.2024 tarihleri arasında yapılan deneysel ölçümlerden elde edilen sıcaklık verileri sonucunda hazırlanmıştır. Aralık ayına ait deneysel çalışmada elde edilen zaman serisi grafiğinde güney cephesine farklı SYM-FDM uygulamaları entegre edilmiş üç deney ünitesi ile opak yalıtımlı standart duvara sahip referans deney ünitesinin iç yüzey sıcaklıkları, dış hava sıcaklığı ve güneş ışıınım şiddeti verileriyle birlikte sunulmaktadır. Grafik incelendiğinde, günlük ışıınım şiddetindeki artışla birlikte duvar iç yüzey sıcaklığının da yükseldiği görülmektedir. Farklı SYM-FDM duvar uygulamalarının entegre edildiği deney ünitelerinde referans deney ünitesine kıyasla daha yüksek iç yüzey sıcaklık değerleri ölçülmüştür. Bu durum özellikle havalandırmasız SYM-FDM duvarı ve perdeli SYM-FDM duvarında daha belirgin olarak öne çıkmaktadır. En yüksek sıcaklık profili 1 numaralı odada bulunan SYM-FDM duvar tipinde gözlenmiştir. Bunun nedeni, FDM entegreli duvar ünitesi ile saydam yalıtım ünitesinin arasındaki 2 cm durgun hava boşluğunun radyasyon etkisinden kazanılan ısının birikmesini sağlayarak duvar önü sıcaklığın diğer sistemlerden daha çok arttırdığı olarak yorumlanmıştır. Bunun sonucunda da FDM'nin çalışması olumlu etkilenmiş, en yüksek duvar iç yüzey sıcaklıkları kaydedilmiştir.



Şekil 4.4. Aralık ayında deney ünitelerinden gerçek zamanlı alınan ortalama radyant sıcaklık verileri

Aralık ayı boyunca elde edilen ortalama radyant sıcaklık verilerinden hazırlanan Şekil 4.4'teki grafik incelendiğinde, 1, 2 ve 3 numaralı deney ünitelerinin ortalama radyant sıcaklık değerlerinin 4 numaralı odanın değerlerinden daha yüksek olduğu ve dış hava sıcaklığındaki dalgalanmalara karşı daha sönümlenmiş bir tepki verdiği gözlemlenmiştir. Bu durum, faz değiştiren malzemenin termal kütle özelliği sayesinde gündüz saatlerinde gelen güneş ışınımını bünyesinde depolayarak iç mekâna gecikmeli ısı salınımı yoluyla katkı sağladığını göstermektedir. Özellikle 1 ve 3 numaralı odada ortalama radyant sıcaklık profillerinin gün boyunca diğer odalara göre daha istikrarlı ve yüksek düzeyde seyretmesi, FDM ile iç ortam arasındaki ısıl etkileşimin etkinliğini desteklemektedir. 1 numaralı deney ünitesindeki saydam yalıtım ünitesi FDM entegreli duvar arasındaki 2 cm durgun hava boşluğunun termal yastık gibi davranarak duvar önü sıcaklığı arttırmış ve FDM'nin çalışması desteklenmiştir. 2 numaralı odada gündüz güneş ışınlarını sisteme dahil edebilmek için perde açılmış, güneş ışığının etkisinin olmadığı saatlerde perde kapatılarak sistemin ısı transfer katsayısının düşmesi desteklenmiş, perde arkasında oluşan hava boşluğu ısı kayıplarını sınırlandırmıştır. Buna karşılık, 2 numaralı odada daha düşük radyant sıcaklık değerleri elde edilmiştir. Bu odaya entegre edilen SYM-FDM duvarı uygulamasında, gün içerisinde hava kanallarının açık tutulmasıyla boşluk içerisinde ısınan havanın içeriyle sürekli devinim içerisinde olmasından dolayı termal duvar önü sıcaklığın diğer uygulamalara göre daha düşük değerler ölçülmüştür. Güneş etkisinin olmadığı akşam saatlerinde hava kanallarının kapatılmasıyla hava boşluğu termal yastık görevi görmeye başlamıştır ancak gün termal duvar önü sıcaklığını FDM'yi aktive edecek sıcaklık değerlerine çekememiştir.

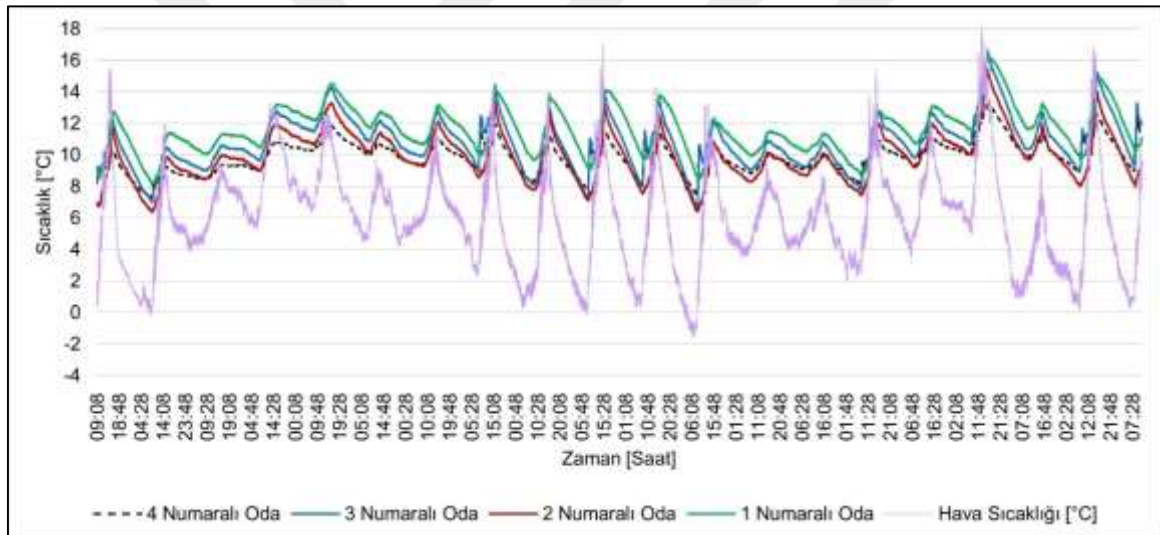
Bu nedenle de FDM performans göstermemiş ve iç ortam sıcaklığının artmasında diğer uygulamalara kıyas etkisi daha sınırlı olmuştur. Tüm uygulamalarla kıyaslandığında, standart duvarlı odada dış hava sıcaklığına daha ani ve geniş genlikli tepkiler gözlenmiştir. Bu durumda geleneksel yalıtım sistemlerinin iç mekânda termal dengeyi korumada daha yetersiz olduğunu ortaya koymuştur.



Şekil 4.5. Ocak ayı duvar iç yüzey sıcaklığı, hava sıcaklığı ve ısıtım şiddeti gerçek zamanlı ölçüm verileri

Şekil 4.5'te ocak ayına ait deneysel ölçüm verileri ile hazırlanan grafik verilmiştir. Ocak ayına ait ölçümler 10.01.2025 – 29.01.2025 tarihleri arasındaki zamansal süreçte alınmıştır. Grafik incelendiğinde, dış hava sıcaklıklarının  $-2^{\circ}\text{C}$ 'ye kadar düştüğü gece saatlerinde, havalandırılmalı SYM-FDM duvar iç yüzey sıcaklığı yaklaşık  $7^{\circ}\text{C}$ , perdeli SYM-FDM duvarında yaklaşık  $8^{\circ}\text{C}$  ve havalandırmaz SYM-FDM duvarında  $10^{\circ}\text{C}$  sıcaklık kaydedilmiştir. Aynı gün için standart duvardan alınan iç yüzey sıcaklık değeri  $6^{\circ}\text{C}$  olarak ölçülmüştür. Bu durum ölçüm alınan zaman aralığında sıcaklığın en düşük olduğu günde en iyi performans gösteren SYM-FDM duvarının standart duvara göre  $4^{\circ}\text{C}$  gibi ciddi bir fark gösterdiğini verilerle ortaya koymaktadır. Bu durum, havalandırmaz SYM-FDM duvarının dar ve durgun hava boşluğunda güneş etkisiyle ısınan havanın yalıtım ünitesinin etkisiyle gün içerisinde korunarak FDM'nin çalışmasını olumlu etkileyerek iç yüzey sıcaklıklarını arttırdığı şeklinde yorumlanmaktadır. En soğuk günde yüksek performans gösteren diğer bir duvar perdeli SYM-FDM duvarıdır. Perdeli SYM-FDM duvar uygulaması, gün içerisinde perde açık pozisyonda tutularak boşluktaki havanın ısınmasında etkili olur ve termal depolama duvarının dış yüzey sıcaklığını arttırmaktadır. Akşam saatlerinde kapalı

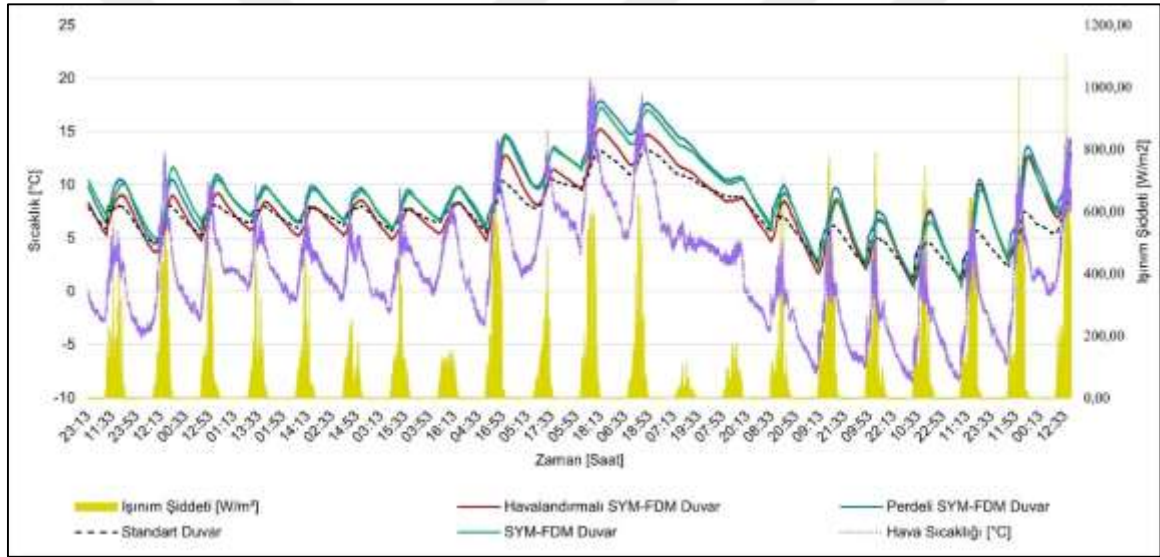
pozisyonda olan perde katman etkisiyle ısı transferini sınırlandırarak ve FDM'nin çalışmasını olumlu etkilemektedir. Havalandırılmalı SYM-FDM duvar ise, diğer sistemlere kıyasla daha düşük iç yüzey sıcaklıkları göstermektedir. Bu fark, gün içerisinde havalandırma kapakçıklarının açık olmasından dolayı hava boşluğundaki hava konveksiyon etkisiyle devinim içerisinde ve tuğlanın hava boşluğuna bakan yüzeyinin sıcaklık değerleri diğer SYM-FDM duvar uygulamalarına göre daha az ölçülmüştür. Güneş etkisinin olmadığı saatlerde hava kapakçıkları kapanmasıyla hava boşluğundaki sıcaklık durgun hava tabakasıyla korunmuştur. Bu döngü FDM'ye FDM'ye daha düşük sıcaklıkta ısıнын iletimini sağlamıştır. Bu nedenle de FDM'nin çalışmasını diğer uygulamalara kıyasla daha kısıtlı olarak aktive etmiş, performansı daha az iyileştirmiştir. Standart duvar uygulaması ise dış hava sıcaklık değişimlerine daha hızlı ve geniş genlikli tepkiler vermektedir.



Şekil 4.6. Ocak ayında deney ünitelerinden gerçek zamanlı alınan ortalama radyant sıcaklık verileri

Deney ünitelerin ocak ayına ait ortalama radyant sıcaklıkları Şekil 4.6'de grafik üzerindeki verilmiştir. Grafik verilerine göre, en düşük dış hava sıcaklığı -2 °C kaydedildiği günde ölçülen en yüksek ortalama sıcaklık 11°C değeri ile 1 numaralı oda olmuştur. Bu odaya entegre SYM-FDM duvarı, güneş ışınımının yüksek olduğu gündüz saatlerinde sisteme kazandırılan güneş enerjisinin durgun hava katmanının yüksek yalıtım etkisi sayesinde FDM entegreli duvar önünde tutarak duvar dış yüzey sıcaklığını yükseltmiş ve FDM'nin çalışmasını desteklemiştir. Bu sayede FDM gündüz depoladığı enerjiyi gece saatlerinde kontrollü bir şekilde salarak sıcaklık düşüşünü sönmülemiştir. Bu sayede iç ortam sıcaklıkları, diğer odalara kıyasla daha yüksek ve daha stabil seyretmiştir.

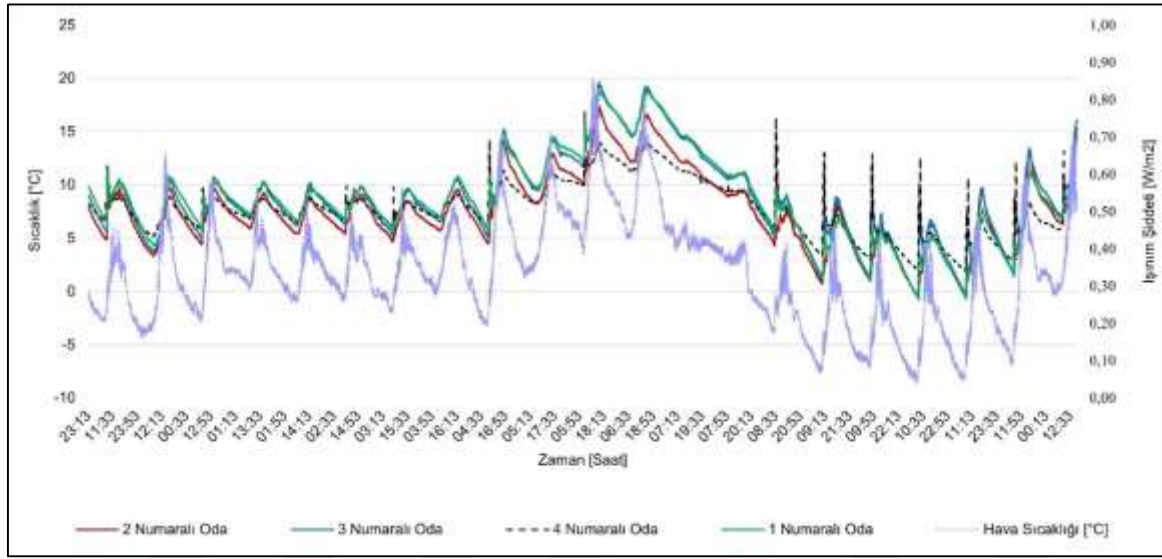
2 numaralı odaya entegre SYM-FDM duvarı, gün içerisinde hava kanallarının açık olması nedeniyle FDM entegreli termal duvar dış yüzey sıcaklığını FDM'nin çalışma sıcaklığı kadar yükseltememiş bu nedenle FDM termal döngüye girememiştir. Bu durum, farklı uygulama tipleri entegre edilen deney odaları içerisinde 2 numaralı odanın en düşük performans göstermesine neden olmuştur. 3 numaralı oda ise ısıtım kazançlarını filtreleyerek gündüz saatlerinde aşırı ısınmayı sınırlamış, buna karşın FDM ile iç ortam arasındaki ısı etkileşimini sürdürerek gece saatlerinde diğer odalara kıyasla dengeli bir ısı ortamı sunmuştur. Bu durumda ocak ayında yapılan ölçümlerde durgun hava bariyeri bulunan ve gölgeleme elemanlı SYM-FDM uygulamaları, gün içi sıcaklık dalgalanmalarını sınırlandıran ve gece ısı dengeliyi koruyan yapıyla öne çıkmıştır.



Şekil 4.7. Şubat ayı duvar iç yüzey sıcaklığı, hava sıcaklığı ve ısıtım şiddeti gerçek zamanlı ölçüm verileri

Şubat ayında 16.02.2025 – 26.02.2025 tarihleri arasında alınan ölçüm verileri Şekil 4.7’de grafik üzerinde verilmiştir. En düşük dış hava sıcaklığı  $-8^{\circ}\text{C}$  değerini kaydettiği günde, tüm SYM-FDM uygulamalarının standart duvara kıyasla iç yüzey sıcaklıklarını ortalama  $1^{\circ}\text{C}$  daha yüksek değer kaydettirilmiştir. FDM'nin çalışma sıcaklık aralığının çok altında dış hava sıcaklıklarına karşı standart duvara göre daha yüksek performans göstermesi duvarın yüksek yalıtım etkisinin göstergesi olmuştur. Perdeli SYM-FDM duvar uygulaması, gündüz güneş ısıtımından maksimum kazanç sağlaması için perde açık tutulmuş bu sayede FDM'nin ısıyı depolaması sağlanmıştır. Gecede ısı transferini azaltmak ve perde ile duvar arasında kalan hava boşluğunun depolanan ısıyı yalıtarak koruması nedeniyle en yüksek duvar iç yüzey sıcaklığının kaydedilmesini sağlamıştır. Havalandırmalı SYM-FDM duvar

konfigürasyonunda ise gündüz hava kanallarının açık olması ile devinim içerisinde olan hava termal depolama duvar önü sıcaklığının FDM'nin çalışma sıcaklığından daha düşük sıcaklık değerlerinin ölçülmesine neden olmuş bu nedenle de iç yüzey sıcaklıklarını diğer uygulamalara kıyasla daha düşük düzeyde tutmuştur. Standart yalıtımlı duvar sistemi ise özellikle gece saatlerinde dış hava sıcaklıklarındaki düşüşe en yüksek hassasiyeti göstermiş ve yüzey sıcaklıkları en düşük seviyelere gerilemiştir.

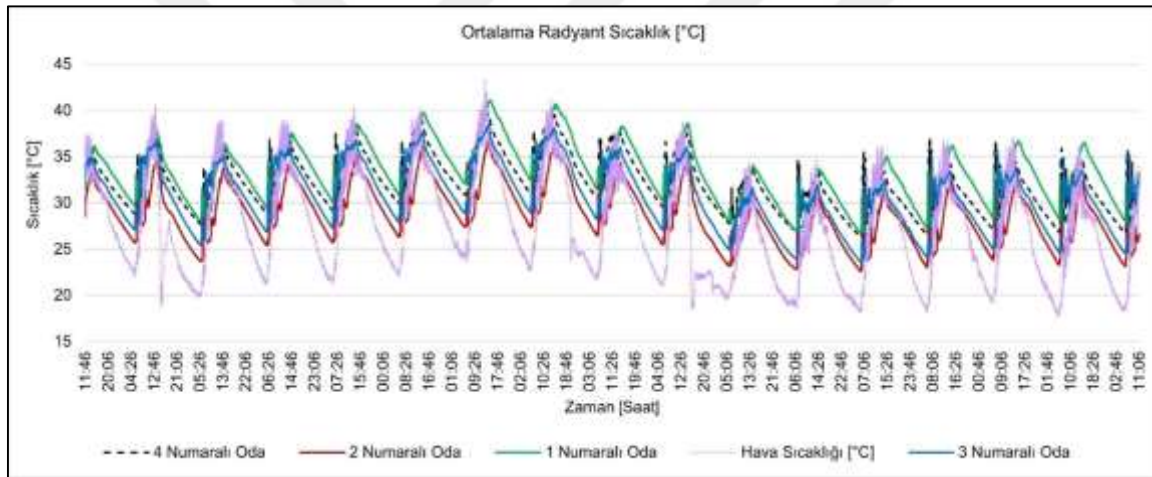


Şekil 4.8. Şubat ayında deney ünitelerinden gerçek zamanlı alınan ortalama radyant sıcaklık verileri

Deney ünitelerinin şubat ayı 05.02.2025 – 26.02.2025 tarihleri arasında alınan ölçümlere ait ortalama radyant sıcaklık verileri Şekil 4.8’de grafik üzerinde verilmiştir. Grafik incelendiğinde, 1 numaralı oda en yüksek iç ortam sıcaklıklarını sergilemiştir. Dış ortam sıcaklığının  $-5^{\circ}\text{C}$  ölçüldüğü günde 4 numaralı referans odaya göre ortalama sıcaklık değerini  $1^{\circ}\text{C}$  yükseltmiştir. Bu durum faz değiştiren malzemenin gündüz saatlerinde absorbe ettiği güneş enerjisini durgun hava katmanı ile FDM tarafından depolanması desteklendiği, gece boyunca da depoladığı enerjiyi kontrollü bir biçimde salarak ortalama sıcaklığa katkı sunduğu görülmektedir. 2 numaralı oda ise tüm SYM-FDM entegreli deney odaları arasında en düşük iç ortam sıcaklıklarını göstermektedir. 3 numaralı oda, 1 numaralı oda ile en yüksek sıcaklık değerlerinin kaydedildiği deney ünitesi olmuştur. Bu durum, gölgeleme elemanının ısı yüklerinin düzenlenmesine olumlu katkı sağladığını ortaya koymaktadır. 4 numaralı oda, dış hava sıcaklığına en hızlı ve geniş genlikli tepki veren sistem olmuş; bu durum klasik yalıtımın ısıyı depolama ve gecikmeli salma kabiliyetinin sınırlı olduğunu göstermektedir.



düzeylerde tutmakta ve güneş ışıının etkili olduğu saatlerde dar hava boşluğunda biriken ısıının artması ve FDM entegreli duvarın dış yüzey sıcaklığının aşırı artmasına sebep olmasından dolayı iç ortam sıcaklığının konfor aralığında kalmasında etkili olamamıştır. Buna karşılık, havalandırılmalı SYM-FDM duvar konfigürasyonunda iç yüzey sıcaklıklarının daha düşük seviyelerde seyrettiği görülmektedir. Bu fark, gün içerisinde dehavalandırma boşluğundaki hava akımlarının FDM'nin ortamla doğrudan ısı etkileşimini sınırlamasıyla ilişkilidir. Perdeli SYM-FDM duvar uygulaması ise, gündüz saatlerinde güneş ışıının bir kısmını filtreleyerek iç yüzey sıcaklığını daha kontrollü seviyelerde tutmakta, bu sayede ani sıcaklık artışlarını baskılamaktadır. Tüm SYM-FDM uygulamaları gece saatlerinde dış hava sıcaklığına göre daha yüksek iç yüzey sıcaklık değerlerini koruyarak, FDM'nin gündüz depoladığı ısıyı gecikmeli biçimde iç ortama aktardığını göstermektedir.

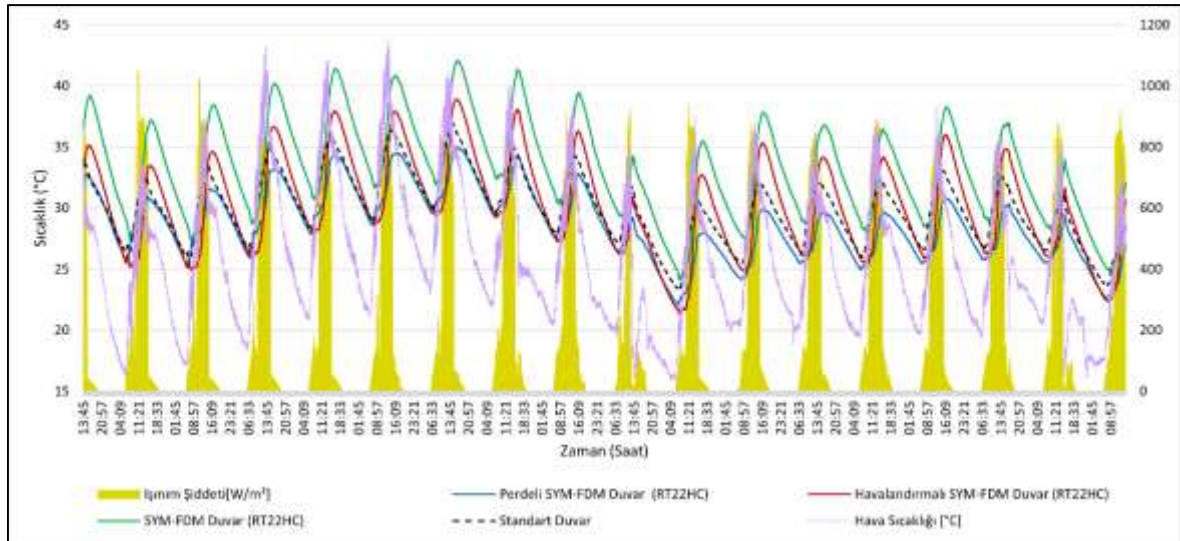


Şekil 4.10. Temmuz ayında deney ünitelerinden gerçek zamanlı alınan ortalama radyant sıcaklık verileri

Temmuz ayına ait deneysel çalışma kapsamında elde edilen ortalama radyant sıcaklık (Şekil 4.10) verileri, farklı SYM-FDM uygulamalarına sahip üç deney odası ile standart opak yalıtımlı referans odanın performansını karşılaştırmalı olarak değerlendirmektedir. Grafik incelendiğinde, dış hava sıcaklığının gün içerisinde yüksek genlikli dalgalanmalar sergilediği görülmekte olup, bu değişimlere karşı deney odalarının iç ortam ısı davranışları farklı tepkiler vermektedir. Güneş ışıının yoğun olduğu gündüz saatlerinde 1 numaralı oda, tüm sistemler içinde en yüksek ortalama radyant sıcaklık seviyesine ulaşmakta, bu durum saydam yalıtım ünitesi ile FDM arasındaki durgun hava boşluğunun (2 cm) duvar önünde aşırı ısınmaya sebep olduğu bu sebeple FDM'nin güneş etkisinin yoğun olduğu saatlerde eriyik halde kalarak performans gösteremediğini ortaya koymaktadır. 2 numaralı

oda ise diğer odalara kıyasla daha düşük MRT değerleri sergilemektedir. Bu fark, termal duvarda bulunan havalandırma kapakçıklarının açık tutulması ile hava boşluğundaki havanın gün boyunca sirküle olarak termal duvarın dış yüzeyin aşırı ısınmasının önüne geçmektedir. Bu nedenle, FDM'e termal döngüye girerek 2 numaralı deney ünitesinin ortalama sıcaklığını dengelemektedir. 3 numaralı oda, gündüz saatlerinde güneş kazançlarını sınırlayarak iç yüzey sıcaklıklarının aşırı yükselmesini önlemekte, bu nedenle MRT değerleri 1 numaralı odaya göre daha kontrollü bir düzeyde seyretmektedir. Ancak, 2 numaralı odaya kıyasla daha yüksek MRT değerlerine sahip olması, gölgeleme elemanı etkisiyle güneş ışıınımını filtreleyerek duvar önü aşırı ısınmasını önlemesine rağmen hava boşluğunda radyasyon etkisiyle ısınan hava sirküle olmadığı için termal duvarın dış yüzey sıcaklığı havalandırma SYM-FDM duvarı uygulamasına göre daha çok ısınmaktadır. Bu nedenle ortalama radyant sıcaklığa etkisini daha sınırlı gösterdiği için 2 numaralı odadan daha yüksek sıcaklık değerleri ölçülmüştür. 4 numaralı oda ise 1 numaralı odaya kıyasla MRT değerleri daha düşük seyretmekte, 2 ve 3 numaralı odaya göre dış hava koşullarına daha hızlı ve yüksek genlikli tepkiler vermektedir.

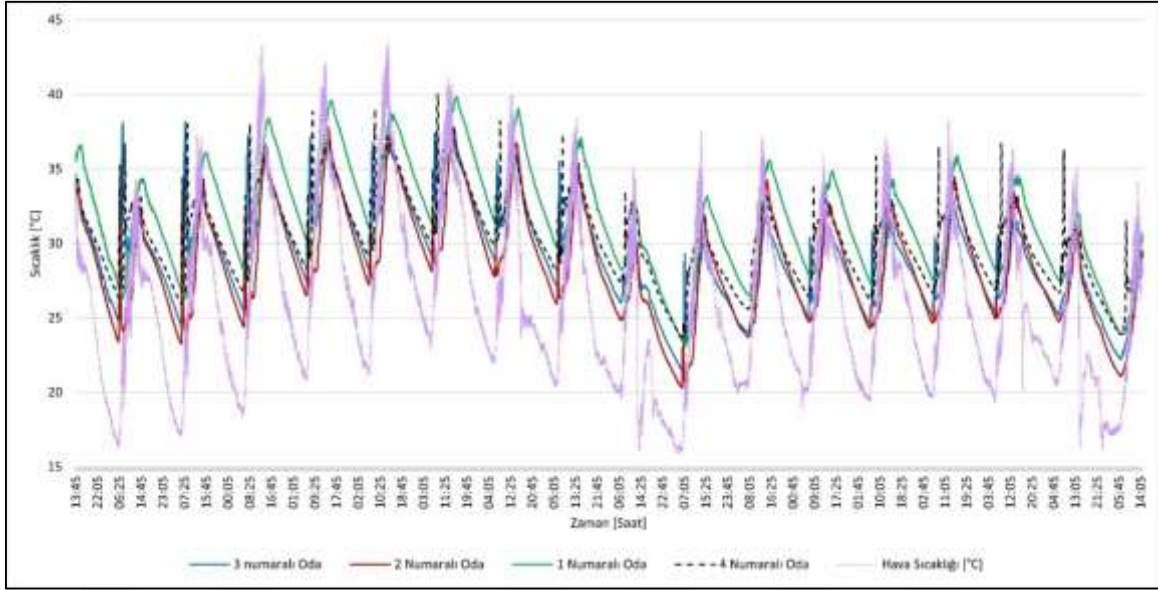
Ağustos ayında 16.08.2024 – 31.08.2024 tarihleri arasında dört deney ünitesinden elde edilen gerçek zamanlı sıcaklık ölçümleri sonucunda ulaşılan veriler grafik üzerinde değerlendirilmiştir. Elde edilen veriler Şekil 4.11'de sunulmuştur.



Şekil 4.11. Ağustos ayı duvar iç yüzey sıcaklığı, hava sıcaklığı ve ışıınım şiddeti gerçek zamanlı ölçüm verileri

Ağustos ayına ait deneysel ölçüm sonuçlarına göre, güneş ışıınının 1000 W/m<sup>2</sup>'ye kadar ulaştığı gündüz saatlerinde, özellikle saat 10:00 ile 16:00 arasında, tüm deney duvarlarında belirgin sıcaklık artışları gözlemlenmektedir. Bu periyotlarda SYM-FDM duvar uygulaması, diğer tüm sistemler arasında en yüksek iç yüzey sıcaklıklarına ulaştığı görülmüştür. Bu uygulamada FDM entegreli duvarın dış yüzeyi aşırı ısınmış ve FDM sürekli eriyik halde kalarak performans göstermemiştir. FDM'nin performans gösteremediği durumda duvarın ısı transferi sınırlandırılmamış ve ısı akışını zamana yayarak düzenleyememiştir. Bu nedenle duvar iç yüzeyinde yüksek sıcaklıklar kaydedilmiş ve sıcaklık genliğindeki dalgalanmalar artmıştır. Perdeli SYM-FDM duvar uygulamasında ise günüz güneş ışıının şiddetinin yüksek olduğu saatlerde gölgeleme elemanın ışıınının bir kısmını filtrelmesi sayesinde iç yüzey sıcaklıkları daha dengeli seyretmiş ve aşırı ısınma etkisi sınırlandırılmıştır. Havalandırmalı SYM-FDM duvar konfigürasyonunda diğer uygulamalara göre daha düşük sıcaklık değerleri ölçülmüştür. Bu durum, boşlukta oluşan doğal hava akımlarının FDM'nin termal döngüye girmesini olumlu etkileyerek duvarın ısı transferini sınırlandırmıştır. Standart duvar, diğer sistemlerle kıyaslandığında SYM-FDM duvarına göre daha iyi performans gösterirken havalandırmalı ve perdeli SYM-FDM duvarına göre daha yüksek ortam sıcaklığı değerlerine ulaşmıştır. Dış hava sıcaklığına daha hızlı ve büyük genlikli tepkiler vermiştir.

Gece saatlerinde güneş ışıınının kesilmesiyle birlikte tüm sistemlerin sıcaklıkları düşüş eğilimi gösterse de havalandırmalı ve perdeli SYM-FDM sistemlerinde bu düşüş daha yavaş ve sönümlenmiş bir biçimde gerçekleşmiştir. Bu durum, FDM'nin çalışır durumda olduğunu ve gündüz depoladığı enerjiyi gece boyunca kontrollü biçimde iç mekâna salarak sıcaklıkların düşmesini yavaşlattığını ve iç ortamda daha dengeli bir ısıl profil oluşturduğunu göstermektedir.



Şekil 4.12. Ağustos ayında deney ünitelerinden gerçek zamanlı alınan ortalama radyant sıcaklık verileri

Ağustos ayında dört deney odasının gerçek zamanlı ortalama radyant sıcaklık verileri karşılaştırmalı olarak Şekil 4.12’de sunulmuştur. Grafik incelendiğinde, gündüz saatlerinde yükselen dış hava sıcaklıklarıyla birlikte tüm odalarda sıcaklık artışları gözlemlenmekte olup bu artışların büyüklüğü ve zamana yayılımı oda tipine göre değişiklik göstermektedir. Güneş ışınımının en yoğun olduğu saatlerde 1 numaralı odanın en yüksek sıcaklık değerlerine ulaştığı görülmüştür. Bu durum FDM entegreli duvar önü sıcaklığının gündüz saatlerinde aşırı artış göstererek FDM’nin termal döngüye girmesini olumsuz etkileyerek ortam sıcaklığının düzenleyemediği gibi standart duvara kıyasla daha da arttırdığını ortaya koymuştur. 2 numaralı oda diğer odalara kıyasla daha düşük sıcaklık profili sergilemiş, ortam sıcaklığını konfor sıcaklığına yaklaştırmıştır. 3 numaralı oda ise özellikle gündüz saatlerinde gölgeleme elemanının da etkisiyle sıcaklık artışlarını sınırlı tutarak aşırı ısınmayı baskılamış, FDM’nin daha stabil bir ısı salım eğrisi oluşturmaya olanak sağlamıştır. 4 numaralı odada ise 2 ve 3 numaralı odaya kıyasla ortalama 2°C daha yüksek ortalama radyant sıcaklık verisi kaydedildiği ve ortam sıcaklığının dış hava sıcaklık değişimlerine daha hızlı ve geniş genlikli tepkiler verdiği görülmüştür.

Isıtma ve soğutma döneminde alınan ölçüm verilerine yönelik yapılan değerlendirmelerde ısıtma döneminde 1 numaralı odanın güney cephesinde bulunan SYM-FDM duvar uygulamasının yüksek performans gösterdiği görülmektedir. Soğutma sezonunda ise bu durum tam tersi olarak değişiklik göstermiştir. FDM entegreli duvar önündeki sıcaklığın

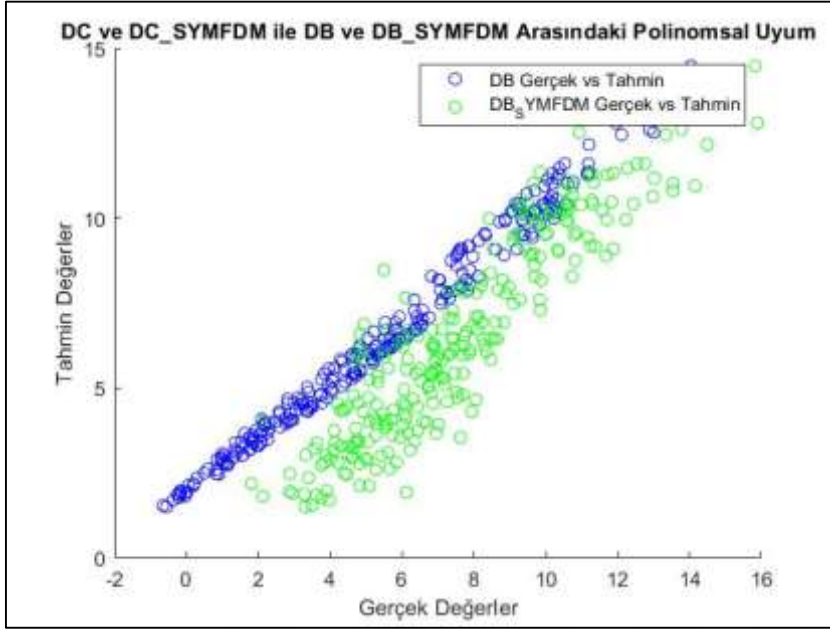
aşırı artış göstererek FDM'nin çalışması olumsuz etkilenmiş ve standart duvardan bile daha kötü performans göstermiştir. Soğutma dönemi sonuçları incelendiğinde havalandırmalı SYM-FDM duvar uygulamasının en düşük iç yüzey sıcaklık ve entegre edildiği 2 numaralı odanın en düşük ortalama radyant sıcaklık değeri göstermiş olmasına rağmen duvarın dış hava sıcaklığına verdiği tepki perdeli SYM-FDM duvarına göre daha hızlı ve daha yüksek genlikli olmuştur. Bu durum konfor açısından havalandırmalı SYM-FDM duvarı için istenmeyen bir etki oluşturmuştur. İki dönemde de dikkate çeken duvar uygulaması perdeli SYM-FDM duvarı olmuştur. Kışın duvar iç yüzey sıcaklığını standart duvara kıyasla yaz döneminde yaklaşık 2°C düşürerek serinlik sağlamış, kış döneminde ise yaklaşık 3°C yükselterek her iki dönem için dengeli ve yüksek bir performans göstermiştir. Bu duvar uygulamasının diğer SYM-FDM duvar uygulamalarına göre enerji etkin tasarım için önemli bir kriter olan iç ortam konforuna etkisi her iki dönemde de performansı olumlu etkileyecek düzeydedir. Her iki dönemde de ortalama radyant sıcaklık verilerinin daha dar genlikli ve daha dengeli bir grafik çizdiği görülmektedir. Bu nedenle Bina enerji performans analizleri için deneysel ölçümler sonucunda en iyi performans gösteren perdeli SYM-FDM duvar uygulaması kullanılmıştır

#### 4.3. Bina Enerji Performans Analizi

Bu bölümde, deneysel çalışma sonucunda performansı en yüksek çıkan perdeli SYM-FDM duvar uygulamasının yapıya entegre edildiği durumda enerji performansına etkisinin analizine odaklanılmaktadır. Yapı ölçeğinde yapılacak olan bina enerji performans analizleri öncesinde deney üniteleri DesignBuilder'da modellenmiş, sonuçlar deneysel çalışmadan elde edilen sonuçlarla polinomsal regresyon modeliyle karşılaştırılmıştır. Model uyumu değerlendirmesi grafiksel analiz ve analiz sonucunda hesaplanan determinasyon katsayısı ( $R^2$ ) değeri üzerinden yapılmıştır.

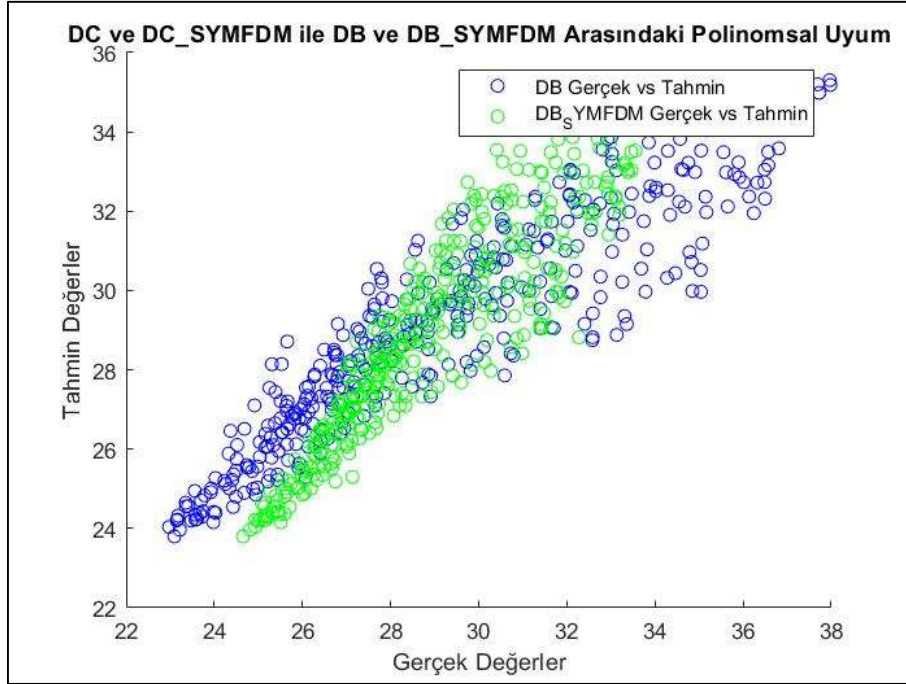
Isıtma dönemine ait veriler gerçek zamanlı ölçüm alınan 16.12.2024 – 26.12.2024 tarihlerindeki duvar iç yüzey sıcaklığı ve hava sıcaklığı verileri ile karşılaştırılmıştır. Analizde, DesignBuilder simülasyon verileri ile deneysel olarak elde edilen hava sıcaklığı (DC) ve duvar iç yüzey sıcaklığı (DC\_SYMFDM) verileri ikinci dereceden polinomsal modelle benzeşim oranı  $R^2 = 0.8192$  olarak belirlenmiştir. Bu değer, modelin gerçek verilerdeki varyansın yaklaşık %82'sini açıkladığını ve bu bağlamda yüksek düzeyde bir uyum sergilediğini göstermektedir (Şekil 4.13). Grafiksel analizde, özellikle sıcaklık

değerlerinin orta noktaya yakın aralıkta tahmin ve gözlem değerleri arasında güçlü bir korelasyon olduğu görülmekte ancak uç değerlerde FDM'nin termal davranışına bağlı olarak kısmi sapmalar gözlemlenmektedir.



Şekil 4.13. Isıtma döneminde Deneysel çalışma verisi ile DesignBuilder verisinin polinomsal uyumu

Soğutma dönemine ait veriler gerçek zamanlı ölçüm alınan 15.07.2024 – 31.07.2024 tarihlerindeki duvar iç yüzey sıcaklığı ve hava sıcaklığı verileri ile karşılaştırılmıştır. Soğutma dönemine ait gerçekleştirilen polinomsal regresyon analizinde, DesignBuilder simülasyonları ile deneysel olarak elde edilen iç ortam hava sıcaklığı (DC) ve FDM iç yüzey sıcaklığı (DC\_SYMFDM) verileri ikinci dereceden regresyon modeli ile değerlendirilmiş, modelin başarı düzeyi  $R^2 = 0.7966$  olarak belirlenmiştir. Bu değer, modelin gözlenen verilerdeki varyansın yaklaşık %80'ini açıklayabildiğini ve bu doğrultuda yüksek düzeyde bir uyum sağladığını göstermektedir (Şekil 4.14). Grafikselsel olarak değerlendirildiğinde, tahmin edilen sıcaklık değerlerinin gerçek verilerle büyük ölçüde örtüştüğü; özellikle 24–34 °C aralığında korelasyonun güçlü olduğu gözlemlenmektedir.

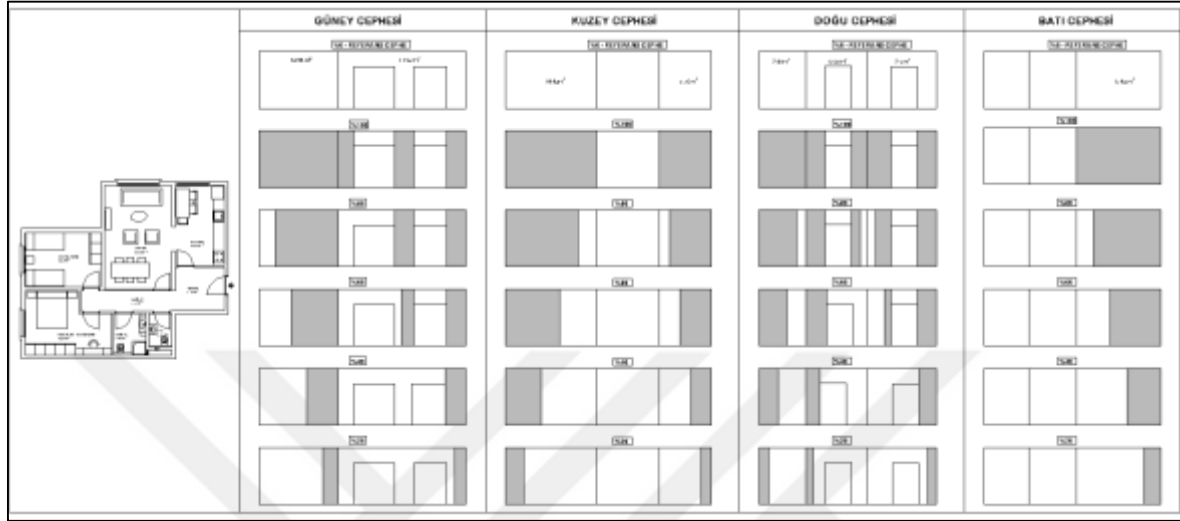


Şekil 4.14. Soğutma döneminde Deneysel çalışma verisi ile DesignBuilder verisinin polinomsal uyumu

Regresyon analizi ile ısıtma ve soğutma dönemine ait polinomsal uyum incelendiğinde modelin farklı sıcaklık bölgelerinde değişken tahmin hassasiyetine sahip olduğu görülmektedir. Bu sapmaların nedenlerinden biri, dış hava sıcaklık verilerinin birebir uyum sağlamaması nedeniyle faz değiştiren malzemenin farklı davranabilmesidir. Bir diğer neden ise, gerçek koşullarda analiz edilen deney ünitesinin maruz kaldığı gölgeleme etkisiyle DesignBuilder'daki modelin gölgeleme etkisinin aynı olmamasıdır. Bu durum SYMFDMD duvarın dış yüzey sıcaklığını etkileyeceği gibi dolaylı olarak FDM'nin çalışma durumunu da değiştirecektir. Buna rağmen elde edilen sonuçlar, kullanılan polinomsal modelin soğutma dönemi ve ısıtma dönemine ait termal davranışları istatistiksel olarak temsil etmede başarılı olduğunu ortaya koymaktadır. Ayrıca ısıtma ve soğutma döneminin yakın benzeşim oranları ile birbirini yakalaması simülasyon sonuçlarının gerçek zamanlı verilerle uyum içinde olduğunun bir diğer göstergesi olmuştur.

Gerçek zamanlı ölçüm verileri ile simülasyon verilerinin yüksek benzeşim göstermesinin ardından bu çalışma paketinin ikinci adımı olan bina ölçeğinde enerji performans analizlerine geçilmiştir. Isıtma ve soğutma dönemi için alınacak verilerin karşılaştırılmasının yapılabilmesi için referans konut binası oransal olarak “%0” olarak tanımlanmıştır. Isıtma ve soğutma dönemi için her cephede %100- %20 aralığında %20'lik

adımlarla artan oranda SYM-FDM duvarı uygulamasının performans sonuçları her yüzde oran için alınmıştır. Her cephe için %100-%20 oranında düzenlenen SYM-FDM duvarı Şekil 4.15'te verilmiştir.

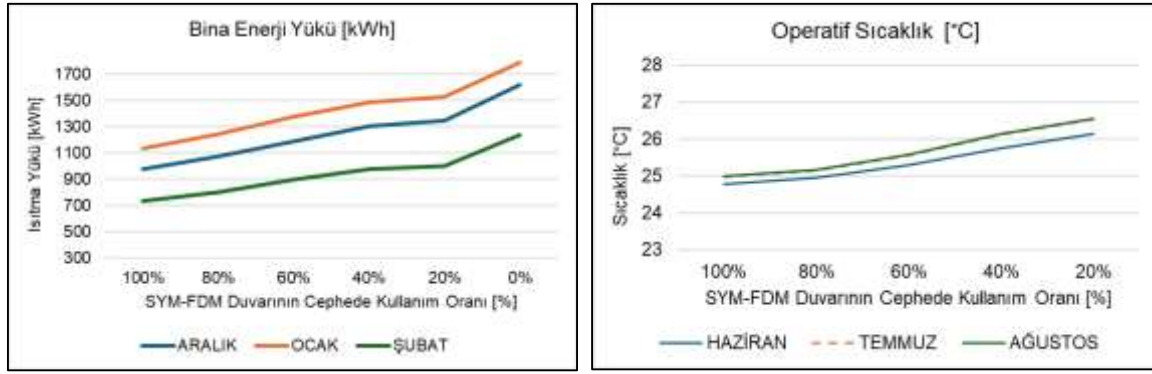


Şekil 4.15. SYM-FDM duvarının dört cephede bulunma oranına göre yerleşimi

Güney cephesi için yapılan analizlerde SYM-FDM duvarının cephede bulunma oranı %20'lik adımlarla %20 -100 aralığında değiştirilmiştir. Her bir SYM-FDM oranı için ısıtma -soğutma yükü, radyant sıcaklık ve operatif sıcaklık değerleri kaydedilmiştir (Çizelge 4.1).

Çizelge 4.1. Güney cephesi ısıtma dönemi SYM-FDM duvar oranlarına ait analiz sonuçları

|        |                        | 100%    | 80%     | 60%     | 40%     | 20%     | 0%      |
|--------|------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| ARALIK | Radyant Sıcaklık [°C]  | 18,17   | 18,00   | 17,61   | 17,57   | 17,40   | 17,01   |
|        | Isıtma Yüğü [kWh]      | 975,88  | 1072,28 | 1190,92 | 1301,85 | 1348,12 | 1620,93 |
|        | Operatif Sıcaklık [°C] | 19,08   | 18,99   | 18,61   | 18,39   | 18,34   | 18,23   |
| OCAK   | Radyant Sıcaklık [°C]  | 18,21   | 18,10   | 17,54   | 17,51   | 17,31   | 16,95   |
|        | Isıtma Yüğü [kWh]      | 1134,64 | 1239,76 | 1375,10 | 1482,69 | 1527,45 | 1790,40 |
|        | Operatif Sıcaklık [°C] | 18,80   | 18,60   | 18,59   | 18,37   | 18,33   | 18,21   |
| ŞUBAT  | Radyant Sıcaklık [°C]  | 18,33   | 18,25   | 18,22   | 18,12   | 18,04   | 17,65   |
|        | Isıtma Yüğü [kWh]      | 731,08  | 800,93  | 895,16  | 975,59  | 1003,24 | 1234,36 |
|        | Operatif Sıcaklık [°C] | 19,15   | 18,99   | 18,96   | 18,81   | 18,73   | 18,59   |

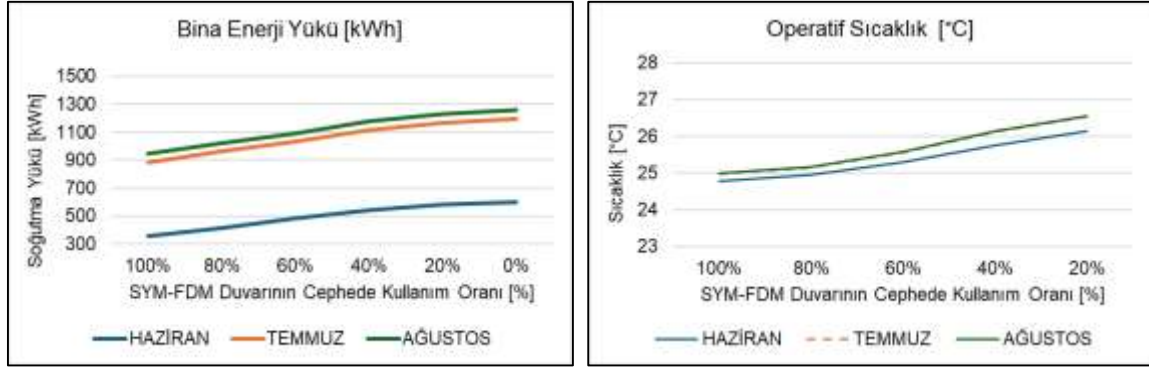


Şekil 4.16. Güney cephesi ısıtma dönemi SYM-FDM duvar oranlarının analizine ait grafikler

Güney cephesine entegre edilen SYM-FDM duvar sisteminin ısıtma dönemi boyunca bina performansına etkisi aralık, ocak ve şubat aylarına ait ısıtma yükü ve operatif sıcaklık analizleriyle değerlendirilmiştir (Şekil 4.16). Toplam ısıtma yüküne ilişkin grafik, SYM-FDM duvar oranının azaldıkça ısıtma yükünün belirgin şekilde arttığını göstermektedir. Özellikle %100 uygulamada, aralık ayında yaklaşık 1300 kWh olan ısıtma yükü, %0 uygulamada 1600 kWh'ye yaklaşarak yaklaşık %23'lük bir artış sergilemiştir. Benzer eğilim ocak ve şubat aylarında da gözlenmekte olup, bu durum SYM-FDM sisteminin ısı kayıplarını azaltarak enerji tasarrufu sağladığını kanıtlar niteliktedir. Operatif sıcaklık analizine göre ise, SYM-FDM oranı arttıkça iç mekân sıcaklığı sabitlenmekte ve düşüş eğilimi zayıflamaktadır. Özellikle %100 uygulama durumunda ortalama operatif sıcaklık 18,8–19 °C civarında seyretmiş olup, bu değer kullanıcı konforunu destekleyici niteliktedir.

Çizelge 4.2. Güney cephesi soğutma dönemi SYM-FDM duvar oranlarına ait analiz sonuçları

|         |                        | 100%   | 80%     | 60%     | 40%     | 20%     | 0%      |
|---------|------------------------|--------|---------|---------|---------|---------|---------|
| HAZİRAN | Radyant Sıcaklık [°C]  | 25,29  | 25,45   | 25,74   | 26,12   | 26,48   | 26,75   |
|         | Soğutma Yüğü [kWh]     | 354,22 | 415,46  | 485,75  | 541,64  | 581,19  | 601,44  |
|         | Operatif Sıcaklık [°C] | 24,78  | 24,95   | 25,31   | 25,75   | 26,14   | 26,44   |
| TEMmuz  | Radyant Sıcaklık [°C]  | 25,89  | 26,05   | 26,39   | 26,85   | 27,24   | 27,61   |
|         | Soğutma Yüğü [kWh]     | 884,19 | 961,21  | 1030,82 | 1112,24 | 1167,23 | 1194,64 |
|         | Operatif Sıcaklık [°C] | 24,98  | 25,15   | 25,56   | 26,11   | 26,52   | 26,92   |
| AĞUSTOS | Radyant Sıcaklık [°C]  | 26,00  | 26,16   | 26,51   | 26,98   | 27,37   | 27,73   |
|         | Soğutma Yüğü [kWh]     | 949,05 | 1023,79 | 1093,41 | 1176,27 | 1232,58 | 1260,26 |
|         | Operatif Sıcaklık [°C] | 24,99  | 25,16   | 25,58   | 26,15   | 26,56   | 26,95   |

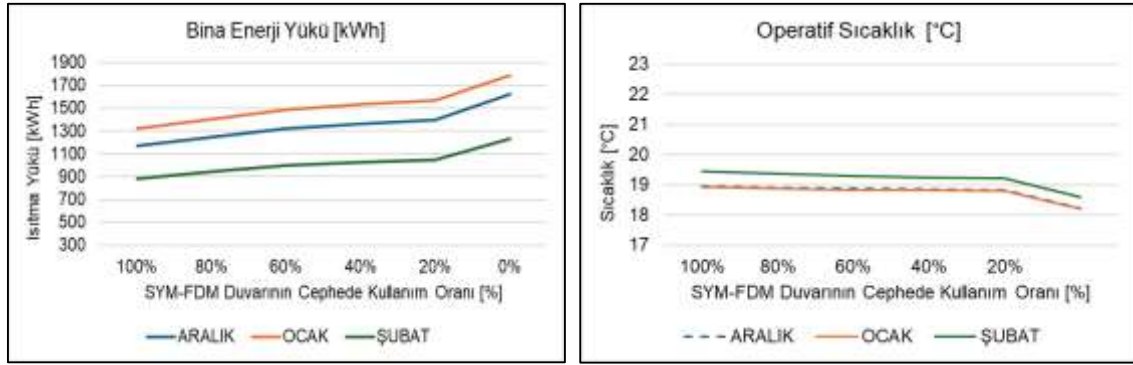


Şekil 4.17. Güney cephesi soğutma dönemi SYM-FDM duvar oranlarının analizine ait grafikler

Güney cephesinde farklı oranlarda uygulanan SYM-FDM duvar sisteminin soğutma dönemi analizleri, haziran, temmuz ve ağustos aylarını kapsayan aylara ait soğutma yükü ve operatif sıcaklık verileriyle (Çizelge 4.2) değerlendirilmiştir. Soğutma yüküne ait grafik (Şekil 4.17) incelendiğinde, SYM-FDM duvar oranının artmasıyla birlikte soğutma yükünde belirgin bir azalma gözlemlenmiştir. Özellikle %100 uygulama durumunda haziran ayında yaklaşık 350 kWh olan soğutma yükü, %0 uygulamada 600 kWh'nin üzerine çıkarak %70'e yakın bir artış sergilemiştir. Benzer eğilim temmuz ve ağustos aylarında da korunmakta olup, gölgeleme elemanı entegreli SYM-FDM duvarının, güneş ışınlamından kaynaklı radyasyon etkisinin yüksek olduğu saatlerde gölgeleme elemanının kapalı pozisyonunda olduğu güneş etkisinin olmadığı akşam saatlerinde ise açık pozisyonunda olarak güneş kazancını sınırlandırmıştır. Bunun etkisi olarak iç mekân ısı yüklerini düşürdüğü görülmektedir. Operatif sıcaklık analizine göre ise SYM-FDM oranı azaldıkça iç ortam sıcaklığı artmakta ve %100 uygulama durumunda 25 °C civarında tutulan sıcaklık, %20 uygulamada 27 °C seviyesine ulaşmaktadır.

Çizelge 4.3. Batı cephesi ısıtma dönemi SYM-FDM duvar oranlarına ait analiz sonuçları

|        |                        | 100%    | 80%     | 60%     | 40%     | 20%     | 0%      |
|--------|------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| ARALIK | Radyant Sıcaklık [°C]  | 17,97   | 17,91   | 17,86   | 17,82   | 17,78   | 17,01   |
|        | Isıtma Yüğü [kWh]      | 1171,82 | 1244,64 | 1318,01 | 1363,03 | 1393,44 | 1620,93 |
|        | Operatif Sıcaklık [°C] | 18,96   | 18,91   | 18,87   | 18,85   | 18,83   | 18,23   |
| OCAK   | Radyant Sıcaklık [°C]  | 17,89   | 17,83   | 17,77   | 17,74   | 17,71   | 16,95   |
|        | Isıtma Yüğü [kWh]      | 1321,94 | 1406,10 | 1488,36 | 1536,68 | 1567,22 | 1790,40 |
|        | Operatif Sıcaklık [°C] | 18,93   | 18,88   | 18,84   | 18,82   | 18,80   | 18,21   |
| ŞUBAT  | Radyant Sıcaklık [°C]  | 18,69   | 18,61   | 18,54   | 18,49   | 18,46   | 17,65   |
|        | Isıtma Yüğü [kWh]      | 883,86  | 940,78  | 995,97  | 1026,43 | 1045,36 | 1234,36 |
|        | Operatif Sıcaklık [°C] | 19,46   | 19,37   | 19,30   | 19,25   | 19,23   | 18,59   |

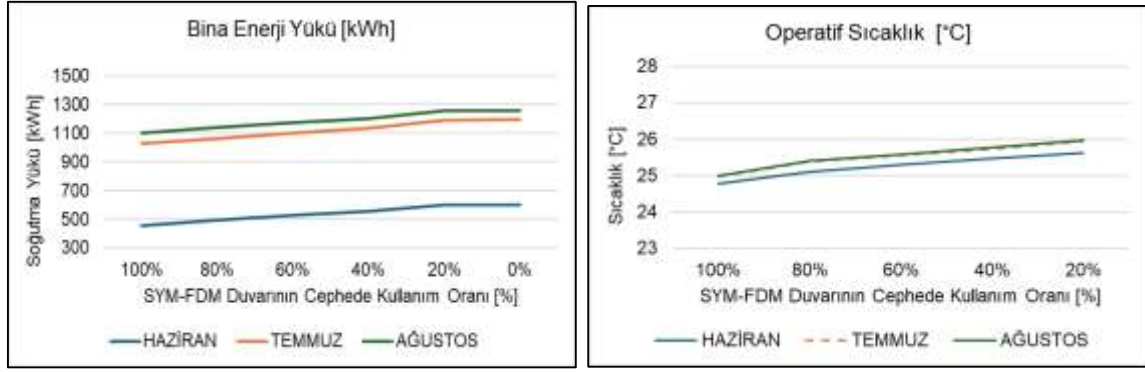


Şekil 4.18. Batı cephesi ısıtma dönemi SYM-FDM duvar oranlarının analizine ait grafikler

SYM-FDM duvarının batı cephesinde uygulanmasına ilişkin ısıtma dönemi analizlerine ait ısıtma yükü verileri (Çizelge 4.3) ve verilerden elde edilen grafikler (Şekil 4.18) incelendiğinde, %100 uygulama durumunda, %0 uygulamaya kıyasla tüm aylarda yaklaşık 300–400 kWh düzeyinde bir tasarruf sağlanmıştır. Bu durum, batı cephesine entegre edilen SYM-FDM sisteminin ısı kayıplarını azaltarak binanın enerji verimliliğini olumlu yönde etkilediğini göstermektedir. Operatif sıcaklık analizine göre ise, SYM-FDM oranı yükseldikçe iç mekân sıcaklık değerleri daha istikrarlı bir seviyede korunmaktadır. %100 uygulama durumunda şubat ayında 19,5 °C'ye yaklaşan bir ortalama sıcaklık sağlanırken, %0 uygulamada bu değer 18,5 °C düzeyine gerilemiştir. Özellikle akşam saatlerinde güneş ışınımına maruz kalan batı cephesinde, faz değiştiren malzemenin geç ısı salımı yoluyla ısıtma katkısı sunduğu anlaşılmaktadır.

Çizelge 4.4. Batı cephesi soğutma dönemi SYM-FDM duvar oranlarına ait analiz sonuçları

|         |                        | 100%    | 80%     | 60%     | 40%     | 20%     | 0%      |
|---------|------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| HAZİRAN | Radyant Sıcaklık [°C]  | 25,29   | 25,55   | 25,71   | 25,88   | 26,01   | 26,75   |
|         | Soğutma Yüğü [kWh]     | 455,49  | 494,40  | 528,81  | 555,53  | 600,03  | 601,44  |
|         | Operatif Sıcaklık [°C] | 24,78   | 25,11   | 25,29   | 25,48   | 25,62   | 26,44   |
| TEMMUZ  | Radyant Sıcaklık [°C]  | 25,89   | 26,21   | 26,37   | 26,54   | 26,73   | 27,61   |
|         | Soğutma Yüğü [kWh]     | 1026,77 | 1065,31 | 1102,61 | 1132,57 | 1189,27 | 1194,64 |
|         | Operatif Sıcaklık [°C] | 24,98   | 25,38   | 25,55   | 25,74   | 25,95   | 26,92   |
| AĞUSTOS | Radyant Sıcaklık [°C]  | 26,00   | 26,34   | 26,50   | 26,67   | 26,87   | 27,73   |
|         | Soğutma Yüğü [kWh]     | 1103,24 | 1138,90 | 1173,74 | 1201,80 | 1256,76 | 1260,26 |
|         | Operatif Sıcaklık [°C] | 24,99   | 25,41   | 25,58   | 25,77   | 25,98   | 26,95   |

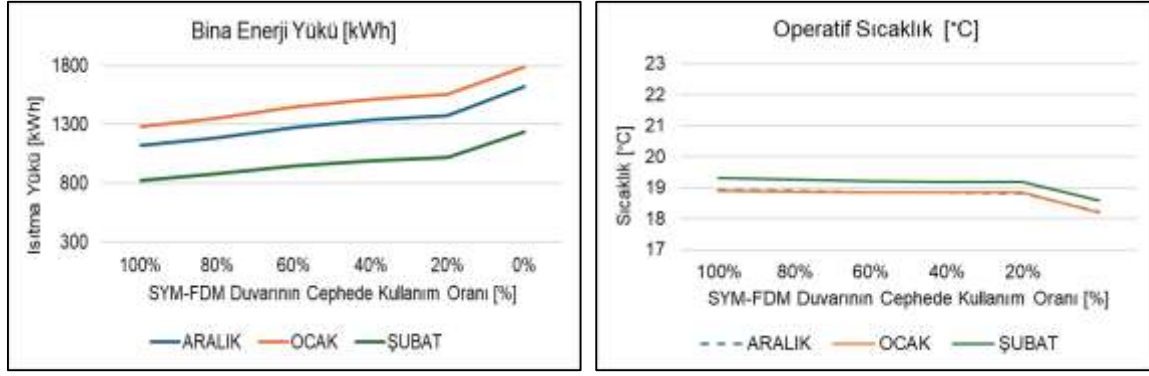


Şekil 4.19. Batı cephesi soğutma dönemi SYM-FDM duvar oranlarının analizine ait grafikler

Batı cephesinde SYM-FDM duvarının bulunma oranına bağlı olarak soğutma yüküne etkisi analiz sonuçları (Çizelge 4.4) ve sonuçlara ilişkin grafikler (Şekil 4.19) üzerinden incelendiğinde, SYM-FDM oranı arttıkça soğutma yükünde belirgin bir azalma eğilimi olduğunu görülmektedir. Özellikle haziran ayında %100 uygulama ile %0 uygulama arasında yaklaşık 200 kWh düzeyinde bir fark oluşmakta, bu da SYM-FDM sisteminin yaz aylarında güneş kazançlarını sınırlandırarak iç ortam ısı yükünü düşürdüğünü göstermektedir. Temmuz ve ağustos aylarında da benzer bir eğilim sürmekte olup yüksek güneş ışınımının etkili olduğu öğleden sonraki saatlerde batı cephesinin ısı kazancı SYM-FDM duvar ile etkin şekilde kontrol altına alınmaktadır. Operatif sıcaklık grafiklerine göre ise, SYM-FDM oranı azaldıkça iç mekân sıcaklıkları yükselmekte, %100 uygulama ile 25 °C düzeyinde tutulan ortalama sıcaklık, %0 uygulamada 26 °C'ye ulaşmaktadır. Bu durum, faz değiştiren malzemenin gündüz süresince enerji depolaması ve ortam sıcaklığının düştüğü saatlerde ortama yayması ile iç ortam sıcaklık dalgalanmalarını azaltarak soğutma yükünü dengelediği görülmektedir.

Çizelge 4.5. Kuzey cephesi ısıtma dönemi SYM-FDM duvar oranlarına ait analiz sonuçları

|        |                        | 100%    | 80%     | 60%     | 40%     | 20%     | 0%      |
|--------|------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| ARALIK | Radyant Sıcaklık [°C]  | 17,91   | 17,86   | 17,81   | 17,78   | 17,74   | 17,01   |
|        | Isıtma Yüğü [kWh]      | 1119,85 | 1189,88 | 1273,49 | 1336,87 | 1376,24 | 1620,93 |
|        | Operatif Sıcaklık [°C] | 18,92   | 18,89   | 18,86   | 18,84   | 18,83   | 18,23   |
| OCAK   | Radyant Sıcaklık [°C]  | 17,83   | 17,80   | 17,76   | 17,73   | 17,71   | 16,95   |
|        | Isıtma Yüğü [kWh]      | 1278,87 | 1356,69 | 1449,94 | 1517,20 | 1555,33 | 1790,40 |
|        | Operatif Sıcaklık [°C] | 18,91   | 18,88   | 18,86   | 18,85   | 18,85   | 18,21   |
| ŞUBAT  | Radyant Sıcaklık [°C]  | 18,55   | 18,49   | 18,44   | 18,40   | 18,38   | 17,65   |
|        | Isıtma Yüğü [kWh]      | 825,62  | 878,92  | 943,70  | 990,63  | 1016,53 | 1234,36 |
|        | Operatif Sıcaklık [°C] | 19,32   | 19,27   | 19,22   | 19,20   | 19,19   | 18,59   |

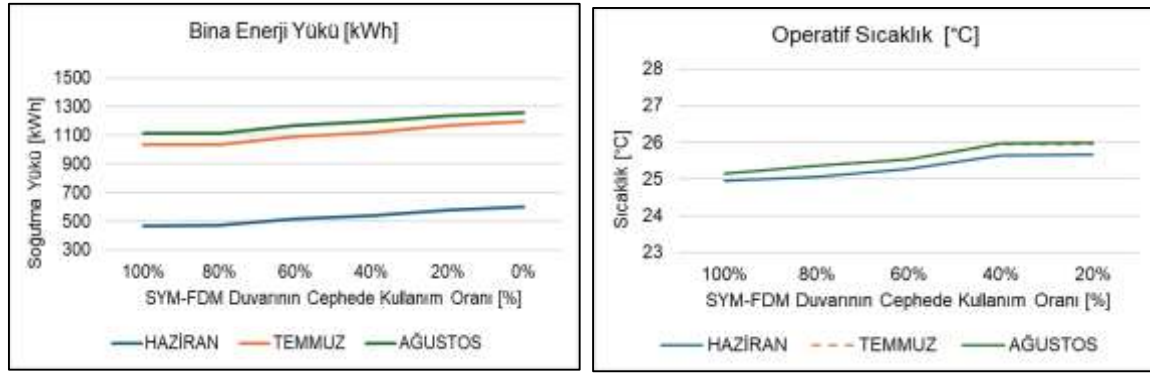


Şekil 4.20. Kuzey cephesi ısıtma dönemi SYM-FDM duvar oranlarının analizine ait grafikler

SYM-FDM duvar sisteminin kuzey cephesine uygulanmasına yönelik ısıtma dönemi analiz sonuçları (Çizelge 4.5) ve sonuçlara ilişkin grafikler (Şekil 4.20) incelendiğinde, %100 uygulama durumunda ocak ayı için ısıtma yükü yaklaşık 1300 kWh seviyesindeyken, %0 uygulamada bu değer 1800 kWh'ye kadar yükselmektedir. Benzer artışlar aralık ve şubat aylarında da gözlenmektedir. Bu durum, kuzey cephesinin doğrudan güneş ışınımı almamasına rağmen, SYM-FDM duvarın sağladığı ısı yalıtımı etkisiyle ısı kayıplarının önemli ölçüde azaltıldığını göstermektedir. Operatif sıcaklık analizine göre, %100 uygulamada iç ortam sıcaklığı 19 °C bandında korunurken, %0 uygulamada bu değer 18 °C'nin altına gerilemektedir. Bu da kullanıcı konforunun korunması açısından Güneş kazancı düşük olan kuzey cephede dahi SYM-FDM duvarının, ısıtma yüklerini azaltmakta ve iç ortam sıcaklık stabilitesini artırmaktadır.

Çizelge 4.6. Kuzey cephesi soğutma dönemi SYM-FDM duvar oranlarına ait analiz sonuçları

|         |                        | 100%    | 80%     | 60%     | 40%     | 20%     | 0%      |
|---------|------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| HAZİRAN | Radyant Sıcaklık [°C]  | 25,44   | 25,55   | 25,73   | 26,04   | 26,06   | 26,75   |
|         | Soğutma Yüğü [kWh]     | 465,06  | 471,98  | 517,75  | 537,24  | 578,27  | 601,44  |
|         | Operatif Sıcaklık [°C] | 24,95   | 25,07   | 25,27   | 25,64   | 25,66   | 26,44   |
| TEMMUZ  | Radyant Sıcaklık [°C]  | 26,04   | 26,23   | 26,40   | 26,75   | 26,76   | 27,61   |
|         | Soğutma Yüğü [kWh]     | 1033,78 | 1036,51 | 1090,43 | 1120,37 | 1166,29 | 1194,64 |
|         | Operatif Sıcaklık [°C] | 25,15   | 25,35   | 25,53   | 25,95   | 25,96   | 26,92   |
| AĞUSTOS | Radyant Sıcaklık [°C]  | 26,15   | 26,35   | 26,51   | 26,89   | 26,89   | 27,73   |
|         | Soğutma Yüğü [kWh]     | 1111,41 | 1114,58 | 1166,75 | 1193,92 | 1234,20 | 1260,26 |
|         | Operatif Sıcaklık [°C] | 25,16   | 25,37   | 25,54   | 25,98   | 25,98   | 26,95   |

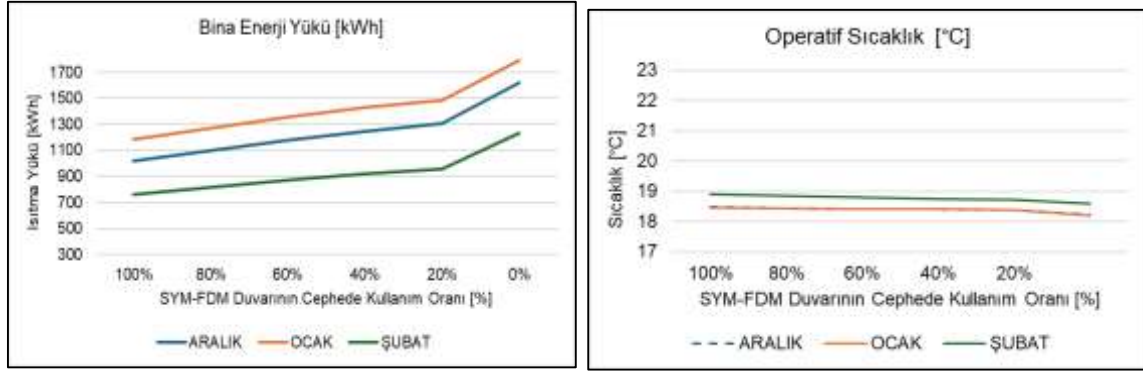


Şekil 4.21. Kuzey cephesi soğutma dönemi SYM-FDM duvar oranlarının analizine ait grafikler

Kuzey cephede SYM-FDM duvarının soğutma dönemi performansı analiz sonuçları (Çizelge 4.6) ve sonuçlara ilişkin grafikler (Şekil 4.21) üzerinden değerlendirildiğinde, %100 uygulama ile %0 uygulama arasında haziran ayında yaklaşık 100 kWh düzeyinde bir fark oluşurken, temmuz ve ağustos aylarında bu fark daha da azalmaktadır. Bu durum, kuzey cephesinin doğrudan güneş ışınlamına maruz kalmaması nedeniyle SYM-FDM sisteminin soğutma yüküne katkısının sınırlı kaldığını göstermektedir. Ancak operatif sıcaklık grafiklerine göre, SYM-FDM oranı azaldıkça iç ortam sıcaklığı yükselmekte, %100 uygulama ile yaklaşık 25 °C düzeyinde korunabilen sıcaklık değeri, %0 uygulamada 26 °C'ye yaklaşmaktadır. Bu fark, doğrudan ısı kazancından ziyade SYM-FDM sisteminin ısı geçişini yavaşlatarak iç ortam sıcaklık salınımlarını dengelemesi ile ilişkilidir. Sonuç olarak, kuzey cephesinde SYM-FDM sisteminin soğutma dönemindeki etkisi doğrudan enerji tasarrufundan çok termal konfor iyileştirmesi yönünde olmaktadır.

Çizelge 4.7. Doğu cephesi ısıtma dönemi SYM-FDM duvar oranlarına ait analiz sonuçları

|        |                        | 100%    | 80%     | 60%     | 40%     | 20%     | 0%      |
|--------|------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| ARALIK | Radyant Sıcaklık [°C]  | 17,55   | 17,49   | 17,44   | 17,42   | 17,37   | 17,01   |
|        | Isıtma Yüğü [kWh]      | 1020,29 | 1098,73 | 1179,87 | 1243,99 | 1303,97 | 1620,93 |
|        | Operatif Sıcaklık [°C] | 18,48   | 18,45   | 18,42   | 18,40   | 18,39   | 18,23   |
| OCAK   | Radyant Sıcaklık [°C]  | 17,47   | 17,42   | 17,38   | 17,35   | 17,32   | 16,95   |
|        | Isıtma Yüğü [kWh]      | 1183,39 | 1268,05 | 1354,83 | 1428,13 | 1486,84 | 1790,40 |
|        | Operatif Sıcaklık [°C] | 18,47   | 18,44   | 18,42   | 18,40   | 18,39   | 18,21   |
| ŞUBAT  | Radyant Sıcaklık [°C]  | 18,21   | 18,14   | 18,08   | 18,04   | 18,00   | 17,65   |
|        | Isıtma Yüğü [kWh]      | 758,50  | 813,85  | 871,27  | 921,35  | 959,62  | 1234,36 |
|        | Operatif Sıcaklık [°C] | 18,91   | 18,85   | 18,79   | 18,75   | 18,72   | 18,59   |

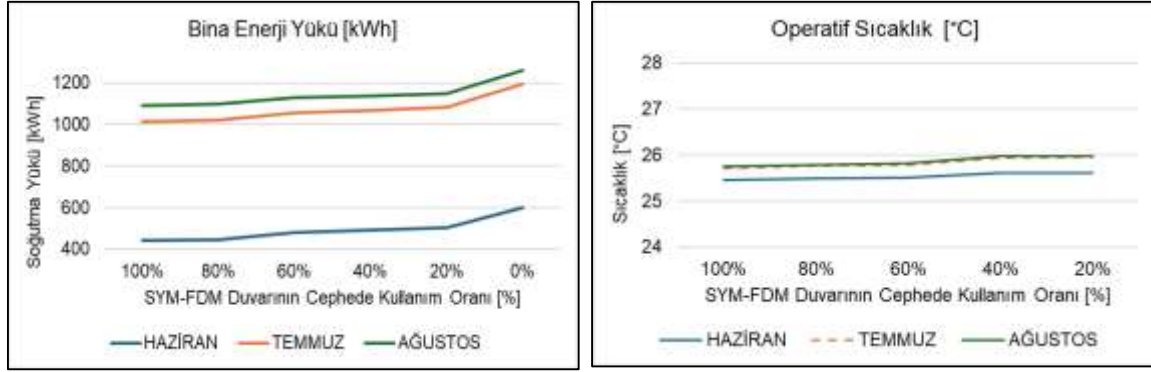


Şekil 4.22. Doğu cephesi ısıtma dönemi SYM-FDM duvar oranlarının analizine ait grafikler

Doğu cephesinde ısıtma döneminde SYM-FDM duvarının cephede bulunma oranlarına ilişkin analiz sonuçları (Çizelge 4.7) ve sonuçlara ilişkin grafikler (Şekil 4.22) incelendiğinde, %100 uygulama durumunda ocak ayında bina ısıtma yükü yaklaşık 1300 kWh iken, %0 uygulamada bu değer 1700 kWh 'ye ulaşarak %30'un üzerinde bir artış sergilemiştir. Bu durum, sabah saatlerinde güneş ışınımına açık olan doğu cephesinde SYM-FDM sisteminin ısı kayıplarını sınırlayarak erken saatlerde pasif ısı kazancı sağladığını göstermektedir. Operatif sıcaklık verileri de bu bulguyu desteklemekte olup, %100 uygulamada sıcaklıklar 18,8–19 °C seviyesinde korunurken, %0 uygulamada tüm aylarda sıcaklıklar 18 °C'nin altına gerilemektedir. SYM-FDM duvar oranı %20 olduğunda dahi ısıtma döneminin en soğuk günlerinin yaşandığı ocak ayında standart duvara göre %14 enerji tasarrufu sağlamış, operatif sıcaklığı 0,5°C arttırmıştır.

Çizelge 4.8. Doğu cephesi soğutma dönemi SYM-FDM duvar oranlarına ait analiz sonuçları

|         |                        | 100%    | 80%     | 60%     | 40%     | 20%     | 0%      |
|---------|------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| HAZİRAN | Radyant Sıcaklık [°C]  | 25,87   | 25,88   | 25,90   | 25,99   | 25,99   | 26,75   |
|         | Soğutma Yüğü [kWh]     | 442,89  | 447,50  | 481,98  | 492,07  | 504,53  | 601,44  |
|         | Operatif Sıcaklık [°C] | 25,47   | 25,49   | 25,50   | 25,61   | 25,62   | 26,44   |
| TEMMUZ  | Radyant Sıcaklık [°C]  | 26,53   | 26,56   | 26,59   | 26,73   | 26,74   | 27,61   |
|         | Soğutma Yüğü [kWh]     | 1014,06 | 1021,14 | 1055,73 | 1066,17 | 1081,48 | 1194,64 |
|         | Operatif Sıcaklık [°C] | 25,72   | 25,76   | 25,79   | 25,95   | 25,95   | 26,92   |
| AĞUSTOS | Radyant Sıcaklık [°C]  | 26,66   | 26,68   | 26,71   | 26,86   | 26,87   | 27,73   |
|         | Soğutma Yüğü [kWh]     | 1090,86 | 1095,99 | 1127,81 | 1136,97 | 1148,96 | 1260,26 |
|         | Operatif Sıcaklık [°C] | 25,75   | 25,79   | 25,82   | 25,98   | 25,98   | 26,95   |



Şekil 4.23. Doğu cephesi soğutma dönemi SYM-FDM duvar oranlarının analizine ait grafikler

SYM-FDM duvarının doğu cephesinde uygulandığı durumun bina enerji performansına etkisi analiz sonuçları (Çizelge 4.8) ve sonuçlardan elde edilen grafikler (Şekil 4.23) üzerinden değerlendirildiğinde, haziran ayında %100 SYM-FDM uygulamasında bina soğutma yükü yaklaşık 500 kWh düzeyindeyken, %0 oranında (standart duvar) bu değer 600 kWh'nin üzerine çıkarak %20'ye yakın bir artış göstermektedir. Benzer şekilde Temmuz ve Ağustos aylarında da %100 uygulamanın enerji yükü yaklaşık 1000–1050 kWh iken %0 uygulamada yaklaşık 200 kWh daha fazla soğutma yükü kaydedilmiştir.

Operatif sıcaklık değerlendirmesinde ise %100 SYM-FDM uygulamasında iç ortam sıcaklığı 25.6–25.8 °C arasında stabil seyrederken, %0 uygulamada sıcaklıklar 26.0 °C'ye yaklaşmakta olup yaklaşık 0.3–0.4 °C daha yüksek değerlere ulaşmaktadır. SYM-FDM duvarının doğu cephesinde %20 oranda bulunduğu durumda ise enerji yükü ve sıcaklık değerlerinde artış görülmesine rağmen standart duvarla karşılaştırıldığında bina enerji performansını arttırdığı görülmektedir.

#### 4.4. SYM-FDM Duvarının Performans ve Maliyet Bağlamında Optimizasyonu

Bu bölümde bina enerji performans analizi sonucunda dört cephe için %20-100 aralığında %20'lik adımla uygulanan SYM-FDM duvarının her uygulama oranı için elde edilen performans verilerinin maliyet etkinliği bağlamında değerlendirmesi yapılacaktır.

Bu adım da öncelikle dört cephe için %20'lik atan adımlarla uygulanan SYM-FDM duvarının geri ödeme süresinin hesaplanması için ilk yatırım maliyeti, işletim maliyeti belirlenmiştir. İlk yatırım maliyeti için SYM-FDM duvarının ve standart duvarın metrekare

maliyet fiyatının belirlenmesi için çalışma yapılmıştır. Üretici firmadan alınan bilgilere göre duvarı metrekare maliyeti ile ilgili yapılan çalışma Çizelge 4.9'da verilmiştir.

Çizelge 4.9. Standart Duvarının ve SYM-FDM Duvarının metrekare maliyeti

|                                                                                         | Malzeme                  | Metrekarede Kullanım Miktarı  | Metrekare Maliyeti |
|-----------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------|-------------------------------|--------------------|
| FDM DUVARI                                                                              | 4mm Tek Cam              | 1 m x 1m ölçüsünde 2 Adet     | 39,015 TL          |
|                                                                                         | Saydam Yalıtım Malzemesi | 10 litre                      |                    |
|                                                                                         | Sıva                     | 1 m² alan                     |                    |
|                                                                                         | Harman Tuğla             | 39 adet                       |                    |
|                                                                                         | Faz Değiştiren Malzeme   | 39 adet                       |                    |
|                                                                                         | Boya                     | 1 m² alan                     |                    |
| STANDART DUVAR                                                                          | Boya                     | 1 m² alan                     | 1,800 TL           |
|                                                                                         | Sıva                     | 1 m² alan                     |                    |
|                                                                                         | XPS                      | 2 adet 100 x 200 cm levha     |                    |
|                                                                                         | Düşey Delikli Tuğla      | 18 adet - (19 x 29 x 13.5 cm) |                    |
| * Maliyet hesabı 21.04.2025 tarihli Merkez Bankası döviz kuru baz alınarak yapılmıştır. |                          |                               |                    |

Standart Duvar ve SYM-FDM duvarının metrekare maliyetlerinin belirlenmesi ile ilk yatırım maliyet hesabı yapılmıştır. İlk yatırım maliyet hesabı her cephe için %0-%100 aralığındaki %20'lik SYM-FDM uygulaması için yapılmıştır. Geri ödeme süresi için gerekli olan bir diğer mali kalem işletim maliyetidir. İşletim maliyet için soğutma döneminde, soğutma yükünü sistemin COP değerine (3) bölerek elektrik tüketimi (kWh<sub>el</sub>), ısıtma döneminde ise ısıtma yükü (kWh) 1 m<sup>3</sup> doğalgazın alt ısıtma değerine (10,64) bölerek doğalgaz tüketimi hesaplanmıştır. Isıtma ve soğutma dönemi için hesaplanan enerji tüketimleri birim fiyatları ile çarpılarak aylık işletme maliyeti elde edilmiştir. Dört cephenin ısıtma ve soğutma dönemleri için her %20'lik oran için hesaplanan ilk yatırım maliyeti ve işletme maliyeti Çizelge 4.10 ve Çizelge 4.11'de verilmiştir.

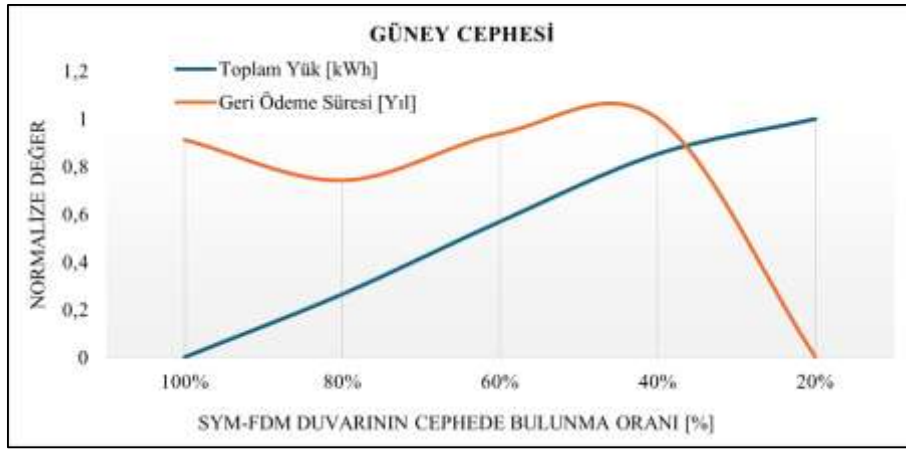
Çizelge 4.10. Güney ve Doğu Cephesinde SYM-FDM duvar oranları ve standart duvar için hesaplanan ilk yatırım maliyeti ve işletme maliyeti değerleri

| GÜNEY CEPHESİ  |                 |                      |                      |                    |                   |                      |                    |                   |                      |                    |                   |
|----------------|-----------------|----------------------|----------------------|--------------------|-------------------|----------------------|--------------------|-------------------|----------------------|--------------------|-------------------|
| İSITMA DÖNEMİ  |                 | İlk Yatırım Maliyeti | Aralık               |                    |                   | Ocak                 |                    |                   | Şubat                |                    |                   |
|                |                 |                      | Isıtma Yüğü [kWh/ay] | m <sup>3</sup> /ay | İşletim Maliyet i | Isıtma Yüğü [kWh/ay] | m <sup>3</sup> /ay | İşletim Maliyet i | Isıtma Yüğü [kWh/ay] | m <sup>3</sup> /ay | İşletim Maliyet i |
|                | 100%            | 967796,10            | 975,88               | 91,72              | 733,74            | 1134,64              | 106,64             | 853,11            | 731,08               | 68,71              | 549,68            |
|                | 80%             | 785823,75            | 1072,28              | 100,78             | 806,23            | 1239,79              | 116,52             | 932,17            | 800,93               | 75,28              | 602,20            |
|                | 60%             | 654073,65            | 1190,92              | 111,93             | 895,43            | 1375,10              | 129,24             | 1033,91           | 895,16               | 84,13              | 673,05            |
|                | 40%             | 498635,10            | 1301,85              | 122,35             | 978,83            | 1482,69              | 139,35             | 1114,80           | 975,59               | 91,69              | 733,53            |
|                | 20%             | 344817,00            | 1348,12              | 126,70             | 1013,62           | 1527,45              | 143,56             | 1148,46           | 1003,24              | 94,29              | 754,32            |
|                | %0(Standart D.) | 192510,00            | 1620,93              | 152,34             | 1218,74           | 1790,40              | 168,27             | 1346,17           | 1234,36              | 116,01             | 928,09            |
| SOĞUTMA DÖNEMİ |                 |                      | Haziran              |                    |                   | Temmuz               |                    |                   | Ağustos              |                    |                   |
|                |                 | İlk Yatırım Maliyeti | Soğutma Yüğü         | kWh.e l            | İşletim Maliyet i | Soğutma Yüğü         | kWh.e l            | İşletim Maliyet i | Soğutma Yüğü         | kWh.e l            | İşletim Maliyet i |
|                | 100%            | 967796,10            | 54,22                | 118,07             | 472,29            | 884,19               | 294,73             | 1178,91           | 949,05               | 316,35             | 1265,40           |
|                | 80%             | 785823,75            | 15,46                | 138,49             | 553,95            | 961,21               | 320,40             | 1281,61           | 1023,79              | 341,26             | 1365,05           |
|                | 60%             | 654073,65            | 85,75                | 161,92             | 647,67            | 1030,82              | 343,61             | 1374,43           | 1093,41              | 364,47             | 1457,88           |
|                | 40%             | 498635,10            | 41,64                | 180,55             | 722,18            | 1112,24              | 370,75             | 1482,98           | 1176,27              | 392,09             | 1568,36           |
|                | 20%             | 344817,00            | 81,19                | 193,73             | 774,92            | 1167,23              | 389,08             | 1556,30           | 1232,58              | 410,86             | 1643,44           |
|                | %0(Standart D.) | 192510,00            | 01,44                | 200,48             | 801,92            | 1194,64              | 398,21             | 1592,86           | 1260,26              | 420,09             | 1680,34           |
| DOĞU CEPHESİ   |                 |                      |                      |                    |                   |                      |                    |                   |                      |                    |                   |
| İSITMA DÖNEMİ  |                 | İlk Yatırım Maliyeti | Aralık               |                    |                   | Ocak                 |                    |                   | Şubat                |                    |                   |
|                |                 |                      | Isıtma Yüğü [kWh/ay] | m <sup>3</sup> /ay | İşletim Maliyet i | Isıtma Yüğü [kWh/ay] | m <sup>3</sup> /ay | İşletim Maliyet i | Isıtma Yüğü [kWh/ay] | m <sup>3</sup> /ay | İşletim Maliyet i |
|                | 100%            | 919867,50            | 1020,29              | 95,89              | 767,13            | 1183,39              | 111,22             | 889,77            | 758,50               | 71,29              | 570,30            |
|                | 80%             | 773894,70            | 1098,73              | 103,26             | 826,11            | 1268,05              | 119,18             | 953,42            | 813,85               | 76,49              | 611,92            |
|                | 60%             | 626595,30            | 1179,87              | 110,89             | 887,12            | 1354,83              | 127,33             | 1018,67           | 871,27               | 81,89              | 655,09            |
|                | 40%             | 481492,80            | 1243,99              | 116,92             | 935,33            | 1428,13              | 134,22             | 1073,78           | 921,35               | 86,59              | 692,74            |
|                | 20%             | 230785,65            | 1303,97              | 122,55             | 980,43            | 1486,84              | 139,74             | 1117,92           | 959,62               | 90,19              | 721,52            |
|                | %0(Standart D.) | 192510,00            | 1620,93              | 152,34             | 1218,74           | 1790,40              | 168,27             | 1346,17           | 1234,36              | 116,01             | 928,09            |
| SOĞUTMA DÖNEMİ |                 |                      | Haziran              |                    |                   | Temmuz               |                    |                   | Ağustos              |                    |                   |
|                |                 | İlk Yatırım Maliyeti | Soğutma Yüğü         | kWh.e l            | İşletim Maliyet i | Soğutma Yüğü         | kWh.e l            | İşletim Maliyet i | Soğutma Yüğü         | kWh.e l            | İşletim Maliyet i |
|                | 100%            | 919867,50            | 442,89               | 147,63             | 590,51            | 1014,06              | 338,02             | 1352,08           | 1090,86              | 363,62             | 1454,47           |
|                | 80%             | 773894,70            | 447,50               | 149,17             | 596,66            | 1021,14              | 340,38             | 1361,52           | 1095,99              | 365,33             | 1461,32           |
|                | 60%             | 626595,30            | 481,98               | 160,66             | 642,64            | 1055,73              | 351,91             | 1407,64           | 1127,81              | 375,94             | 1503,75           |
|                | 40%             | 481492,80            | 492,07               | 164,02             | 656,09            | 1066,17              | 355,39             | 1421,56           | 1136,97              | 378,99             | 1515,96           |
|                | 20%             | 230785,65            | 504,53               | 168,18             | 672,71            | 1081,48              | 360,49             | 1441,98           | 1148,96              | 382,99             | 1531,95           |
|                | %0(Standart D.) | 192510,00            | 601,44               | 200,48             | 801,92            | 1194,64              | 398,21             | 1592,86           | 1260,26              | 420,09             | 1680,34           |

Çizelge 4.11. Kuzey ve Batı Cephesinde SYM-FDM duvar oranları ve standart duvar için hesaplanan ilk yatırım maliyeti ve işletme maliyeti değerleri

| KUZEY CEPHESİ  |                 |                      |                      |                    |                   |                      |                    |                   |                      |                    |                   |
|----------------|-----------------|----------------------|----------------------|--------------------|-------------------|----------------------|--------------------|-------------------|----------------------|--------------------|-------------------|
|                |                 | İlk Yatırım Maliyeti | Aralık               |                    |                   | Ocak                 |                    |                   | Şubat                |                    |                   |
|                |                 |                      | Isıtma Yüğü [kWh/ay] | m <sup>3</sup> /ay | İşletim Maliyet i | Isıtma Yüğü [kWh/ay] | m <sup>3</sup> /ay | İşletim Maliyet i | Isıtma Yüğü [kWh/ay] | m <sup>3</sup> /ay | İşletim Maliyet i |
| ISITMA DÖNEMİ  | 100%            | 1030157,55           | 1119,85              | 105,25             | 841,99            | 1278,87              | 120,19             | 961,56            | 825,62               | 77,60              | 620,77            |
|                | 80%             | 861609,60            | 1189,88              | 111,83             | 894,65            | 1356,69              | 127,51             | 1020,07           | 878,92               | 82,61              | 660,84            |
|                | 60%             | 690792,75            | 1273,49              | 119,69             | 957,51            | 1449,94              | 136,27             | 1090,18           | 943,70               | 88,69              | 709,55            |
|                | 40%             | 521092,35            | 1336,87              | 125,65             | 1005,16           | 1517,20              | 142,59             | 1140,75           | 990,63               | 93,10              | 744,83            |
|                | 20%             | 352508,40            | 1376,24              | 129,35             | 1034,76           | 1555,33              | 146,18             | 1169,42           | 1016,53              | 95,54              | 764,30            |
|                | %0(Standart D.) | 192510,00            | 1620,93              | 152,34             | 1218,74           | 1790,40              | 168,27             | 1346,17           | 1234,36              | 116,01             | 928,09            |
|                |                 |                      |                      |                    |                   |                      |                    |                   |                      |                    |                   |
| SOĞUTMA DÖNEMİ |                 |                      | Haziran              |                    |                   | Temmuz               |                    |                   | Ağustos              |                    |                   |
|                |                 | İlk Yatırım Maliyeti | Soğutma Yüğü         | kWh.e l            | İşletim Maliyet i | Soğutma Yüğü         | kWh.e l            | İşletim Maliyet i | Soğutma Yüğü         | kWh.e l            | İşletim Maliyet i |
|                | 100%            | 1030157,55           | 465,06               | 155,02             | 620,07            | 1033,78              | 344,59             | 1378,38           | 1111,41              | 370,47             | 1481,88           |
|                | 80%             | 861609,60            | 471,98               | 157,33             | 629,30            | 1036,51              | 345,50             | 1382,02           | 1114,58              | 371,53             | 1486,10           |
|                | 60%             | 690792,75            | 517,75               | 172,58             | 690,33            | 1090,43              | 363,48             | 1453,90           | 1166,75              | 388,92             | 1555,66           |
|                | 40%             | 521092,35            | 537,24               | 179,08             | 716,32            | 1120,37              | 373,46             | 1493,82           | 1193,92              | 397,97             | 1591,89           |
|                | 20%             | 352508,40            | 578,27               | 192,76             | 771,03            | 1166,29              | 388,76             | 1555,05           | 1234,20              | 411,40             | 1645,61           |
|                | %0(Standart D.) | 192510,00            | 601,44               | 200,48             | 801,92            | 1194,64              | 398,21             | 1592,86           | 1260,26              | 420,09             | 1680,34           |
| BATI CEPHESİ   |                 |                      |                      |                    |                   |                      |                    |                   |                      |                    |                   |
|                |                 | İlk Yatırım Maliyeti | Aralık               |                    |                   | Ocak                 |                    |                   | Şubat                |                    |                   |
|                |                 |                      | Isıtma Yüğü [kWh/ay] | m <sup>3</sup> /ay | İşletim Maliyet i | Isıtma Yüğü [kWh/ay] | m <sup>3</sup> /ay | İşletim Maliyet i | Isıtma Yüğü [kWh/ay] | m <sup>3</sup> /ay | İşletim Maliyet i |
| ISITMA DÖNEMİ  | 100%            | 682233,30            | 1171,82              | 110,13             | 881,06            | 1321,94              | 124,24             | 993,94            | 883,86               | 83,07              | 664,56            |
|                | 80%             | 581398,65            | 1244,64              | 116,98             | 935,82            | 1406,10              | 132,15             | 1057,21           | 940,78               | 88,42              | 707,35            |
|                | 60%             | 482034,60            | 1318,01              | 123,87             | 990,98            | 1488,36              | 139,88             | 1119,07           | 995,97               | 93,61              | 748,85            |
|                | 40%             | 382670,55            | 1363,03              | 128,10             | 1024,83           | 1536,68              | 144,43             | 927,59            | 1026,43              | 96,47              | 771,75            |
|                | 20%             | 282190,05            | 1393,44              | 130,96             | 1047,70           | 1567,22              | 147,30             | 1178,36           | 1045,36              | 98,25              | 785,99            |
|                | %0(Standart D.) | 192510,00            | 1620,93              | 152,34             | 1218,74           | 1790,40              | 168,27             | 1346,17           | 1234,36              | 116,01             | 928,09            |
|                |                 |                      |                      |                    |                   |                      |                    |                   |                      |                    |                   |
| SOĞUTMA DÖNEMİ |                 |                      | Haziran              |                    |                   | Temmuz               |                    |                   | Ağustos              |                    |                   |
|                |                 | İlk Yatırım Maliyeti | Soğutma Yüğü         | kWh.e l            | İşletim Maliyet i | Soğutma Yüğü         | kWh.e l            | İşletim Maliyet i | Soğutma Yüğü         | kWh.e l            | İşletim Maliyet i |
|                | 100%            | 682233,30            | 455,49               | 151,83             | 607,32            | 1026,77              | 342,26             | 1369,02           | 1103,24              | 367,75             | 1470,99           |
|                | 80%             | 581398,65            | 494,40               | 164,80             | 659,20            | 1065,31              | 355,10             | 1420,41           | 1138,90              | 379,63             | 1518,54           |
|                | 60%             | 482034,60            | 528,81               | 176,27             | 705,08            | 1102,61              | 367,54             | 1470,15           | 1173,74              | 391,25             | 1564,99           |
|                | 40%             | 382670,55            | 555,53               | 185,18             | 740,70            | 1132,57              | 377,52             | 1510,09           | 1201,80              | 400,60             | 1602,40           |
|                | 20%             | 282190,05            | 600,03               | 200,01             | 800,04            | 1189,27              | 396,42             | 1585,69           | 1256,76              | 418,99             | 1675,69           |
|                | %0(Standart D.) | 192510,00            | 601,44               | 200,48             | 801,92            | 1194,64              | 398,21             | 1592,86           | 1260,26              | 420,09             | 1680,34           |

Çizelge 4.10 ve Çizelge 4.11’de hesaplanan işletim maliyetlerinin toplamının ilk yatırım maliyeti toplamına bölünmesi ile her SYM-FDM duvar oranı için Geri Ödeme Süresi hesabı yapılmıştır. Geri ödeme süresi ile performans değerlerinin grafik üzerinden karşılaştırılması ile de her cephe için maliyet-performans anlamında uygulanabilir SYM-FDM oranı üzerine değerlendirmeler yapılmıştır. Grafik üzerinden bu değerlendirmeleri yapabilmek için farklı ölçekteki geri ödeme süresi verisi ve performans verisi min-maks normalizasyonu ile veri kümesi 0-1 aralığına dönüştürülerek aynı ölçeğe getirilmiştir. Bu işlemle her cephe için belirlenen toplam enerji tüketimi ve geri ödeme süresi verileri grafik üzerinde karşılaştırılarak yorumlanmıştır.



Şekil 4.24. SYM-FDM Güney cephesinde bulunma oranı [%]

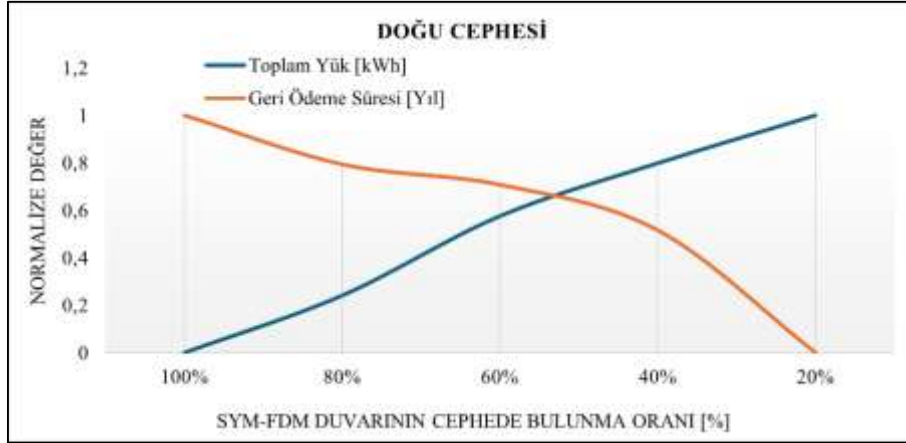
Güney cephesine ait normalize edilmiş toplam enerji yükü ve geri ödeme süresinin karşılaştırıldığı grafikte (Şekil 4.24), SYM-FDM duvarının cephedeki kullanım oranına bağlı olarak enerji performansı ile ekonomik geri dönüş arasındaki etkileşim açık biçimde gözlemlenmektedir. Grafik verilerine göre, SYM-FDM oranı azaldıkça toplam enerji yükü artış eğilimi göstermekte; özellikle %100 uygulamada en düşük normalize enerji yükü değerine ulaşılmaktadır. Bu durum, güney cephesinin yüksek güneş kazanım potansiyeline sahip olması nedeniyle, SYM-FDM sisteminin bu cephedeki ısı kaybını azaltarak kış aylarında pasif ısı kazancı sağladığını ve böylece enerji tüketimini minimize ettiğini göstermektedir. Geri ödeme süresi eğrisi incelendiğinde, %100 uygulamada ekonomik geri dönüş bina ömrünün de üstünde kalmakta, bu sürenin %35-40 uygulama oranlarında en yüksek noktaya ulaştığı, ardından ise hızlı bir düşüşle %20 oranında minimum seviyeye indiği görülmektedir. Bu durum, yatırım alanı azaldıkça geri ödeme süresinin yapay olarak kısaldığını ancak bu noktada enerji tasarrufu katkısının da sınırlı kaldığını göstermektedir.

Dolayısıyla, grafik, enerji verimliliği ile ekonomik geri dönüş arasında bir denge kurularak optimum SYM-FDM uygulama oranının %35-40 aralığında oluştuğunu ortaya koymaktadır.



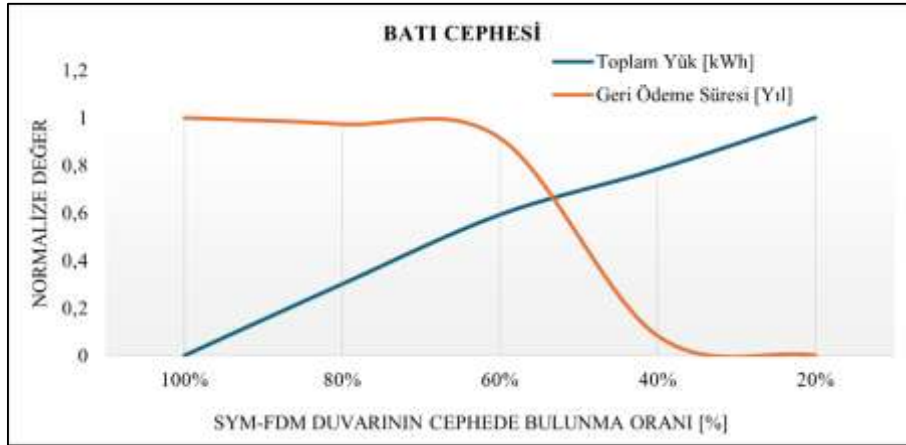
Şekil 4.25. SYM-FDM Kuzey cephesinde bulunma oranı [%]

Kuzey cephesine ait normalize edilmiş toplam enerji yükü ve geri ödeme süresi eğrilerinin karşılaştırıldığı grafik verilerine göre (Şekil 4.25), SYM-FDM oranı azaldıkça toplam enerji yükü sürekli olarak artmakta; özellikle %100 uygulama durumunda en düşük enerji tüketimi elde edilirken, %20 uygulamada bu değer maksimum seviyeye ulaşmaktadır. Bu durum, kuzey cephesinin doğrudan güneş kazancına maruz kalmamasına rağmen, SYM-FDM sisteminin ısı kayıplarını sınırlayıcı etkisi sayesinde ısıtma yüklerini %18 oranında azalttığını göstermektedir. Başka bir açıdan, geri ödeme süresi eğrisi SYM-FDM oranı azaldıkça doğrusal olmayan bir şekilde düşüş göstermektedir; %100 uygulama durumunda normalize geri ödeme süresi maksimum seviyede iken, %20 uygulamada minimum düzeye inmektedir. Bu ters yönlü eğriler, enerji performansı artarken yatırımın geri dönüş süresinin uzadığına, buna karşın daha düşük oranlarda yatırımın ekonomik geri dönüşünün hızlandığına ancak enerji verimliliğinin azaldığına işaret etmektedir. Özellikle %50 oranında toplam yük ile geri ödeme süresi eğrilerinin birbirine en yakınlaştığı gözlemlenmekte, bu nokta kuzey cephesi için performans ve ekonomi arasında dengeli bir uygulama aralığını işaret etmektedir. Sonuç olarak, kuzey cephede %100 uygulama enerji açısından en verimli çözüm olsa da %50 uygulama oranı her iki kriterin grafik üzerinde kesişim gösterdiği optimum noktayı temsil etmektedir.



Şekil 4.26. SYM-FDM Doğu cephesinde bulunma oranı [%]

Doğu cephesine ait normalize edilmiş toplam enerji yükü ve geri ödeme süresi eğrilerinin karşılaştırıldığı grafikte (Şekil 4.26), SYM-FDM duvar uygulama oranının artmasıyla birlikte enerji performansı ve ekonomik geri dönüş arasında ters yönlü bir ilişki gözlemlenmektedir. Grafik verilerine göre, SYM-FDM oranı azaldıkça toplam enerji yükü artmakta, %100 uygulama durumunda minimum enerji tüketimi sağlanmaktadır. Bu durum, sabah saatlerinde doğrudan güneş ışınımına maruz kalan doğu cephesinde SYM-FDM sisteminin pasif ısı kazançlarını dengeleyerek ısıtma yükünü azalttığını göstermektedir. Başka bir açıdan, geri ödeme süresi SYM-FDM oranı azaldıkça önemli bir düşüş göstermektedir. Bu durum da yatırım alanı azaldıkça toplam yatırım maliyetinin düştüğünü ve geri dönüş süresinin kısaldığını ortaya koymaktadır. Eğriler birlikte incelendiğinde, %50-60 oranları arasında toplam yük ve geri ödeme sürelerinin normalize değerleri birbirine en çok yaklaşmakta, bu nokta enerji verimliliği ile ekonomik geri dönüş arasındaki dengeyi temsil etmektedir. Özellikle %55 uygulama oranı, enerji tasarrufu açısından kayda değer bir etki yaratırken ekonomik geri ödeme süresinde de aşırı bir artışa neden olmamaktadır. Bu bağlamda, doğu cephesinde %50-60 aralığındaki oranda SYM-FDM uygulaması, hem performans hem de ekonomik geri dönüş açısından optimize edilmiş bir tasarım çözümünü ifade etmektedir.



Şekil 4.27. SYM-FDM Batı cephesinde bulunma oranı [%]

Batı cephesine ait normalize edilmiş toplam enerji yükü ve geri ödeme süresinin karşılaştırıldığı grafikte (Şekil 4.27), SYM-FDM duvar uygulama oranına bağlı olarak enerji performansı ve yatırım geri dönüşü arasındaki ilişki ortaya konmuştur. Grafik verilerine göre, SYM-FDM oranı arttıkça toplam enerji yükü istikrarlı şekilde azalmakta; özellikle %100 uygulama durumunda minimum enerji tüketimi değerine ulaşılmaktadır. Bu durum, batı cephesinin öğleden sonra yoğun güneş ışınlamına maruz kalması nedeniyle SYM-FDM sisteminin hem ısıtma hem de soğutma sezonunda ısı kazançlarını etkin bir şekilde dengelediğini ve iç ortam yüklerini azalttığını göstermektedir. Ancak geri ödeme süresi eğrisinde dikkat çeken bir durum mevcuttur: %100, %80 ve %60 uygulama oranlarında geri ödeme süresi normalize edilmiş olarak yüksek seviyelerde seyrederken, %40 oranından itibaren bu değer hızlı bir düşüş göstererek %20 uygulamada minimum seviyeye ulaşmaktadır. Bu ani düşüş, uygulama alanı azaldıkça yatırım maliyetinin hızla düştüğünü, ancak enerji kazancının buna paralel ölçüde azalmadığını, dolayısıyla yatırımın birim bazda daha kısa sürede geri döndüğünü göstermektedir. Bununla birlikte, enerji yükü açısından bakıldığında %20 uygulamada enerji tüketiminin oldukça yüksek kaldığı görülmektedir. Bu çakışım grafiği, performans ve geri ödeme süresi eğrilerinin en fazla yakınlaştığı %50-60 aralığındaki bir uygulama oranının, batı cephesi için enerji verimliliği ve ekonomik geri dönüş açısından en dengeli ve optimum çözüm olduğunu göstermektedir.

#### 4.5. Bulguların Değerlendirilmesi ve Tartışma

Çalışma kapsamında elde edilen sayısal, deneysel ve simülasyon bulguları yenilikçi SYM-FDM duvar sisteminin ısıl performansına etkisi açısından değerlendirilmiştir. Yenilikçi duvar

sisteminin mimari bütünlük içindeki uygulanabilirliğini, enerji etkinliğini ve ekonomik geri dönüş potansiyelini çok boyutlu olarak irdelemek amacıyla elde edilen bulgular üç temel başlık altında tartışmaya açılmıştır: tasarım, performans ve maliyet. Tasarım başlığı altında, duvar sisteminin fiziksel bileşenleri, cephe yönelimi ve uygulama oranlarına bağlı olarak ortaya çıkan mimari ve yapısal etkiler tartışılmış; performans başlığında, iç ortam sıcaklıkları, yüzey sıcaklıkları ve enerji yükleri üzerinden sistemin ısıl tepkisi değerlendirilmiştir. Maliyet başlığı ise, sistemin uygulama alanına ve enerji kazanım potansiyeline göre geri ödeme süresi temelinde irdelenmiştir. Böylelikle, SYM-FDM duvar sisteminin bütüncül bir bakış açısıyla değerlendirilmesi sağlanarak, uygulayıcılar ve tasarımcılar için karar verme süreçlerine katkı sunulması hedeflenmiştir.

#### 4.5.1. Tasarım

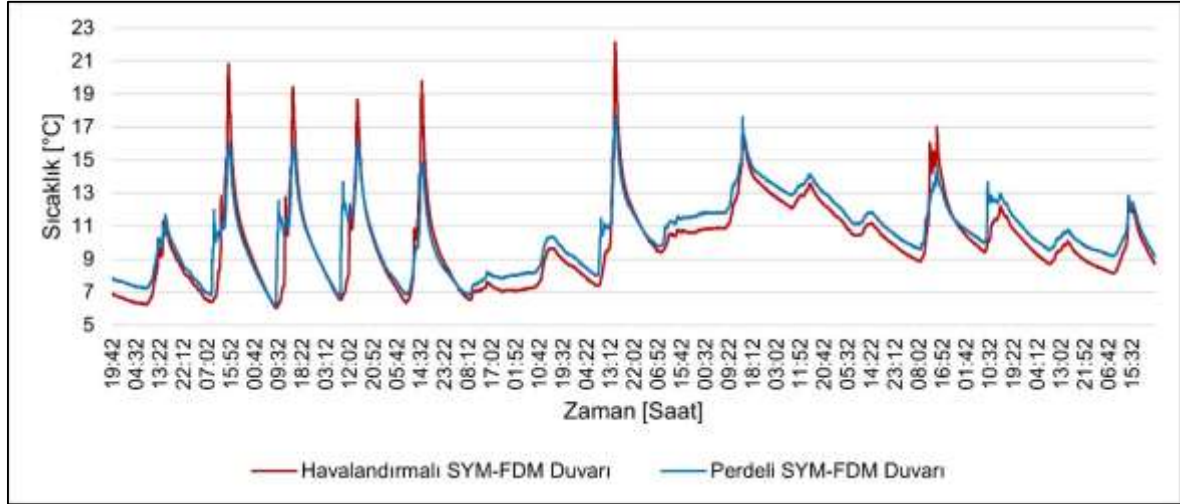
Bu başlık altında, yenilikçi bir yapı elemanı olan SYM-FDM duvar sisteminin mimari, malzeme ve sistem düzeyinde nasıl kurgulandığı ve bu kurgunun tasarım süreçlerine getirdiği avantajlar ile sınırlamalar tartışılmaktadır. Saydam yalıtım malzemesinin yüksek ısıyı geçirgenliği ile sunduğu yüksek termal yalıtım kapasitesi, faz değiştiren malzemenin (FDM) ısıtma sezonunda etkin çalışmasını desteklemektedir. Çalışma kapsamında deneysel veriler ve bina ölçeğinde gerçekleştirilen enerji performans analizleri saydam yalıtım malzemesi ve faz değiştirilen malzemenin birlikte kullanımına dayanan tasarım kararını doğrulamaktadır.

Deneysel çalışmada Ankara ilinin iklim koşullarında yaz ve kış döneminde yüksek performans gösterecek farklı SYM-FDM duvar uygulamaları inşa edilmiştir ve en yüksek performans gösteren duvar tipinin bina ölçeğindeki performansını değerlendirmek için bina enerji simülasyon çalışmaları yapılmıştır. Bu duruma tasarım başlığından bakıldığında, SYM-FDM duvarının farklı tiplerde uygulanabiliyor olması, uygulanacağı iklim bölgesine farklı biçimlerde optimize edilebilmesi anlamında tasarım esnekliği sunması açısından önemlidir.

Ankara ili için en yüksek performans gösteren SYM-FDM uygulamasının belirlenmesi için yapılan deneysel çalışmalar sonucunda hem ısıtma hem de soğutma döneminde yüksek performans gösteren perdeli SYM-FDM duvarı seçilmiştir. Performans olarak diğer duvar uygulamalarından daha çok öne çıkmasının sebebi duvar tasarımında iklimsel koşullara

yanıt veren pasif tasarım stratejilerinin uygulanması olmuştur. Soğutma döneminde SYM-FDM duvar uygulamasına göre daha yüksek performans göstermesi bu durumu doğrulamaktadır. SYM-FDM sistemine entegre edilen perde, gün içerisinde gelen kısa dalga boylu radyasyonu kontrol ederek güneş kazançlarını sınırlamaktadır; gece saatlerinde ise açılarak FDM'nin dış ortam ile daha fazla ısı alışverişine girmesine imkân tanımaktadır. Bu dinamik kontrol mekanizması, FDM'nin etkin faz değişimi yapmasına olanak tanımakta, ısı depolama ve salınım süreçlerini optimize etmektedir. Perdeli sistem, aynı zamanda ısı geçişini düzenleyerek gün içinde iç ortam sıcaklık salınımını azaltarak termal konforu iyileştirmektedir. Buna karşın, gölgeleme elemanı bulunmayan SYM-FDM duvarı, yüksek güneş kazanımı nedeniyle FDM'nin sürekli eriyik halde kalmasına neden olarak sistemin çalışmasını olumsuz etkilemiştir.

Havalandırılmalı SYM-FDM duvarı incelendiğinde soğutma döneminde güneş etkisinin yüksek olduğu gündüz saatlerinde saydam yalıtım ünitesi ve duvar arasındaki ısınan hava duvar yüzeyinde bulunan kapakçıkların açılması ile tahliye edilmiştir. Bu sayede erime sıcaklığının üzerinde uzun süre kalmasını önleyerek termal yastık etkisinin optimize edilmesi sağlanmıştır. Bu sayede iç mekâna ısı geçişi azaltılarak perdeli SYM-FDM duvarına göre 0,8°C daha düşük duvar iç yüzey sıcaklıkları kaydedilmiştir. Havalandırılmalı SYM-FDM duvarı soğutma dönemindeki performansını ısıtma döneminde devam ettirememekte hatta diğer uygulamalarla kıyaslandığında en düşük performans eğrisi çizmektedir. Buradaki durum; gündüz saatlerinde hava kapakçıkların açılması ile iç mekana doğru ısı iletimi gerçekleşmekte ve FDM entegreli termal duvar önünde ısı birikimi olmadığı için yüzey sıcaklığı (Şekil 59) düşmektedir. Gece saatlerinde ise kapakçıklar kapatılmakta ve doğal konveksiyon etkisi sınırlandırılmaktadır. Gün boyunca boşlukta hava birikmediği konveksiyonla iç ortamla hava boşluğu arasında sürekli bir akım olduğu için duvar önü sıcaklık diğer uygulamalardan daha düşük ölçülmekte ve FDM erken saatte hal değişimi göstermektedir. Bu durumda da duvar iç yüzey sıcaklığında ve ortam sıcaklığında etkisi olmamaktadır.



Şekil 4.28. Aralık ayına ait Farklı tipte SYM-FDM duvar uygulamalarının duvar dış yüzey sıcaklıkları karşılaştırması

FDM entegreli duvarın boşluğa bakan yüzüne ait ölçüm verileri Şekil 4.28'deki grafikte verilmiştir. Havalandırılmalı SYM-FDM duvarının dış yüzeyi sıcaklık değerlerinin perdeli SYM-FDM duvarı dış yüzey sıcaklık değerlerine göre ortalama 1°C daha düşük seyrettiği kaydedilmiştir. Yapılan bu tartışma, iklime, kullanılan malzemelerin özelliklerine, uygulama amacına uygun olarak alınacak tasarım kararlarının performansı doğrudan etkilediğini ortaya koymaktadır.

SYM-FDM sisteminin tasarımını etkileyen bir diğer önemli değişken, bu sistemin binanın farklı cephelerinde hangi oranda uygulanacağı olmuştur. Bina ölçeğinde gerçekleştirilen enerji performansı analizleri sonucunda, perdeli Şeffaf Yalıtımlı Malzeme ve Faz Değiştiren Malzeme duvar sisteminin güney cephede %35-40, kuzey cephede %50, doğu ve batı cephelerinde %50-60 oranında uygulanmasının optimum sonuçlar verdiği belirlenmiştir. Tasarım perspektifinden bakıldığında, SYM-FDM duvarının her cephede yüzeysel olarak homojen değil, yönlendirme ve ışıma farklılıkları dikkate alınarak belirlenen optimum değer aralığındaki bir değerde uygulanmalıdır. Her cephe için belirlenen SYM-FDM duvar oranında düşük optimum oran ile güney cephesi dikkat çekmektedir. Literatürde faz değiştiren malzeme entegreli duvar örneklerinin çoğunlukla güney cepheye entegre edilerek performans analizleri yapılmıştır. Yüksek güneş ışıma şiddetine maruz kalan bu cephe %38 gibi diğer cephelerden daha az bir uygulama oranı ile yazın soğutma yükünü azaltırken, kışın ısı kazancını da optimize etmiştir. Kuzey cephesinde düşük güneş ışıma şiddeti ile daha düşük oranla optimum sonuca ulaşılması beklenirken güney cephesinden daha yüksek bir

oran tespit edilmiştir. Önerilen duvar sistemi düşük U değeri ile önemli düzeyde yalıtım sağlamaktadır. Bu nedenle kış döneminde bu cepheden kaynaklanan ısı kaçışlarını ciddi oranda azaltmıştır. Kış güneşinin radyasyon etkisi ile de sisteme pasif yöntemle katkı sağlaması ile de performansın artmasında etkili olmuştur. Yazın ise daha düşük güneş ışıyım şiddeti FDM'nin termal döngüye girmesini kolaylaştırmış ve soğutma yükünü azaltmada olumlu bir etki göstermiştir. Doğu ve batı cephelerinde kuzey cepheye kıyasla kış güneşinden daha fazla faydalanarak FDM'nin termal döngüye girmesini kolaylaştırması, yaz döneminde ise güney cepheye kıyasla daha az güneş ışıyım şiddetine maruz kalması bina enerji performansının daha çok artmasında etkili olmuştur. Bina enerji performansının artması ile işletim maliyeti azaltarak geri ödeme süresini düşürmüştür. Bunun sonucunda da kuzey ve güney cephelere göre daha yüksek optimum oran aralığında uygulanmasının daha yüksek verimlilik sağladığı sonucuna ulaşılmıştır.

SYM-FDM duvar sisteminin performans etkisi FDM'nin iklime uygun seçilmesi ile doğrudan ilgilidir. Bu doğrultuda, FDM'nin hedeflenen bölgeye uygun olarak seçilmesi kritik bir tasarım kararını oluşturmaktadır. Bu çalışmada, Ankara ilinin karasal iklim koşulları dikkate alınarak uygun FDM malzemesi seçimi, matematiksel analizler sonucunda elde edilen sıcaklık aralıkları doğrultusunda gerçekleştirilmiştir. Yaz dönemi için RT22HC, kış dönemi için ise RT18HC malzemesinin uygun olduğu belirlenmiş; buna bağlı olarak, deneysel prototipin tasarımında bu iki malzemenin %50 oranında entegre edildiği hibrit bir duvar yapısı geliştirilmiştir.

Sonuç olarak, SYM-FDM duvar sistemi sadece enerji verimliliğini artıran bir yapı elemanı değil, aynı zamanda mimari tasarıma entegre edilebilen, iklime ve yöneline göre esnek şekilde uyarlanabilen ve tasarım sürecine önemli girdi sağlayan bütüncül bir çözümdür.

#### **4.5.2. Performans**

Saydam yalıtımlı gizli ısı depolama duvar sisteminin termal performansı hem deneysel ölçümler hem de bina ölçeğindeki enerji simülasyonları doğrultusunda kapsamlı şekilde değerlendirilmiştir. Deneysel çalışmalarda, gölgeleme elemanının aktif kontrol mekanizması sayesinde, özellikle soğutma sezonunda güneş ışıyımının yüksek olduğu saatlerde sistemin aşırı ısınmasını önlediği, gece saatlerinde ise FDM'nin yeniden hal değiştirmesine olanak sağlayarak performansı artırdığı gözlemlenmiştir. Isıtma sezonunda

ise, perde gündüz açık ve gece kapalı konumda olacak şekilde yönetildiğinde, güneş kazançlarının iç mekâna yönlendirilmesi sağlanmış, buna karşın gece ısı kayıpları sınırlandırılarak iç ortam sıcaklık dalgalanmaları azaltılmıştır. Bu adaptif davranış, perdeli SYM-FDM sisteminin ısıtma döneminde standart duvara kıyasla ortalama %18, soğutma döneminde ise ortalama %5 daha yüksek performans göstermektedir. Aralık ve temmuz aylarında standart duvar SYM-FDM duvarında en yüksek ve en düşük kaydedilen duvar iç yüzey sıcaklıkları Çizelge 4.12’de verilmiştir.

Çizelge 4.12. Aralık ve Temmuz Döneminde Standart Duvar ve SYM-FDM Duvarının İç yüzeyinde kaydedilen sıcaklık değerleri

|                | SYM-FDM Duvarı    |                   | STANDART DUVAR    |                   |
|----------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
|                | Min. Sıcaklık [°] | Mak. Sıcaklık [°] | Min. Sıcaklık [°] | Mak. Sıcaklık [°] |
| Isıtma Dönemi  | 6,42              | 14,20             | 5,42              | 11,85             |
| Soğutma Dönemi | 24,77             | 36,90             | 26,24             | 38,60             |

Bina ölçeğinde yapılan cephe bazlı enerji performans analizleri, bina enerji yükü ve operatif sıcaklıklar üzerinden değerlendirilmiştir. Güney cephesinde SYM-FDM oranı arttıkça hem ısıtma hem de soğutma yüklerinde belirgin azalma sağlanmış, %100 uygulama durumunda iç ortam sıcaklığı kış aylarında ortalama 19 °C’ye yaklaşarak konfor koşullarına en yakın değerleri sunmuştur. Yaz döneminde ise aynı oranda uygulama ile operatif sıcaklıklar yaklaşık 25 °C seviyesinde dengelenmiş, %0 uygulamaya göre ortalama 1,5°C daha düşük sıcaklıklar kaydedilmiştir. Doğu cephesinde sabah güneş kazancının etkisiyle SYM-FDM sistemi, ısıtma döneminde ısı kayıplarını azaltmış ve özellikle %80–100 uygulamalarda operatif sıcaklıklar 18,8–19 °C aralığında ölçülmüştür. Yaz döneminde ise %100 uygulamada yaklaşık 100–150 kWh soğutma yükü tasarrufu sağlanmış ve iç sıcaklıklar 25,5 °C seviyesinde korunmuştur. Batı cephesinde, yüksek öğleden sonra ışıının etkisiyle yaz döneminde SYM-FDM sisteminin enerji yükü üzerindeki etkisi en belirgin şekilde hissedilmiş; %100 uygulamada Haziran–Ağustos ayları boyunca ortalama 200 kWh’ye kadar enerji tasarrufu elde edilmiştir. Aynı zamanda operatif sıcaklıklar 25–25,5 °C düzeyinde sabitlenmiştir. Isıtma döneminde de %60 üzeri uygulamalarda sıcaklıklar 19 °C’ye yakın tutulmuştur. Kuzey cephesi ise doğrudan güneş ışıını almıdığı için yaz aylarında enerji yükü üzerindeki etkisi sınırlı kalmış, ancak kış aylarında SYM-FDM sistemi ısı kayıplarını azaltarak ısıtma yüklerini düşürmüş ve operatif sıcaklıkları yaklaşık 1 °C iyileştirmiştir. Tüm cepheler birlikte değerlendirildiğinde, SYM-FDM sistemi bina enerji

performansını artırmakta ve operatif sıcaklıkların yıl boyu konfor aralığında tutulmasına katkı sağlamaktadır.

Bilgin ve Arıcı'nın (2017) çalışmasında, içten dışa doğru 20 mm harç, 40 mm FDM, 200 mm beton, 20 mm harç olarak tasarlanan duvarın performansını matematiksel çalışma ile analiz etmişlerdir. Analiz sonuçları SYM-FDM duvarın sonuçları ile karşılaştırıldığında; Soğutma döneminde FDM entegreli duvarda standart duvara göre yaklaşık 1°C daha az iç yüzey sıcaklık verisi alınmakta, SYM-FDM duvarının deneysel çalışma sonuçları incelendiğinde standart duvara göre ortalama 2°C daha az sıcaklık verisi alınmaktadır. Isıtma döneminde FDM entegreli duvarda standart duvara göre yaklaşık 0.6 – 0.7 °C daha yüksek sıcaklık verisi alınmakta, SYM-FDM duvarında standart duvara göre ortalama 1,5°C daha yüksek iç yüzey sıcaklık verisi alınmaktadır. Bu karşılaştırma, saydam yalıtım malzemesinin ısıtma ve soğutma döneminde FDM'nin performansını destekleyerek performansını neredeyse iki kat iyileştirdiğini ortaya koymaktadır.

Çizelge 4.13. SYM-FDM duvarının performansının yapılan çalışma ile kıyaslanması

|                 | ISITMA DÖNEMİ   |               |                | SOĞUTMA DÖNEMİ   |                 |                  |
|-----------------|-----------------|---------------|----------------|------------------|-----------------|------------------|
|                 | Aralık<br>[kWh] | Ocak<br>[kWh] | Şubat<br>[kWh] | Haziran<br>[kWh] | Temmuz<br>[kWh] | Ağustos<br>[kWh] |
| FDM-Ponza Duvar | 2417,52         | 2538,44       | 1493,4         | 876,74           | 1647,94         | 1480,31          |
| SYM-FDM Duvar   | 1276            | 1454,12       | 952,51         | 517,6            | 1088,87         | 1158,83          |

SYM-FDM duvarının performansa etkisini enerji yükü üzerinden Saylam Canım (2023)'ın çalışmasıyla karşılaştırarak incelenmiştir (Çizelge 4.13). Saylam Canım (2023) tez çalışmasında, %5, %10, %15 oranlarında mikrokapsül FDM'lerin pomza bloğa doğrudan birleştirmiş ve duvarın performansını hem deneysel hem de DesignBuilder programında bina ölçeğinde simülasyon ile analiz etmiştir. FDM entegreli Ponza blok ve SYM-FDM duvarının Ankara ilinin iklim koşullarındaki bina enerji yükü verileri Çizelge 2'de karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Veriler FDM-Ponza entegreli duvarın binanın tüm cephesinde %15 oranında FDM içerdiği durum ile SYM-FDM duvarının tüm cepheleri için belirlenen optimum oran aralığında bulunduğu duruma aittir. Simülasyon verileri incelendiğinde SYM-FDM duvarının ısıtma döneminde ortalama %43 oranında, soğutma döneminde ise ortalama %31 oranında daha iyi performans gösterdiği görülmektedir. Burada SYM-FDM duvarının performansının öne çıkmasının nedeni; SYM'nin yüksek yalıtım, güneş enerjisinden kazanç

sağlaması nedeniyle FDM'nin çalışmasını desteklemesi ve soğutma döneminde gölgeleme elemanı ile radyasyon etkisinin sınırlandırılması ile hem yaz hem de kış döneminde performans gösteren iki ayrı FDM'nin aynı oranda tuğla duvar gövdesine entegre edilmesidir.

SYM-FDM duvarının optimizasyonuna ait çalışma sonuçları incelendiğinde, güney cephesinde %35-40 aralığında, kuzey cephesinde %50 oranında, doğu ve batı cephesinde %55-60 aralığında uygulanan SYM-FDM duvarının yıllık toplam enerji yükünü düşürmede etkili olduğu ve maliyet etkinliği bağlamında da değerlendirildiğinde optimum oran olduğu belirlenmiştir. Belirlenen oran aralığı, sistemin enerji katkısını maksimize ederken, maliyet-performans dengesini koruyan bir optimum değer olarak öne çıkmaktadır. Çizelge 4.13'te FDM entegreli önceki bir çalışma ile her cephesinde optimum oranda SYM-FDM uygulanmış örnek konut binasının performans sonuçlarına ait karşılaştırmada belirlenen bu oranların performans anlamında etkili olduğu görülmektedir. Tüm cephelerde belirlenen oranlarda SYM-FDM duvarının uygulandığı durumda standart duvarlı referans konut binasına göre enerji yükünü ısıtma döneminde ortalama %26, soğutma döneminde ortalama %10 azaltarak her iki dönemde yüksek performans göstermektedir.

#### 4.5.3. Maliyet

SYM-FDM duvar sisteminin ekonomik açıdan değerlendirilmesinde en dikkat çekici unsur, yüksek ilk yatırım maliyetine bağlı olarak ortaya çıkan uzun geri ödeme süresidir. Saydam yalıtım malzemesi (SYM) ve faz değiştiren malzeme (FDM) gibi yüksek performanslı bileşenlerin üretim ve uygulama maliyetlerinin geleneksel yalıtım malzemelerine kıyasla daha yüksek olması, sistemin ilk yatırım maliyetini doğrudan artırmaktadır. Özellikle %100 oranında uygulandığında, uygulama yüzey alanına bağlı olarak maliyetin artması, bu yapı elemanının ekonomik geri dönüşünü geciktirmekte ve geri ödeme süresini ortalama duvar sistemlerinin üzerine taşımaktadır.

Bununla birlikte, elde edilen deneysel ve simülasyon tabanlı veriler, SYM-FDM sisteminin ısıtma ve soğutma sezonlarında enerji yüklerinde anlamlı azalmalar sağladığını, dolayısıyla yüksek enerji tasarruf potansiyeline sahip olduğunu ortaya koymaktadır. Sistem, hem kısa dalga güneş ışıınımını pasif olarak iç mekâna kazandırması hem de FDM'nin gündüz depoladığı ısıyı gece boyunca kontrollü biçimde salarak sıcaklık dalgalanmalarını azaltması

sayesinde, özellikle termal konforun sürdürülebilirliği açısından güçlü bir alternatif sunmaktadır. Bu bağlamda, yüksek ilk yatırım maliyetinin düşmesi durumunda enerji tasarrufu ve ısıl konforu iyileştirmesi açısından uygulayıcı için daha tercih edilebilir hale gelecektir.

Cephe yönelimi ve uygulama alanı göz önüne alınarak yapılan normalizasyon analizleri, birim alan başına geri ödeme süresinin güney ve doğu cephelerinde daha dengeli olduğunu, buna karşın yüksek uygulama alanına sahip cephelerde geri ödeme süresinin yatırım maliyetine bağlı olarak arttığını göstermektedir.

Malzeme teknolojilerindeki gelişmeler, üretim süreçlerinin optimize edilmesi, alternatif hammaddelerin kullanımı, uygulamanın devlet teşvikleri ile yaygınlaşmasının sağlaması gibi faktörler SYM-FDM duvar sisteminin metrekare maliyetini önemli ölçüde düşürebilmektedir. SYM-FDM duvar sisteminin ilk yatırım maliyetinin düşmesinin sistemin geri ödeme süresini kayda değer şekilde azaltacağını araştırma bulguları ortaya koymaktadır. Bu bağlamda, teknoloji geliştikçe ve SYM-FDM bileşenleri daha ekonomik hale geldikçe, sistemin hem performans hem de maliyet açısından sürdürülebilir bina uygulamalarında daha fazla tercih edilmesi beklenmektedir.

SYM-FDM duvar sisteminin maliyet değerlendirmesi için tartışılması gereken bir diğer parametre sistemin bakım ve onarımıdır. Duvar sisteminde kullanılan malzemelerin bina ömrü boyunca termal kararlılığı sürdürebilme durumu bu parametreyi doğrudan etkilemektedir. Katish ve diğerleri (2024) RT18HC ve RT22HC ticari faz değiştiren malzemeleri hızlandırılmış termal döngüye tabi tutarak 10.000 termal döngüden (yaklaşık 15 yıl bina ömrüne denk gelen bir döngü) sonra malzemelerin kararlı faz değişim sıcaklıklarını ve gizli ısı enerjileri deneysel olarak ölçüm yapmışlardır. Sonucunda, incelenen FDM'lerin kararlı faz değişim sıcaklıklarını ve gizli ısı enerjilerini koruyarak kararlılık gösterdiğini ve termal enerji depolama uygulamaları için güvenilir seçenek sunduğunu ortaya koymuştur. Novik (2023) yılında tamamladığı tez çalışmasında inşaat sektörü için akademik araştırma sürecinde olarak kabul edilen granül aerjeli yaklaşık 20 yıla eşdeğerce fırında ve döngü makinasında yaşlandırdı. Camın merkezindeki U değerinde %1-4 gibi düşük bir oranda artış, ortalama görünür geçirgenlikte maksimum %5'lik bir azalma görüldüğünü ortaya koymuştur. Çalışma ile elde edilen bu sonuç malzemenin uzun vadede kararlılık göstererek uygulama noktasındaki güvenilirliğini ortaya koymuştur. SYM-

FDM duvar sisteminin temel bileşenlerinin dayanıklılığının test edildiği bu iki çalışma sistemin uzun vadede termal kararlılığını sürdüreceğini ortaya koymuştur. Malzeme ölçeğinde bakım onarım maliyeti bir kısıt olarak görünmese de duvar sisteminin hızlandırılmış yaşlandırma yöntemlerine tabi tutularak kararlılık ölçümlerinin yapılması bu parametre ile ilgili tartışmaya değerlendirme sunma noktasında önemli olacaktır.

Sonuç olarak, SYM-FDM sisteminin maliyet etkinliği yalnızca mevcut ilk yatırım maliyetleri üzerinden değerlendirildiğinde sınırlı bir uygulanabilirlik izlenimi verse de sistemin sağladığı yüksek enerji verimliliği, düşük işletme maliyetleri ve iç mekân konforunu artırıcı etkisi, uzun vadede performans–maliyet dengesi açısından güçlü bir alternatif sunduğunu ortaya koymaktadır. Ayrıca, malzeme teknolojilerindeki gelişmeler ve üretim süreçlerinin optimize edilmesiyle birlikte SYM-FDM bileşenlerinin maliyetinde yaşanabilecek düşüşlerin, sistemin geri ödeme süresini önemli ölçüde azaltarak gelecekte tercih edilebilirliğini arttıracaktır. Bu doğrultuda, karar verme süreçlerinde yalnızca geri ödeme süresinin mutlak değeri değil, aynı zamanda enerji performansına göre normalize edilmiş yatırım geri dönüşü, termal konfor sürdürülebilirliği ve teknolojik gelişmelere bağlı maliyet senaryoları da dikkate alınmalıdır.

## 5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, yenilikçi bir yapı elemanı olan saydam yalıtımlı gizli ısı depolama (SYM-FDM) duvar sisteminin tasarımı matematiksel analiz sonucunda tamamlanmış, duvara ait farklı uygulamalar standart duvarla karşılaştırması yapılarak deneysel olarak incelenmiştir. Deneysel çalışma sonucunda en yüksek performans gösteren SYM-FDM duvar uygulaması bina ölçeğinde her cepheye %20-100 aralığında %20'lik artan adımlarla uygulanarak elde edilen sonuçlar performans ve maliyet bağlamında değerlendirilmiştir. Değerlendirme sonucunda her cephe için optimum oran belirlenmiş ve sonuçlar performans, tasarım, maliyet boyutlarında bütüncül olarak tartışılarak değerlendirilmiştir. Elde edilen bulgular, SYM-FDM duvar sisteminin hem ısıtma hem de soğutma dönemlerinde iç yüzey sıcaklık dalgalanmalarını azaltarak iç mekân termal konforunu iyileştirdiğini ve binanın yıllık enerji tüketimini ortalama %28,24 oranında azalttığını göstermektedir. Bu bulgular tartışma bölümünde literatürde FDM entegreli duvarın Ankara ili için yapılan analiz sonuçları ile karşılaştırıldığında SYM-FDM duvarının daha yüksek performans gösterdiği ortaya konmuştur. Bu sonuç ile saydam yalıtım malzemesinin radyasyon enerjisini sisteme kazandırarak ve yüksek yalıtım etkisi ile ısı kaşını önleyerek FDM'nin çalışmasını aktive ettiğini ortaya koymuş ve bir numaralı alt çalışma hipotezini doğrulamıştır. Ayrıca çalışır durumda olan FDM'nin entegre olduğu tuğla duvarın iç yüzey sıcaklıkları düşük genlikli bir dalgalanma göstererek iç ortam stabilizasyonunu da dengelediği bu sayede de binanın yıllık enerji tüketimini azalttığı verilerle ortaya konmuştur. Elde edilen bu sonuçla da çalışmanın iki numaralı alt hipotezi doğrulanmıştır.

Tasarım açısından değerlendirildiğinde, sistemin farklı konfigürasyonlarda (standart, havalandırılabilir ve gölgeleme elemanı) uygulanabiliyor olması, iklim ve cephe yönelimi gibi bağlamsal değişkenlere uyarlanabilmesini mümkün kılarak önemli bir esneklik sunmaktadır. Özellikle perdeli SYM-FDM uygulaması, ısıtım kontrolü ile FDM'nin ısı depolama ve salınım sürecini optimize ederek hem ısıtma hem de soğutma dönemlerinde en yüksek performansı göstermiştir. Tasarım açısından değerlendirildiğinde performansı olumlu etkileyen bir diğer tasarım kararı ısıtma ve soğutma döneminde performans gösteren iki farklı erime/donma sıcaklığındaki faz değiştiren malzemenin tuğla duvarın gövdesine eşit oranda gömülmesi olmuştur. Bu sayede SYM-FDM duvarı ısıtma, soğutma dönemlerinin yanında gece ve gündüz sıcaklık farkının yüksek olduğu geçiş dönemlerinde (Mart, Nisan,

Mayıs, Eylül, Ekim, Kasım ayları) performans göstererek yıllık enerji tüketimini standart duvarlı referans binaya kıyasla azaltmıştır. Çalışmadan elde edilen bu sonuç FDM'nin bölge iklimine uygun erime sıcaklığında seçilmesi, hem yaz hem de kış koşullarında ısı akışını düzenleyerek ısı tasarrufu sağladığını ortaya koyarak, çalışmanın üç numaralı alt hipotezini doğrulamıştır.

Performans boyutunda, tüm cephelerde %100 oranında SYM-FDM duvar uygulaması standart duvarlı referans binanın yıllık enerji tüketimini %28,24 oranında azaltmaktadır. Ancak SYM-FDM duvarının ilk yatırım maliyetinin yüksek olması nedeniyle maliyet etkisini de göz önünde bulunduran bir optimizasyon çalışması her cephe için yapılmıştır. Bu bağlamda, güney cephe de %35-40 aralığında, kuzey cephede %50 oranında, doğu ve batı cephelerinde %50-60 aralığındaki uygulama oranı, enerji yüklerinin düşürülmesi ve operatif sıcaklıkların konfor aralığında tutulması ve maliyet etkinliği açısından optimum sonuçlar sunmuştur. Bu sonuçlardan en dikkat çeken güney ve kuzey cephesidir. Literatürde yapılan çalışmaların genel olarak tamamı analizleri güney cephesi için yapmıştır. Kış döneminde kış güneşinin radyasyon etkisi FDM'nin etkisini önemli ölçüde arttırdığı elde edilen sonuçlarla doğrulansa da yazın bu cephe için aşırı ısınma durumu performansı önemli oranda etkilemiştir. Yıllık enerji performans sonuçları maliyet ölçeğinde normalize edilen değerler grafik üzerinde karşılaştırıldığında güney cephesinde diğer cephelere göre daha düşük optimum uygulanma oranında çakışma göstermiştir. Kuzey cephesinde ise normalize edilen performans ve maliyet değerleri %50 oranında çakışma göstererek güney cephesinden daha yüksek bir optimum oran ortaya koymuştur. Bunun nedeni, güneş etkisi düşük olmasına karşın SYM-FDM duvar sisteminin düşük U değeri ( $0,155 \text{ W/m}^2\text{K}$ ) ısı kaybını büyük ölçüde azaltmıştır. Yaz döneminde güneş etkisi düşük olduğu için termal duvarın dış yüzeyinde aşırı ısınma görülmemiş ve FDM'nin termal döngüye girmesini olumlu etkilemiştir. Sonucunda da soğutma yükünü düşürmüştür. Her cephe için belirlenen optimum oran dikkate alınarak referans konut binasının cephelerine SYM-FDM duvarı uygulandığında yıllık enerji tüketimini standart duvara göre %25,8 oranında azaltmaktadır. Bu sonuç, belirlenen optimum oranlarda SYM-FDM duvarı uygulanması bina enerji performansını arttıran bir cephe düzeni sağlamaktadır. Ayrıca kuzey cephede kış döneminde SYM-FDM duvarının yalıtım etkisinden kaynaklı olarak ısı transferinin sınırlandırılması dört numaralı alt çalışma hipotezini de doğrulamıştır.

Maliyet değerlendirmesi, sistemin enerji tüketimini yıllık bazda %20 -25 oranında azaltmasına karşın yüksek ilk yatırım maliyeti nedeniyle geri ödeme süresinin uzun olabileceğini ortaya koymuştur. Buna yönelik farklı fiyat senaryoları çalışılmış ve malzeme teknolojisindeki gelişmeler neticesinde SYM-FDM duvarının ilk yatırım maliyetinin azalması ile enerji etkin yapı sahası için önemli bir alternatif olacağı sonucuna ulaşılmıştır.

Sonuç olarak, SYM-FDM duvar sistemi, yalnızca enerji verimliliği sağlamakla kalmayıp, iklime ve yönetime göre optimize edilebilir, yüksek performanslı bir pasif yapı elemanı olarak ön plana çıkmaktadır. Maliyet parametresi tek başına değerlendirilmemeli; sistemin uzun vadede sunduğu enerji kazancına bağlı olarak işletim maliyetini düşürmesi, termal konfor etkisinin devamlılığı ve esnek tasarım potansiyeli birlikte ele alınarak, bütüncül bir karar süreci oluşturulmalıdır.

Gelecekte yapılacak çalışmalarda, SYM-FDM sisteminin yaygınlaşabilmesi ve maliyet etkinliğinin artırılabilmesi için FDM entegreli duvar sistemindeki FDM oranı optimize edilerek, sistem performansı olumsuz etkilenmeden toplam maliyeti azaltmaya yönelik çalışmalar yenilikçi duvar sisteminin uygulanabilirliğine katkı sunacaktır. Bu doğrultuda, farklı FDM yüzdesi senaryoları üzerinden hem enerji hem de ekonomik etkiyi değerlendiren parametrik çalışmalar önerilmektedir.

Saydam yalıtım ve faz değiştiren malzeme gibi yüksek performanslı yenilikçi malzemelerin inşaat sektöründe kullanımının yaygınlaşması için malzemenin termofiziksel performansından ödün vermeden, yerel kaynaklara dayalı, ölçeklenebilir ve sürdürülebilir üretim modelleri odaklanan çalışmalar önerilmektedir. Bu kapsamda, özellikle gelişmekte olan ülkelerde düşük teknoloji gerektiren ancak yüksek verimli üretim yöntemlerine öncelik verilmesi kritik önem taşımaktadır.

Uzun vadeli performans değerlendirmeleri ve malzeme dayanıklılık testleri, sistemin pratik uygulanabilirliğini artıracak çalışmaların SYM-FDM duvarının uygulayıcılar tarafından tercih edilebilirliğini arttıracak sonuçlar sunacağından dolayı önerilmektedir.

Farklı iklim koşullarının yapı kabuğu performansı üzerindeki etkisi göz önüne alındığında, SYM-FDM duvar sisteminin bölgesel iklim özelliklerine göre farklı tasarım uygulamalarının büyük önem taşımaktadır. Bu bağlamda, farklı iklim kuşaklarında SYM-

FDM sisteminin termal kütle kapasitesi, ışınım kontrolü, i yüzey sıcaklık stabilitesi ve enerji yükleri üzerindeki etkisinin çok yönlü analiz edilmesi; her iklim bölgesi için hangi tasarım senaryosunun en yüksek enerji verimliliği ve termal konfor çıktısı sağladığını ortaya koyacak kıyaslamalı çalışmaların yapılması önerilmektedir.



## KAYNAKLAR

- Abbas, H. M., Jalil, J. M., Ahmed, S. T. (2021). Experimental and numerical investigation of PCM capsules as insulation materials inserted into a hollow brick wall. *Energy and Buildings*, 246, 111127.
- Ahmad E. H. (2002). *Cost analysis and thickness optimization of thermal insulation materials used in residential buildings in Saudi Arabia*, The 6th Saudi Engineering Conference, Aralık 2002, Dhahran, Saudi Arabia, 21–32.
- Akeiber, H., Nejat, P., Majid, M. Z. A., Wahid, M. A., Jomehzadeh, F., Zeynali Famileh, I., Calautit, J. K., Hughes, B. R., Zaki, S. A. (2016). A review on phase change material (PCM) for sustainable passive cooling in building envelopes. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 60, 1470-1497.
- Aketouane, Z., Malha, M., Bruneau, D., Bah, A., Michel, B., Asbik, M., Ansari, O. (2018). Energy savings potential by integrating Phase Change Material into hollow bricks: The case of Moroccan buildings, *Building Simulation*, 11(6), 1109-1122.
- Alama, M., Sanjayan, J., Zou, P.X.W., Ramakrishnan S., Wilson, J. (2016). A Comparative Study on The Effectiveness of Passive and Free Cooling Application Methods of Phase Change Materials for Energy Efficient Retrofitting in Residential Buildings, *Procedia Engineering*, 180, 993–1002.
- Addington, M., Schodek, D. (2012). *Smart materials and technologies in architecture*. UK: Architectural Press. 110.
- ASHRAE Standart 55. (1992). Thermal environmental conditions for human occupancy; ANSI/ASHRAE, US, 5.
- Athienitis, A. K., Ramadan, H. (1999). Numerical model of a building with transparent insulation, *Solar Energy*, 67(1-3), 101-109.
- Auzeby, M., Wei, S., Underwood, C., Chen, C., Ling, H., Pan, S., Ng, B., Tindall, J. Buswell, R. (2017). Using Phase Change Materials to Reduce Overheating Issues in UK Residential Buildings, *Energy Procedia*, 105, 4072 – 4077.
- Baetens, R., Jelle, B. P., Gustavsen, A. (2010). Phase change materials for building applications: A state-of-the-art review, *Energy and buildings*, 42(9), 1361-1368.
- Bakırcı, K. (2009). Estimation of solar radiation by using ASHRAE clear-sky model in Erzurum, Turkey, *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 31(3), 208-216.
- Bejan, A.S. Catalina, T. (2016). The İmplementation of Phase Changing Materials in Energy Efficient Buildings Case Study: Efden Project, *Energy Procedia*, 85, 52– 59.
- Berardi, U. (2015). The development of a monolithic aerogel-glazed window for an energy retrofitting project. *Applied Energy*, 154, 603-615.

- Bhatnagar, V. (2014). *Data Mining and Analysis in the Engineering Field*. (1st Edition). New York: Information Science Reference. 405.
- Bilgin, F., Arıcı, M. (2017). Effect of phase change materials on time lag, DF and heat-saving. *Acta Physica Polonica A*, 132(3), 1102-1105.
- Bondareva, N.S., Sheremet, M. A. (2021). Natural convection melting influence on the thermal resistance of a brick partially filled with phase change material, *Fluids*, 6(7), 258.
- Bondareva, N.S., Sheikholeslami, M., Sheremet, M. A. (2021). The influence of external temperature and convective heat exchange with an environment on heat transfer inside phase change material embedded brick, *Journal of Energy Storage*, 33, 102087.
- Braun, P., Goetzberger, A., Schmid, J., Stahl, W. (1992). Transparent insulation of building facades—Steps from research to commercial applications. *Solar Energy*, 49(5), 413-427.
- Buratti, C., Moretti, E. (2012). Experimental performance evaluation of aerogel glazing systems. *Applied Energy*, 97, 430-437.
- Capeluto, G., Ochoa, C. E. (2016). *Intelligent envelopes for high-performance buildings: Design and strategy*. Basel: Springer International Publishing, 1.
- Cao, V.D., Bui, T. Q., Kjøniksen, A. (2019). Thermal analysis of multi-layer walls containing geopolymers concrete and phase change materials for building applications. *Energy*, 186, 115792.
- Cellat, K., Tezcan, F., Beyhan, B., Kardaş, G., Paksoy, H. (2017). A comparative study on corrosion behavior of rebar in concrete with fatty acid additive as phase change material. *Construction and Building Materials*, 143, 490-500.
- Charai, M., Sghouri, H., Mezhab, A., Karkri, M. (2021). Thermal insulation potential of non-industrial hemp (Moroccan cannabis sativa L.) fibers for green plaster-based building materials, *Journal of Cleaner Production*, 292, 126064.
- Cheng, W., Xie, B., Zhang, R., Xu, Z., Xia, Y. (2015). Effect of thermal conductivities of shape-stabilized PCM on under-floor heating system. *Applied Energy*, 144, 10-18.
- Chel, A., Nayak, J. K., Kaushik, G. (2008). Energy conservation in honey storage building using Trombe wall, *Energy and Buildings*, 40(9), 1643-1650.
- Conraud-Bianchi, J. (2008). *A methodology for the optimization of building energy, thermal, and visual performance*, Yüksek Lisans Tezi, Concordia University, Canada, 10.
- Crabb, J.A., Murdoch, N., Penman, J. M. (1987). *Building energy assessment by simplified dynamic simulation model*, In European Conference on Architecture, Munich.
- Çengel, Y.A., Boles, M.A., Kanoglu, M. (2011). *Thermodynamics: an engineering approach* (5 Edition), New York: McGraw-hill, 445.

- Da Cunha, J.P., Eames, P. (2016). Thermal energy storage for low and medium temperature applications using phase change materials—a review. *Applied energy*, 177, 227-238.
- Delgado, J.M., Martinho, J.C., Sá, A.V., Guimarães, A.S., Abrantes, V. (2018). *Thermal energy storage with phase change materials: A literature review of applications for buildings materials*, Switzerland: Springer International Publishing, 1.
- Dilmaç, Ş., Tepehan, F. Eğrican, N., (1994). *Saydam Yalıtım Malzemelerinin Enerji Tasarrufuna Katkıları*, 21. Yüzyılda Enerji Korunumu Sempozyumu, İstanbul.
- Dowson, M. (2012). *Novel retrofit technologies incorporating silica aerogel for lower energy buildings*, Doktora Tezi, Brunel University, Birleşik Krallık.
- Duffie, J.A., Beckman, W. A. (1991). *Solar Engineering of Thermal Processes* (2. Basım), New York: John Wiley and Sons.
- Duraković, B. (2020). *PCM-based building envelope systems: innovative energy solutions for passive design*. Springer Nature, 63.
- Dwivedi, V.K., Tiwari, P., Tiwari, S. (2016). *Importance of Phase Change Material (PCM) in solar thermal applications: A review*, In 2016 International Conference on Emerging Trends in Electrical Electronics & Sustainable Energy Systems (ICETEESES), India.
- Eanest Jebasingh, B., Valan Arasu, A. (2019). A comprehensive review on latent heat and thermal conductivity of nanoparticle-dispersed phase change material for low-temperature applications. *Energy Storage Materials*, 24, 52-74.
- Elnajjar, E. (2017). Using PCM embedded in building material for thermal management: performance assessment study, *Energy and Buildings*, 151, 28-34.
- Evins, R. (2013). A review of computational optimisation methods applied to sustainable building design, *Renewable and sustainable energy reviews*, 22, 230-245.
- Evola, G., Marletta, L., Sicurella, F. (2013). A Methodology for Investigating The Effectiveness of FDM Wallboards for Summer Thermal Comfort in Buildings, *Building and Environment*, 59, 517–527.
- Fallahi, A., Guldentops, G., Tao, M., Granados-Focil, S., Van Dessel, S. (2017). Review on solid-solid phase change materials for thermal energy storage: Molecular structure and thermal properties. *Applied Thermal Engineering*, 127, 1427-1441.
- Fang, Y. (2009). *A comprehensive study of phase change materials (PCMs) for building walls applications*, Doktora Tezi, University of Kansas, USA.
- Farid M. M., Khudhair A. M., Razack S. A. K., Al-Hallaj S. (2004). A Review On Phase Change Energy Storage Materials And Applications, *Energy Conversion & Management*, 45, 1597-1615
- Farid, M., Khudhair, A. M., Razack, S. A. K., Al-Hallaj, S. (2021). A review on phase change energy storage: materials and applications. *Thermal Energy Storage with Phase Change Materials*, 4-23.

- Fiorito, F. (2012). Trombe Walls for Lightweight Buildings in Temperate and Hot Climates Exploring The Use of Phase Change Materials for Performances Improvement, *Energy Procedia*, 30, 1110–1119.
- Frigione, M., Lettieri, M., Sarcinella, A. (2019). Phase Change Materials for Energy Efficiency in Buildings and Their Use in Mortars. *Materials*, 12(8), 1260.
- Gao, T., Jelle, B. P., Ihara, T., Gustavsen, A. (2014). Insulating glazing units with silica aerogel granules: The impact of particle size. *Applied Energy*, 128, 27-34.
- Goetzberger, A. (1991). *Transparent insulation technology for solar energy conversion* (2. Basım), Freiburg: Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems.
- Goia, F., Perino, M., Serra, V. 2014. “Experimental analysis of the energy performance of a full-scale PCM glazing prototype”, *Solar Energy*, 100, 217-233.
- Göksal Özbalta, T., Kartal, S. Özbalta, N., (2008). Farklı Derece-Gün Bölgelerinde Saydam Yalıtım ile Güneş Enerjisi Kazancının Hesaplanması, 8. *Uluslararası Yapıda Tesisat Teknolojisi Sempozyumu*, İstanbul, 115 124.
- Griego, D., Krarti, M. Hernández-Guerrero, A. (2012). Optimization of energy efficiency and thermal comfort measures for residential buildings in Salamanca, Mexico, *Energy and Buildings*, 54, 540-549.
- Guarino, F., Cellura, S.L.M., Mistretta, M., La Rocca, V. (2015). Phase Change Materials Applications to Optimize Cooling Performance of Buildings in The Mediterranean Area: A Parametric Analysis, *Energy Procedia*, 78, 1708 – 1713.
- Gupta, M. K., Rathore, P. K. S., Kumar, R., Gupta, N. K. (2023). Experimental analysis of clay bricks incorporated with phase change material for enhanced thermal energy storage in buildings, *Journal of Energy Storage*, 64, 107248.
- Han, Y., Taylor, J.E. (2015). Simulating The Impact of Phase Change Material Embedded Building Envelopes on The Inter-Building Effect in Non-Tropical Cities, *Procedia Engineering*, 118, 760 – 765.
- Han, J., Kamber, M., Pei, J. (2012). *Data mining: Concepts and Techniques*. (3. Basım), Waltham: Morgan Kaufmann Publishers, 120-124.
- Hasan, A. (1999). Optimizing insulation thickness for buildings using life cycle cost, *Applied Energy*, 63(2), 115-124.
- Hailu, G. (2021). Energy systems in buildings. In *Energy Services Fundamentals and Financing*. Academic Press. 181-209.
- Halawa, E., Ghaffarianhoseini, A., Ghaffarianhoseini, A., Trombley, J., Hassan, N., Baig, M., Yusoff, S. and Ismail, M. A. (2018). A review on energy conscious designs of building façades in hot and humid climates: Lessons for (and from) Kuala Lumpur and Darwin. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82, 2147-2161.
- Harish, V. S. K. V., Kumar, A. (2016). A review on modeling and simulation of building energy systems. *Renewable and sustainable energy reviews*, 56, 1272-1292.

- Heim, D. Klemm, P. (2003). Numerical solution of TIM-PCM solar thermal storage system with ESP-r, Carmeliet, J., Hens, H. and Vermeir, G. (Eds). *Research in building physics* (1. Basım), London: CRC Press, 683.
- Heim, D. (2016). *Whole year analysis of TIM-PCM solar thermal storage wall*, ASHRAE & IBPSA-USA SimBuild 2016: Building Performance Modeling Conference, 10-12 Ağustos. USA: Utah, 1-8.
- Hojjati, B., Wade, S. H. (2012). US household energy consumption and intensity trends: a decomposition approach, *Energy Policy*, 48, 304-314.
- Hu, Z., He, W., Ji, J., Zhang, S. (2017). A review on the application of Trombe wall system in buildings. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 70, 976-987.
- Hussein, M. Z., Zainal, Z., Rusli, R. (2016). Advanced energy storage materials for building applications and their thermal performance characterization: A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 57, 916–928.
- IEA. (1997). *Solar Heating and Cooling Programme Task 20: Solar Energy in Building Renovation*. London: James and James Ltd.
- Ioannou, A., Itard, L. (2015). Energy performance and comfort in residential buildings: Sensitivity for building parameters and occupancy. *Energy and Buildings*, 92, 216-233.
- İnternet: Verma, S., Building Envelopes Embracing Design Technology, Research in Architecture & Technology, URL-1: <https://www.mgsarchitecture.in/images/Facades/1208-InternalConditions-ClimaticConditions-BuildingSkin.jpg>, Son Erişim Tarihi: 29.05.2025.
- İnternet: SketchUp for Web. (202). *Trimble Inc.* URL-2: <https://app.sketchup.com>, Son Erişim Tarihi: 31.07.2025
- İnternet: MGM (Türkiye Meteoroloji Genel Müdürlüğü), Ankara, Şehirler ve Tatil Köyleri, URL-3: <https://www.mgm.gov.tr/eng/forecast-cities.aspx>, Son Erişim Tarihi: 15.05.2025.
- İnternet: Cabot, 2021. LUMIRA Translucent Aerogel LA1000; LA2000 Datasheet, Cabot Corporation, USA. URL-4: <https://www.cabotcorp.com/solutions/products-plus/aerogel/particles>, Son Erişim Tarihi: 07.08.2025
- İnternet: Rubitherm, 2023 PCM RT-LINE: Wide-Ranging Organic PCM For Your Application, URL-5: <https://www.rubitherm.eu/en/index.php/productcategory/organische-pcm-rt>, Son Erişim Tarihi: 01.04.2023
- İnternet: Altensis, “DesignBuilder yazılımı.”, URL-6: <https://www.altensis.com/hizmetler/designbuilder-software/>. Son Erişim Tarihi: 15.05.2025

- İnternet: EPDK, 2023. Doğal Gaz Piyasası Yıllık Sektör Raporu Listesi, URL-7: <https://md.teyit.org/file/epdk-nisan-2023-raporu-compressed.pdf>, Son Erişim Tarihi: 07.08.2025
- İnternet: Wallin, E., 2023. The building envelope explained: What it is and why it matters ,Energy efficiency articles & insights, URL-8: <https://proptechos.com/energy-efficiency/building-envelope/>, Son Erişim Tarihi: 02.06.2025
- İnternet: Kreider, J. F., Anstett, M. (1993). Application of Neural Networking Models to Predict Energy Use, URL-9: [https://www.aivc.org/sites/default/files/airbase\\_6524.pdf](https://www.aivc.org/sites/default/files/airbase_6524.pdf), Son Erişim Tarihi: 11.08.2025
- İnternet: Okalux, KAPILUX TIM Transparent Insulation Infotext, URL-10: [http://www.okaluxna.com/wp-content/uploads/i\\_KAPILUX\\_TWD\\_US\\_180709.pdf](http://www.okaluxna.com/wp-content/uploads/i_KAPILUX_TWD_US_180709.pdf), Son Erişim Tarihi: 14.03.2022
- İnternet: Schobermayr, H., Wallner, G., Lang, R. W. (2002), Transparent Thermal Insulation; Development and Testing of novel Transparent Thermal Insulation (TTI) Systems made from Polymers, Research Project, Forschungsforum: Vienna, Austria. URL-11: [https://nachhaltigwirtschaften.at/resources/nw\\_pdf/fofo/fofo2\\_02\\_en.pdf](https://nachhaltigwirtschaften.at/resources/nw_pdf/fofo/fofo2_02_en.pdf), Son Erişim Tarihi: 11.08.2025
- Jensen, K., Schultz, J., Kristiansen, F. (2004). Development of windows based on highly insulating aerogel glazings. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 350, 351-357.
- Kabdrakhmanova, M., Memon, S. A., Saurbayeva, A. (2021). Implementation of the panel data regression analysis in PCM integrated buildings located in a humid subtropical climate. *Energy*, 237, 121651.
- Kalbasi, R. (2022). Usefulness of PCM in building applications focusing on envelope heat exchange–energy saving considering two scenarios. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 50, 101848.
- Katish, M., Allen, S., Squires, A., Ferrandiz-Mas, V. (2024). Thermal stability of organic Phase Change Materials (PCMs) by accelerated thermal cycling technique. *Thermochimica Acta*, 737, 179771.
- Kaushika, N., Sharma, M., Kaul, S. (1986). Honeycomb roof cover system for passive solar space heating. *Energy Conversion and Management*, 27(1), 99-102.
- Kaushika, N., Sharma, P., Padma Priya, R. (1991). Solar thermal analysis of honeycomb roof cover system for energy conservation in an air-conditioned building. *Energy and Buildings*, 18(1), 45-49.
- Kaushika, N., Sumathy, K. (2003). Solar transparent insulation materials: A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 7(4), 317-351.
- Kheiri, F. (2018). A review on optimization methods applied in energy-efficient building geometry and envelope design, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 92, 897-920.

- Khudhair, A. M. Farid, M. M. (2004). A review on energy conservation in building applications with thermal storage by latent heat using phase change materials, *Energy conversion and management*, 45(2), 263-275.
- Kienzl, N. (1999). *Advanced building skins: translucent thermal storage elements*, Doktora Tezi, Massachusetts Institute of Technology, USA.
- Kim, W., Jeon, Y., Kim, Y. (2016). Simulation-based optimization of an integrated daylighting and HVAC system using the design of experiments method, *Applied Energy*, 162, 666-674.
- Koman, İ. (Editör). (2015). *Gündüz Gökçe, Yükselen Ayaydın, Özer Erenman, Aydan Özgen Armağanı: Yapıda Yenilikçi Yaklaşımlar*, İstanbul: Mimar Sinan Güzel Sanatlar Üniversitesi Yayınları, 162.
- Kong, X., Lu, S., Li, Y., Huang, J., Liu, S. (2014). Numerical study on the thermal performance of building wall and roof incorporating phase change material panel for passive cooling application, *Energy and Buildings*, 81, 404-415.
- Kośny, J. (2015). *PCM-Enhanced Building Components* (1. Basım) UK: Springer Cham. 58.
- Köse, E., Manioğlu, G. (2018). Evaluation of the Performance of Phase Change Materials in relation to Balanced Distribution of Heating Energy Cost in Residential Buildings, *REHVA Journal*, 55 (2), 52-57.
- Kreider, J. F., Curtiss, P. S., Rabl, A. (2009). Heating and cooling of buildings: design for efficiency. CRC Press, 702.
- Kuznik, F., Virgone, J. (2009). Experimental assessment of a phase change material for wall building use, *Applied energy*, 86(10), 2038-2046.
- Kuznik, F., David, D., Johannes, K., Roux, J. J. (2011). A review on phase change materials integrated in building walls, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(1), 379-391.
- Lai, C. M., Chiang, C. M. (2006). How phase change materials affect thermal performance: hollow bricks, *Building Research & Information*, 34(2), 118-130.
- Lai, C. M., Hokoi, S. (2015). Solar Facades: A Review. *Building and Environment*, 91, 152-165.
- Lane G. A. (1983). *Solar Heat Storage Latent Heat Material* (1. Basım), Florida: Crc Pres Inc, 450.
- Li, D., Li, Z., Zheng, Y., Liu, C., Hussein, A. K., Liu, X. (2016). Thermal performance of a PCM-filled double-glazing unit with different thermophysical parameters of PCM, *Solar Energy*, 133, 207-220.
- Li, Y., Liu, S. (2014). Numerical study on thermal behaviors of a solar chimney incorporated with PCM, *Energy and Buildings*, 80, 406-414.

- Li, Y., Zhou, J., Long, E., Meng, X. (2018). Experimental study on thermal performance improvement of building envelopes by integrating with phase change material in an intermittently heated room, *Sustainable Cities and Society*, 38, 607-615.
- Liang, X., Wang, Y., Zhang, Y., Jiang, J., Chen, H., Zhang, X., Roskilly, T. (2017). Analysis and optimization on energy performance of a rural house in Northern China using passive retrofiting, *Energy Procedia*, 105, 3023-3030.
- Liu, Z., Yu, Z. J., Yang, T., Qin, D., Li, S., Zhang, G., Haghighat, F., Joybari, M. M. (2018). A review on macro-encapsulated phase change material for building envelope applications. *Building and Environment*, 144, 281-294.
- López Salazar, S., Efraín, S., Yang, R., Li, D., Chagolla-Aranda, M.A. (2023). *Numerical study on dynamic thermal characteristics and potential for reducing energy consumption and CO2 emissions of multi-glazed windows in developing cities of Mexico*. ICSC-CITIES 2023: Ibero-American Congress of Smart Cities, Mexico.
- Lu, S., Li, Y., Kong, X., Pang, B., Chen, Y., Zheng, S., Sun, L. (2017). A Review of PCM Energy Storage Technology Used in Buildings for the Global Warming Solution. In: Zhang, X., Dincer, I. (eds) *Energy Solutions to Combat Global Warming. Lecture Notes in Energy*, UK: Springer Cham, 611-644.
- Luo, Y., Zhang, L., Bozlar, M., Liu, Z., Guo, H., Meggers, F. (2019). Active building envelope systems toward renewable and sustainable energy. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 104, 470-491.
- Luo, Y., Zhang, L., Liu, Z., Wu, J., Zhang, Y., Wu, Z. (2018). Numerical evaluation on energy saving potential of a solar photovoltaic thermoelectric radiant wall system in cooling dominant climates. *Energy*, 142, 384-399.
- Machairas, V., Tsangrassoulis, A., Axarli, K. (2014). Algorithms for optimization of building design: A review, *Renewable and sustainable energy reviews*, 31, 101-112.
- Mangan, S. D., Oral, G. K. (2016). Assessment of residential building performances for the different climate zones of Turkey in terms of life cycle energy and cost efficiency, *Energy and Buildings*, 110, 362-376.
- Mardaljevic, J. (1999). *Daylight simulation: validation, sky models and daylight coefficients*, Leicester: De Montfort University.
- Matuska, T. (2000). *A simple trombe wall: comparison of different glazing*, In Proceedings of the 3rd ISES Europe Solar Congress third ISES-Europe Solar Congress, Copenhagen, Denmark.
- Mazman, M. (2006). *Gizli Isı Depolaması ve Uygulamaları*, Doktora Tezi, Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana.
- Mehling, H., Cabeza, L. F. (2008). Heat and cold storage with PCM. Mewes, D. and Mayinger, F. (Eds). *Heat and mass transfer*, Germany: Springer, 54.
- Memon, S. A. (2014). Phase change materials integrated in building walls: A state of the art review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 31, 870-906.

- Meng, E., Yu, H., Zhou, B. (2017). Study Of The Thermal Behavior of The Composite Phase Change Material (FDM) Room in Summer and Winter, *Applied Thermal Engineering*, 126, 212–225.
- Miller, B. L., Goldberg, D. E. (1995). Genetic algorithms, tournament selection, and the effects of noise, *Complex systems*, 9(3), 193-212.
- Mohtasim, M. S., Das, B. K. (2024). Biomimetic and bio-derived composite Phase Change Materials for Thermal Energy Storage applications: A thorough analysis and future research directions. *Journal of Energy Storage*, 84, 110945.
- Nazi, W.I.W.M., Wang, Y., Chen, H., Zhang, X., Roskilly, A.P. (2017). Passive Cooling Using Phase Change Material and Insulation for High-rise Office Building in Tropical Climate, *Energy Procedia*, 142, 2295–2302.
- Najafi, E., Faizi, M. (2017). Evolution of Building Envelopes through Creating Living Characteristics. *Journal of Civil Engineering and Architecture*, 11, 1186-1102.
- Novik, V. (2023). *Thermal and Optical Performance of Granular Aerogel Glazing After Accelerated Ageing*. Yüksek Lisans Tezi, Toronto Metropolitan University. Canada.
- Nowak, H. (1991). The longwave radiative heat transfer of the building envelopes. *Infrared physics*, 32, 357-363.
- Oliveira, A. M. V. D. (2012). *Sustentabilidade na construção: comportamento térmico de edifícios em Portugal usando materiais de mudança de fase*, Doktora Tezi, Universidade do Porto, Portugal.
- Onbasioglu, H., Egrican, A. N. (2002). Experimental approach to the thermal response of passive systems, *Energy conversion and management*, 43(15), 2053-2065.
- Oya, T., Nomura, T., Okinaka, N., Akiyama, T. (2012). Phase change composite based on porous nickel and erythritol, *Applied Thermal Engineering*, 40, 373-377.
- Paksoy, H. Ö. (Ed.). (2007). *Thermal energy storage for sustainable energy consumption: fundamentals, case studies and design*, Netherlands: Springer Science & Business Media, 234s.
- Panayiotou, G.P., Kalogirou, S.A., Tassou, S.A. (2016). Evaluation of The Application of Phase Change Materials (FDM) on The Envelope of A Typical Dwelling in The Mediterranean Regio, *Renewable Energy*, 97, 24-32.
- Paneri, A., Wong, I. L., Burek, S. (2019). Transparent insulation materials: An overview on past, present and future developments, *Solar Energy*, 184, 59-83.
- Parameshwaran, R., Kalaiselvam, S., Harikrishnan, S., Elayaperumal, A. (2012). Sustainable thermal energy storage technologies for buildings: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(5), 2394-2433.
- Pasupathy, A., Velraj, R., Seeniraj, R. V. (2008). Phase change material-based building architecture for thermal management in residential and commercial establishments. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 12(1), 39-64.

- Picco, M. (2014). *Dynamic energy simulation toward integrated design of non-residential buildings, Model description simplifications and their impact on simulation results*. Doktora Tezi, University of Bergamo, İtalya.
- Pisello, A. L. (2015). Thermal-energy analysis of roof cool clay tiles for application in historic buildings and cities, *Sustainable Cities and Society*, 19, 271-280.
- Platzer, W., Wittwer, V. (1990). Transparent Insulation Materials. GRANQVIST, C.G. (Eds). *Materials Science for Solar Energy Conversion System* (1. Basım), UK: Pergamon Press, 50s.
- Pomianowski, M., Heiselberg, P., Zhang, Y. (2013). Review of thermal energy storage technologies based on PCM application in buildings, *Energy and Buildings*, 67, 56–69.
- Quanying, Y., Ran, H., Lisha, L. (2012). Experimental study on the thermal properties of the phase change material wall formed by different methods, *Solar Energy*, 86(10), 3099-3102.
- Ragonasi. M. (1993). *Bautechnik der Gebaudehulle, Bau und Energie* (Forth edition), Germany: Vieweg+Teubner Verlag, 100.
- Rakkappan, S. R., Sivan, S., Pethurajan, V., Aditya, A., Mittal, H. (2021). Preparation and thermal properties of encapsulated 1-Decanol for low- temperature heat transfer fluid application. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 614, 126167.
- Reichle, D. E. (2020). *Global Carbon Cycle and Climate Change*; Netherlands: Elsevier, 30.
- Rodriguez-Ubinas, E., Ruiz-Valero, L., Vega, S., Neila, J. (2012). Applications of phase change material in highly energy-efficient houses, *Energy and Buildings*, 50, 49-62.
- Sadineni, S.B., Madala, S., Boehm, R.F. (2001). Passive building energy savings: A review of building envelope components. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(8), 3617-3631.
- Sajjadian, S. M., Lewis, J., Sharples, S. (2015). The potential of phase change materials to reduce domestic cooling energy loads for current and future UK climates, *Energy and Buildings*, 93, 83-89.
- Saylam Canım, D., Maçka Kalfa, S. (2023). Development of a new pumice block with phase change material as a building envelope component. *Journal of Energy Storage*, 61, 106706.
- Saxena, R., Rakshit, D., Kaushik, S. C. (2020). Experimental assessment of Phase Change Material (PCM) embedded bricks for passive conditioning in buildings, *Renewable Energy*, 149, 587-599.
- Sharma, R. K., Ganesan, P., Tyagi, V. V., Metselaar, H. S. C., Sandaran, S. C. (2015). Developments in organic solid–liquid phase change materials and their applications in thermal energy storage, *Energy Conversion and Management*, 95, 193-228.

- Sharma, A., Tyagi, V., Chen, C., Buddhi, D. (2009). Review on thermal energy storage with phase change materials and applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(2), 318-345.
- Silva, T., Vicente, R., Rodrigues, F. (2016). Literature review on the use of phase change materials in glazing and shading solutions, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 53, 515-535.
- Singh Rathore, P. K., Shukla, S. K., Gupta, N. K. (2020). Potential of microencapsulated PCM for energy savings in buildings: A critical review. *Sustainable Cities and Society*, 53, 101884.
- Soudian, S., Berardi, U. (2017). Experimental Investigation of Latent Thermal Energy Storage in Highrise Residential Buildings in Toronto, *Energy Procedia*, 132, 249–254.
- Stazi, F., Di Perna, C. O. S. T. A. N. Z. O., Filiaci, C., Stazi, A. L. E. S. S. A. N. D. R. O. (2008). The solar wall in the Italian climates. World Academy of Science, *Engineering and Technology*, 37, 31-39.
- Souissi, M., Trigui, A., Jedidi, I., Loukil, M. S., Abdelmouleh, M. (2023). Bio-based composite as phase change material including spent coffee grounds and beeswax paraffin. *Korean Journal of Chemical Engineering*, 40(9), 2342-2355.
- Straube, J. F. and Burnett, E. F. (2005). *Building science for building enclosures*. Massachusetts: Building Science Press.
- Sun, Y., Wilson, R., Wu, Y. (2018). A Review of Transparent Insulation Material (TIM) for building energy saving and daylight comfort. *Applied Energy*, 226, 713-729.
- Sun, Y., Wu, Y., Wilson, R., Lu, S. (2016). Experimental measurement and numerical simulation of the thermal performance of a double glazing system with an interstitial Venetian blind. *Building and Environment*, 103, 111-122.
- Świrska-Perkowska, J., Kucharczyk, A., Wyrwał, J. (2020). Energy efficiency of a solar wall with transparent insulation in Polish climatic conditions. *Energies*, 13(4), 859.
- Swinbank, W. C. (1963). Long-wave radiation from clear skies. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 89(381), 339-348.
- Telkes, M. (1978). *Latent heat storage techniques*. In *Institute of Gas Technology, Energy from the Sun Symposium*.
- Tunçbilek, E., Arıcı, M., Krajčík, M., Li, Y., Jurčević, M., Nižetić, S. (2022). Impact of nano-enhanced phase change material on thermal performance of building envelope and energy consumption. *International Journal of Energy Research*, 46(14), 20249-20264.
- Voss, K. (2000). Solar energy in building renovation: Results and experience of international demonstration buildings. *Energy and Buildings*, 32(3), 291-302.

- Wachenfeldt, B. J., Bell, D., Forskningsråd, N. (2003). Building integrated energy systems in smart energy efficient buildings-A state of the art; SINTEF Civil and Environmental Engineering - STF22 A04503. *Trondheim, Norway*, 5.
- Wallner, G., Lang, R., Schobermayr, H., Hegedys, H., Hausner, R. (2004). Development and application demonstration of a novel polymer film based transparent insulation wall heating system. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 84(1-4), 441-457.
- Wang, D., Liu, H., Liu, Y., Xu, T., Wang, Y., Du, H., Wang, X., Liu, J. (2019). Frost and High-temperature resistance performance of a novel dual-phase change material flat plate solar collector. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 201, 110086.
- Watson, D., Crosbie, M. J., Hancock Callender, J. (1999). *Time saver standards for architectural design data* (7. Basım), USA: The McGraw-Hill, 144.
- Wijesuriya, S., Tabares-Velasco, P. C. (2021). Empirical validation and comparison of methodologies to simulate micro and macro-encapsulated PCMs in the building envelope. *Applied Thermal Engineering*, 188, 116646.
- Wittwer, V., Platzer, W. (2000). Transparent thermal insulation materials and systems: state of the art and potential for the future, *High Temperatures High Pressures*, 32(2), 143-158.
- Wong, I. L. (2007). *Optimum and cost-effective transparent insulation systems for office building applications in temperate and tropical climates*. Doktora Tezi, University of Ulster, Ireland.
- Wong, I. L., Eames, P. C., Perera, R. S. (2007). A review of transparent insulation systems and the evaluation of payback period for building applications, *Solar Energy*, 81(9), 1058-1071.
- Yamoul, N., Dlimi, L., El Harrouni, K., Chakir, B. A. (2023). Improving the passive building energy efficiency: a case study of a moroccan modern house. *Civil Eng Archit*, 11(5), 2435-46.
- Yeşildal B., B., (2002). *Enerji Korunumu Açısından Dış Duvarlarda Saydam Yalıtım Kullanımının İrdelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Yuan, Y., Zhang, N., Tao, W., Cao, X., He, Y. (2014). Fatty acids as phase change materials: a review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 29, 482-498.
- Zalba, B., Marín J.M., Cabeza L.F., Mehling H., (2003). Review on thermal energy storage with phase change: materials, heat transfer analysis and applications. *Applied Thermal Engineering*, 23: 251-283.
- Zhang, Y., Zhou, G., Lin, K., Zhang, Q., Di, H. (2007). Application of latent heat thermal energy storage in buildings: State-of-the-art and outlook. *Building and Environment*, 42(6), 2197-2209.
- Zhang, T., Tan, Y., Yang, H., Zhang, X. (2016). The application of air layers in building envelopes: A review. *Applied energy*, 165, 707-734.

- Zhou, H., Puttige, A. R., Nair, G., Olofsson, T. (2024). Thermal behaviour of a gypsum board incorporated with phase change materials. *Journal of Building Engineering*, 94, 109928.
- Zhou, D., Zhao, C., Tian, Y. (2012). Review on thermal energy storage with phase change materials (PCMs) in building applications. *Applied Energy*, 92, 593-605.
- Zürcher F.C. (1998). *Bauphysik-Bau and Energie, Leitfaden für Planung und Praxis*ll, Stuttgart: B.G. Teubner, 2.
- Zwanzig, S. D., Lian, Y., Brehob, E. G. (2013). Numerical simulation of phase change material composite wallboard in a multi-layered building envelope, *Energy Conversion and Management*, 69, 27-40.







*Gazili olmak ayrıcalıktır*