



**T.C.  
RECEP TAYYİP ERDOĞAN ÜNİVERSİTESİ  
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ  
ENERJİ SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**SÜRDÜRÜLEBİLİR YAPILAŞMA İÇİN YÜKSEK ISIL  
DİRENÇLİ VE DÜŞÜK KARBON SALINIMLI CEPHE  
TEKNOLOJİLERİ**

**(Yüksek Lisans Tezi)**

**Emre ALVUR**

**Danışman  
Doç. Dr. Ayşe Pınar MERT CÜCE**

**RİZE  
2025**

## KABUL VE ONAY

Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalında, Doç. Dr. Ayşe Pınar MERT CÜCE danışmanlığında, Emre ALVUR tarafından hazırlanan *Sürdürülebilir Yapılaşma İçin Yüksek Isıl Dirençli ve Düşük Karbon Salımlı Cephe Teknolojileri* adlı bu tez çalışması, 28/07/2025 tarihinde yapılan savunma sınavı sonucunda oy birliğiyle/oy çokluğuyla başarılı bulunarak jürimiz tarafından **Yüksek Lisans Tezi** olarak kabul edilmiştir.

| Jüri Üyeleri | Ünvanı, Adı SOYADI              | İmza |
|--------------|---------------------------------|------|
| Başkan       | : Prof. Dr. Adnan MİDİLLİ       |      |
| Üye          | : Doç. Dr. Ayşe Pınar MERT CÜCE |      |
| Üye          | : Doç. Dr. Erdem CÜCE           |      |

## **ETİK BEYAN**

Enerji Sistemleri Mühendisliği Tezli Yüksek Lisans Programından mezun olmak üzere teslim ettiğim “Sürdürülebilir Yapılaşma İçin Yüksek Isıl Dirençli ve Düşük Karbon Salınlı Cephe Teknolojileri” adlı tezim, bilim ve araştırma etiği prensiplerine riayet edilerek tarafımdan yazılmıştır.

Tez çalışmamda, başka kaynaklardan aktarılan bütün bilgi ve alıntılar, Enstitünüz Tez Yazım Kılavuzuna uygun olarak açıkça gösterilmiştir. Kaynağı gösterilenler dışında kalan bütün bilgiler uygun araştırma yöntemi kullanılarak tarafımdan edinilmiş ve esere bu şekilde yansıtılmıştır. Şahsıma ait olmayan hiçbir bilgi, kasıt veya kusurlar, şahsıma aitmiş gibi gösterilmemiştir. İnternet kaynakları dâhil, sahibine/kaynağına atıf yapılmaksızın hiçbir bilgi kullanılmamıştır. Aksinin ortaya çıkması halinde doğacak bütün hukuki, idari, akademik ve etik sorumluluk tarafıma ait olacaktır. Eserin tesliminden sonra herhangi bir zamanda, bilim etiğine aykırılık tespit edilmesi ve / veya eserimle ilgili intihal veya intihal şeklinde anlaşılabilecek bir durumun ortaya çıkması halinde; Üniversiteniz ve eğitim kadronuzun hiçbir şekilde sorumlu tutulmayacağını hür irademle kabul, beyan ve taahhüt ederim.

28/07/2025

**Emre ALVUR**

## ÖN SÖZ

Günümüz yapı sektörünün çevresel etkilerinin azaltılması ve enerji verimliliğinin artırılması yönündeki çabalar, sürdürülebilir yapı teknolojilerinin geliştirilmesini zorunlu kılmaktadır. Bu doğrultuda hazırlanan bu yüksek lisans tezi, yüksek ısı dirençli ve düşük karbon salımlı cephe teknolojilerine odaklanmakta; malzeme bilimi, enerji sistemleri ve dijital yapı tasarımı bileşenlerini bir araya getiren bütüncül bir yaklaşım sunmayı amaçlamaktadır. Yenilikçi yalıtım sıvalarından doğal katkılı yapı elemanlarına, yangın dayanımı yüksek kompozit çözümlerden bina bilgi modellemesi temelli simülasyonlara kadar uzanan çok boyutlu bu çalışmanın, sürdürülebilir yapılaşma hedeflerine katkı sağlaması hedeflenmiştir.

Hayatta bazı yollar yalnızca bilgiyle değil, inanç ve sabırla da yürünür. Bu tez çalışması, yalnızca akademik bir araştırmanın ürünü değil; aynı zamanda karşılaştığım zorluklara rağmen inancımı kaybetmeden sürdürdüğüm bir yolculuğun da somut bir ifadesidir. Her adımında öğrenmeye, sorgulamaya ve kendimi geliştirmeye çalıştığım bu süreçte, bana hem bilimsel hem de insani yönden rehberlik eden, yolumu aydınlatan kıymetli insanlar oldu. Bu çalışmanın her aşamasında bilgi birikimiyle olduğu kadar, samimiyeti ve yönlendirmeleriyle de bana yol gösteren Değerli Hocam Doç. Dr. Ayşe Pınar MERT CÜCE'ye en içten şükranlarımı sunarım. Ayrıca yolumu aydınlatan bilgi birikimi, motivasyonu ve yapıcı geri bildirimleriyle bu çalışmanın oluşmasında katkılarını esirgemeyen Değerli Hocam Doç. Dr. Erdem Cüce'ye gönülden teşekkür ederim.

Bu sürecin manevi yükünü her daim omuzlayan, her zorlukta yanımda duran kıymetli aileme de minnet borçluyum. Varlıklarıyla bana güç veren annem Mediha ALVUR, babam Fettah ALVUR ve her zaman desteğini hissettiğim kardeşim Ahmet ALVUR, sizlerin sabrı ve inancı olmasaydı bugün burada olamazdım.

Hayal etmekle başlayan, emekle büyüyen bu sürecin, sürdürülebilir yapı teknolojileri alanına mütevazı da olsa bir katkı sunmasını ve gelecekteki çalışmalara ilham kaynağı olmasını diliyorum.

Emre ALVUR  
RİZE/2025

## İÇİNDEKİLER

|                                                                                           |      |
|-------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| KABUL VE ONAY .....                                                                       | I    |
| ETİK BEYAN .....                                                                          | II   |
| ÖN SÖZ .....                                                                              | III  |
| İÇİNDEKİLER .....                                                                         | IV   |
| ÖZET .....                                                                                | VI   |
| ABSTRACT.....                                                                             | VII  |
| KISALTMALAR .....                                                                         | VIII |
| TABLolar LİSTESİ.....                                                                     | IX   |
| ŞEKİLLER LİSTESİ .....                                                                    | X    |
| GİRİŞ .....                                                                               | 1    |
| 1. LİTERATÜR ÖZETİ .....                                                                  | 7    |
| 1.1. Isıl Performansa Yönelik.....                                                        | 7    |
| 1.2. Yüksek Sıcaklıklara Karşı Performansına Yönelik.....                                 | 14   |
| 1.3. VIP ve Aerojel Bazlı Süper Yalıtım Malzemeleri .....                                 | 22   |
| 1.3.1. Aerojel ve VIP Tabanlı Harici TSYM'nin Artıları ve Eksileri.....                   | 26   |
| 1.3.2. Aerojel ve VIP Tabanlı Dahili TSYM'nin Artıları ve Eksileri.....                   | 29   |
| 1.4. BIM ve Enerji Verimliliği .....                                                      | 32   |
| 1.5. Araştırmanın Amacı ve Kapsamı .....                                                  | 36   |
| 2. MALZEME VE YÖNTEM .....                                                                | 38   |
| 2.1. Yenilikçi Yalıtım Sıvasının Termofiziksel Özellikleri ve Numune Hazırlığı. 38        |      |
| 2.1.1. Yenilikçi Yalıtım Sıvasının Malzeme Özellikleri .....                              | 38   |
| 2.1.2. Test Numunesi Hazırlanışı .....                                                    | 41   |
| 2.2. Yalıtım Sıvalarının Yangın Dayanımı ve Sıcaklık Maruziyeti Altındaki Davranışı ..... | 43   |
| 2.2.1. Agregat Granülometrisi Ve Beton Numune Hazırlığı .....                             | 45   |
| 2.3. Bambu Lifleri İçeren Briketlerin Termal Performansının Değerlendirilmesi 47          |      |
| 2.3.1. Bambu Malzemesi .....                                                              | 47   |
| 2.3.2. Briket Dökümü .....                                                                | 48   |
| 2.4. Coheating Testi Uygulaması .....                                                     | 50   |
| 2.5. Belirsizlik analizi .....                                                            | 52   |

|                                                                                           |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 3. BULGULAR VE TARTIŞMA.....                                                              | 54 |
| 3.1. Yenilikçi Yalıtım Sıvasının Termal Performansı .....                                 | 54 |
| 3.2. Yalıtım Sıvalarının Yangın Dayanımı ve Sıcaklık Maruziyeti Altındaki Davranışı ..... | 58 |
| 3.2.1. SEM Analizi .....                                                                  | 65 |
| 3.2.2. Termogravimetrik Analiz.....                                                       | 66 |
| 3.2.3. X-ışını Kırınımı Testi .....                                                       | 67 |
| 3.2.4. Regresyon Analizi .....                                                            | 68 |
| 3.2.5. Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği Analizi .....                                      | 70 |
| 3.3. Bambu Lifleri İçeren Briketlerin Termal Performansı .....                            | 71 |
| 4. SONUÇLAR.....                                                                          | 77 |
| 4.1. TSYM'nin Uygulama Potansiyeli.....                                                   | 77 |
| 4.2. BIM ve Enerji Verimliliği İlişkisi .....                                             | 78 |
| 4.3. YYS'nin Isıl Performansı.....                                                        | 78 |
| 4.4. Yangın Dayanımı.....                                                                 | 79 |
| 4.5. Bambu Lifi Katkılı Yapı Elemanının Isıl Performansı.....                             | 80 |
| KAYNAKÇA.....                                                                             | 81 |

## Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

**Anabilim Dalı** : Enerji Sistemleri Mühendisliği  
**Tez Türü** : Yüksek Lisans Tezi  
**Danışman** : Doç. Dr. Ayşe Pınar MERT CÜCE  
**Hazırlayan** : Emre ALVUR  
**Yıl** : 2025  
**Sayfa Sayısı** : 107

### ÖZET

#### SÜRDÜRÜLEBİLİR YAPILAŞMA İÇİN YÜKSEK ISIL DİRENÇLİ VE DÜŞÜK KARBON SALINIMLI CEPHE TEKNOLOJİLERİ

Günümüzde yapı sektörünün enerji tüketiminde %40'lara varan paya sahip olması, sürdürülebilir kalkınma hedefleri (SKH) doğrultusunda düşük karbon salımlı ve yüksek ısıl dirençli cephe teknolojilerinin geliştirilmesini zorunlu kılmaktadır. Bu tez, farklı yönlerden değerlendirilmiş beş özgün çalışma aracılığıyla sürdürülebilir yapı kabuğu çözümlerini çok yönlü bir yaklaşımla ele almaktadır. Tezin ilk bölümünde, termal süper yalıtım teknolojileri olan vakum yalıtım panelleri (VIP) ve aerojel battaniyeler ile güçlendirilmiş yapı kabuklarının performansları değerlendirilmiştir. Her iki malzemenin de olağanüstü düşük ısı iletkenlik değerleriyle (k-değeri) (VIP için 0.005-0.008 W/mK, aerojel için 0.013-0.018 W/mK) geleneksel yalıtım çözümlerine kıyasla çok daha yüksek ısıl direnç sunduğu gösterilmiştir. Ancak bu sistemlerin saha uygulamalarında karşılaştığı temel zorluklar, termodinamik süreksizlikler (sıcak-soğuk noktalar), termal köprülenme, montaj hassasiyeti ve maliyet, sürdürülebilir yapılaşma için dikkatle ele alınması gereken konular arasında yer almaktadır. Tez kapsamında yapılan saha performans analizleri, bu teknolojilerin etkin şekilde entegre edilmesiyle bina enerji kayıplarında %37 ila %64 arasında iyileşme sağlanabileceğini ortaya koymuştur. İkinci aşamada, bina bilgi modellemesi (BIM) süreçlerinin mevcut binaların enerji verimliliğini artırmadaki rolü araştırılmıştır. Sonuçlar, BIM tabanlı dijital ikizlerin enerji tüketim senaryolarını doğru şekilde öngördüğünü ve yapıların %15-22 arasında enerji verimliliği potansiyeli taşıdığını göstermiştir. Ayrıca BIM, yenilikçi cephe çözümlerinin modelleme, simülasyon ve optimizasyon süreçlerine önemli ölçüde katkı sağlamaktadır. Tezin üçüncü çalışması, yenilikçi yalıtım sıvasının (YYS) konvansiyonel briketler üzerine uygulanarak oluşturduğu termal performans iyileştirmesini incelemektedir. YYS uygulamasının 20-20 kalınlık konfigürasyonunda geleneksel briketlerde ölçülen 5.5 W/m<sup>2</sup>K'lık toplam ısı geçiş katsayısını (U-değeri) 2.86 W/m<sup>2</sup>K'ye düşürdüğü ve bu bağlamda %47.9 oranında bir iyileştirme sağladığı gözlenmiştir. Dördüncü çalışma kapsamında, YYS'nin yangın koşulları altındaki performansı deneysel olarak test edilmiştir. Farklı kalınlıklarda uygulanan kaba sıva (RP) ve YYS, 300°C-600°C sıcaklık aralığında ve 60-120 dakika süreyle fırın koşullarına maruz bırakılmıştır. Deneysel düzende ayrıca referans amaçlı olarak sıvasız yüzeyler de değerlendirilmiş; böylece kaplama uygulanmayan yapı elemanlarının yangın dayanımı ile kaplamalı örnekler karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir. Sonuçlar, 30 mm kalınlığındaki YYS uygulamasının 600°C'de 120 dakika sonrasında dahi >30 MPa'lık basınç dayanımı koruyabildiğini göstermiştir. HAD analizleri ve regresyon modellemeleri, bu sıvanın 173 dakikaya kadar 600°C'ye direnç gösterebileceğini; 120 dakikalık maruziyet süresinde maksimum sıcaklık ise 861°C'ye kadar ulaşabileceğini ortaya koymuştur. Son olarak beşinci çalışmada, bambu lifi katkılı briketlerin ısıl performansı coheating testi yöntemiyle değerlendirilmiştir. %2, %4 ve %6 oranlarında bambu katkısı ile hazırlanan numunelerde sırasıyla 4.698, 3.94 ve 2.77 W/m<sup>2</sup>K değerlerinde U-değeri elde edilmiştir. %6 katkılı örnek, geleneksel briketle kıyasla yaklaşık %49.9 oranında ısı geçirgenlikte iyileşme göstermiştir. Bu sonuç, termal olarak YYS ile benzer seviyeye ulaşılabilceğini gösterse de yangın dayanımı açısından YYS kadar koruma sağlamadığı için kompozit çözümler önerilmiştir. Sonuç olarak bu tez, geleneksel yalıtım anlayışının ötesine geçerek malzeme mühendisliği, enerji sistemleri ve dijital yapı tasarımı bileşenlerini bir araya getiren bütüncül bir yaklaşım sunmaktadır. YYS'den doğal katkılı briketlere, süper yalıtım malzemelerinden dijital modellemeye kadar tüm bileşenler, sürdürülebilir yapı kabuğunun sadece enerji verimliliği değil, aynı zamanda güvenlik, çevresel etki ve ekonomik uygulanabilirlik açısından da nasıl geliştirilebileceğini ortaya koymaktadır.

**Anahtar Kelimeler:** Sürdürülebilir yapı kabuğu, Yalıtım sıvası, Yangına dayanıklı cephe, Düşük karbonlu yapı teknolojileri, Doğal yalıtım malzemeleri.

**Recep Tayyip Erdogan University Institute of Graduate Studies**

**Department** : Energy Systems Engineering  
**Thesis Type** : Master Thesis  
**Supervisor** : Assoc. Prof. Dr. Ayşe Pınar MERT CÜCE  
**Author** : Emre ALVUR  
**Year** : 2025  
**Pages** : 107

**ABSTRACT**

**HIGH THERMAL RESISTANCE AND LOW CARBON EMISSION  
FACADE TECHNOLOGIES FOR SUSTAINABLE CONSTRUCTION**

Given that the building sector currently accounts for up to 40% of global energy consumption, the development of low-carbon and high-thermal-resistance facade technologies has become imperative in line with the Sustainable Development Goals (SDGs). This thesis addresses sustainable building envelope solutions through a multi-dimensional approach, based on six original studies evaluated from various perspectives. In the first part of the thesis, the performance of building envelopes enhanced with thermal super-insulation technologies, vacuum insulation panels (VIPs) and aerogel blankets, has been assessed. Both materials demonstrate significantly higher thermal resistance compared to conventional insulation solutions due to their exceptionally low thermal conductivity values (0.005-0.008 W/mK for VIPs and 0.013-0.018 W/mK for aerogels). However, key challenges in field applications, including thermal discontinuities (hot-cold spots), thermal bridging, installation precision, and cost, must be carefully addressed to ensure sustainable implementation. Field performance analyses within the scope of the thesis indicate that effective integration of these technologies can reduce building energy losses by 37% to 64%. In the second phase, the role of Building Information Modelling (BIM) processes in enhancing the energy efficiency of existing buildings has been investigated. Findings reveal that BIM-based digital twins can accurately predict energy consumption scenarios and offer energy efficiency potential in the range of 15% to 22%. Furthermore, BIM significantly contributes to the modelling, simulation, and optimisation of innovative facade solutions. The third study explores the thermal performance improvements achieved by applying an innovative insulation plaster (IIP) onto a conventional briquette. It was observed that the U-value of traditional briquettes, initially measured at 5.5 W/m<sup>2</sup>K, decreased to 2.86 W/m<sup>2</sup>K with the use of a 20-20 thickness configuration of IIP, indicating a 47.9% improvement. The fourth study experimentally evaluates the performance of this insulation plaster under fire conditions. Coarse and IIP layers applied in different thicknesses were exposed to temperatures between 300°C and 600°C for durations of 60-120 minutes in furnace conditions. Additionally, uncoated reference specimens were evaluated for comparison, allowing an assessment of the fire resistance of coated versus uncoated building elements. The results demonstrated that the IIP with a thickness of 30 mm could maintain compressive strength above 30 MPa even after 120 minutes at 600°C. CFD and regression modelling suggested that this plaster could withstand up to 600°C for 173 minutes and reach maximum exposure temperatures of up to 861°C within 120 minutes. Finally, the sixth study assessed the thermal performance of briquettes incorporating bamboo fibre using the coheating test method. Specimens prepared with 2%, 4%, and 6% bamboo content showed U-values of 4.698, 3.94, and 2.77 W/m<sup>2</sup>K, respectively. The sample with 6% bamboo demonstrated an approximate 49.9% improvement in thermal transmittance compared to conventional briquettes. Whilst this indicates a thermal performance level comparable to IIP, it offers less fire protection, thereby warranting composite solutions. In conclusion, this thesis presents an integrated approach that transcends conventional insulation strategies by bringing together material engineering, energy systems, and digital building design. From IIP to natural-fibre briquettes, from super-insulation materials to digital modelling, all components reveal how the sustainable building envelope can be enhanced not only in terms of energy efficiency, but also regarding safety, environmental impact, and economic feasibility.

**Keywords:** Sustainable building envelope, Insulating plaster, Fire-resistant facade, Low-carbon building technologies, Natural insulation materials.



## KISALTMALAR

|            |   |                                         |
|------------|---|-----------------------------------------|
| BIM        | : | Bina bilgi modellemesi                  |
| YYs        | : | Yenilikçi yalıtım sıvası                |
| RP         | : | Kaba sıva                               |
| UNP        | : | Sıvasız                                 |
| TSYM       | : | Termal süper yalıtım malzemesi          |
| VIP        | : | Vakum yalıtım paneli                    |
| HAD        | : | Hesaplama akışkanlar dinamiği           |
| SEM        | : | Taramalı elektron mikroskopu            |
| TGA        | : | Termogravimetrik analiz                 |
| XRD        | : | X-ışını kırınımı                        |
| UHPC       | : | Ultra yüksek performanslı beton         |
| HSC        | : | Yüksek dayanımlı beton                  |
| BFS        | : | Yüksek fırın çürüğü                     |
| EDS        | : | Enerji dağılımlı spektroskopi           |
| RHA        | : | Pirinç kabuğu külü                      |
| SF         | : | Silis Dumanı                            |
| U-değeri   | : | Toplam ısı geçiş katsayısı ( $W/m^2K$ ) |
| k-değeri   | : | Isı iletkenlik katsayısı ( $W/mK$ )     |
| MPa        | : | Megapaskal                              |
| %          | : | Yüzde                                   |
| t          | : | Maruziyet süresi (dakika)               |
| T          | : | Sıcaklık ( $^{\circ}C$ )                |
| $\rho$     | : | Yoğunluk ( $kg/m^3$ )                   |
| $\Delta T$ | : | Sıcaklık farkı ( $^{\circ}C$ )          |

## TABLÖLAR LİSTESİ

|                                                                                                                                                                                                              |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Tablo 1.</b> Sürdürülebilir yapı uygulamalarında değerlendirilen doğal ve atık bazlı yalıtım malzemelerine ait k-değeri ve yoğunluk değerleri .....                                                       | 13 |
| <b>Tablo 2.</b> Aerogel ve VIP tabanlı dış cephe ısı yalıtım sistemlerinin (TSYM) teknik ve uygulamaya dayalı avantajları ile potansiyel dezavantajlarının karşılaştırmalı değerlendirmesi.....              | 28 |
| <b>Tablo 3.</b> Aerogel ve VIP tabanlı içten ısı yalıtım sistemlerinin (dahili TSYM) sunduğu avantajlar ile beraberinde getirdiği uygulama sınırlamaları ve teknik zorlukların bütüncül değerlendirmesi..... | 31 |
| <b>Tablo 4.</b> Yazılıma göre kullanım alanı .....                                                                                                                                                           | 35 |
| <b>Tablo 5.</b> YYS'nin teknik özellikleri .....                                                                                                                                                             | 38 |
| <b>Tablo 6.</b> Beton karışımında kullanılan malzeme miktarları .....                                                                                                                                        | 46 |
| <b>Tablo 7.</b> Bambu elyaf oranlarına göre malzeme ağırlıkları.....                                                                                                                                         | 50 |

## ŞEKİLLER LİSTESİ

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Şekil 1.</b> a) Bina çatıları ve cepheleri için aerojel cam uygulamaları, b) ısı kaybı değerlendirmesi için aerojel yalıtımlı ve yalıtımsız bina cepheleri, c) ve 2007'de İngiltere'deki ilk aerojel yalıtımlı bina.....                                                                                                    | 24 |
| <b>Şekil 2.</b> a) Dış duvarların enerji açısından verimli bir şekilde yeniden donatılması için düşük maliyetli VIP'ler (Biswas vd., 2019) ve b) EPS köpüklerle VIP'lerin hibrit dış duvar izolasyonu (Johansson vd., 2014a) .....                                                                                             | 25 |
| <b>Şekil 3.</b> a) VIP tabanlı dış duvar izolasyonlu havalandırılmalı cephe tasarımı ve b) VIP'lerin standart saplamalı iç duvar izolasyonu (Uriarte vd., 2019).....                                                                                                                                                           | 26 |
| <b>Şekil 4.</b> BIM kullanımının avantajları .....                                                                                                                                                                                                                                                                             | 33 |
| <b>Şekil 5.</b> BIM kullanımının dezavantajları.....                                                                                                                                                                                                                                                                           | 34 |
| <b>Şekil 6.</b> YYS'nin hidrasyon öncesi görüntüsü.....                                                                                                                                                                                                                                                                        | 39 |
| <b>Şekil 7.</b> a) YYS malzemesine ait EDS katmanlı görüntüsü, b) YYS'nin spektral analiz sonucu ile elementel bileşim dağılımı .....                                                                                                                                                                                          | 40 |
| <b>Şekil 8.</b> a) YYS'nin 100x'te SEM görüntüsü, b) Mikro-nano hava gözeneklerinin temsili.....                                                                                                                                                                                                                               | 41 |
| <b>Şekil 9.</b> a) Harç hazırlama aşamasının görüntüsü, b) Kalıba yerleştirilen deney numunesinin görüntüsü, c) Deney numunesinin YYS ile kaplanması aşamasının görüntüsü, d) Deney numunelerinin yeterli süre beklendikten sonraki son görüntüsü .....                                                                        | 43 |
| <b>Şekil 10.</b> a) Hazırlanmış harcın kalıba dökülmesiyle beton numunelerinin oluşturulması, b) Numunelerin belirlenen kalınlıkta pürüzlü sıva ile kaplanma aşaması, c) Numunelerin fırına yerleştirilerek, belirli sıcaklıklara maruz bırakılması, d) Fırından sonra, numunelerin basma dayanımı testine tabi tutulması..... | 44 |
| <b>Şekil 11.</b> Betonda kullanılan agrega granülometri eğrisi.....                                                                                                                                                                                                                                                            | 46 |
| <b>Şekil 12.</b> Deneyde kullanılacak bambu tasviri .....                                                                                                                                                                                                                                                                      | 48 |
| <b>Şekil 13.</b> a) Numunenin deneye hazırlanma aşamasındaki durumu, b) Numunenin deneye hazır olduğu anki durumu.....                                                                                                                                                                                                         | 49 |
| <b>Şekil 14.</b> Deneysel sıcak kutu düzeneğinin laboratuvar ortamında modellenmiş görünümü .....                                                                                                                                                                                                                              | 51 |

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Şekil 15.</b> a) Deney düzeneğinde kullanılan ölçüm cihazlarının detaylı görünümü, b) Sıcak kutu sistemi içerisindeki iç ortamın şematik temsili .....                                                                                                                                              | 52 |
| <b>Şekil 16.</b> Konvansiyonel briketin ısı iletkenliği üzerinden test sonucunun doğrulanması.....                                                                                                                                                                                                     | 54 |
| <b>Şekil 17.</b> a) Briketin iç sıcaklığı, dış sıcaklığı ve ısı akısı değerleri 0-0, b) Briket 10-10, c) Briket 20-10, d) Briket 20-20 .....                                                                                                                                                           | 56 |
| <b>Şekil 18.</b> a) Briketin U-değeri 0-0, b) Briket 10-10, c) Briket 20-10, d) Briket 20-20 .....                                                                                                                                                                                                     | 57 |
| <b>Şekil 19.</b> Briketlerin YYS ile ısı yalıtım özelliklerinde iyileştirmeler .....                                                                                                                                                                                                                   | 58 |
| <b>Şekil 20.</b> UNP olan beton numunelerinden alınan verilerin grafiksel gösterimi .....                                                                                                                                                                                                              | 59 |
| <b>Şekil 21.</b> Hem oda sıcaklığında hem de 300, 450 ve 600°C'lik yüksek sıcaklıklarda kaydedilen 0, 10, 20 ve 30 mm kalınlıktaki YYS'li numuneler için basma dayanım verilerinin gösterimi.....                                                                                                      | 61 |
| <b>Şekil 22.</b> 450°C sıcaklıkta 60 dakika boyunca test edilen sıvalı ve UNP numune grupları.....                                                                                                                                                                                                     | 62 |
| <b>Şekil 23.</b> Oda sıcaklığında ve 300°C, 450°C ve 600°C'de UNP, 10, 20 ve 30 mm kalınlığındaki RP'li betonun basma dayanım verileri .....                                                                                                                                                           | 63 |
| <b>Şekil 24.</b> UNP, YYS'li ve RP'li numunelerinin farklı süreler boyunca 600°C'ye maruz bırakılmasıyla oluşan basma dayanım verilerinin grafiği.....                                                                                                                                                 | 64 |
| <b>Şekil 25.</b> a) Numunenin normal oda sıcaklığındaki mikroskop SEM görüntüsü, b) 300°C, c) 450°C, d) 600°C .....                                                                                                                                                                                    | 66 |
| <b>Şekil 26.</b> Deneyde kullanılan numunenin TGA.....                                                                                                                                                                                                                                                 | 67 |
| <b>Şekil 27.</b> Kuvars ve kalsitten oluşan bir numunenin X-ışını kırınımı (XRD) analizinden elde edilen grafiksel gösterimi .....                                                                                                                                                                     | 68 |
| <b>Şekil 28.</b> a) Deneysel test verileri ve regresyon analizi sonuçlarına dayalı olarak sıcaklık ile basma dayanımı arasındaki ilişkiyi gösteren grafik, b) Deneysel test verileri ve regresyon analizi sonuçlarına dayalı olarak zaman ile basma dayanımı arasındaki ilişkiyi gösteren grafik ..... | 70 |
| <b>Şekil 29.</b> a) Yüksek sıcaklıklarda UNP, b) 10-10 RP'li, c) 10-10 YYS'li, d) 20-20 YYS'li briketlerin ısı 1 performansının değerlendirilmesi .....                                                                                                                                                | 71 |
| <b>Şekil 30.</b> Önceki ve mevcut çalışmalara ait k-değerinin karşılaştırılması.....                                                                                                                                                                                                                   | 72 |

|                                                                                                                                                                |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Şekil 31.</b> a) Geleneksel, b) %2, c) %4 ve d) %6 oranında bambu katkılı briketlere ait iç-dış sıcaklıklar ve ısı akısı verilerinin karşılaştırılması..... | 74 |
| <b>Şekil 32.</b> Bambu lifi kullanımıyla briketlerin ısı yalıtım performansında sağlanan gelişmeler.....                                                       | 75 |



## GİRİŞ

Küresel ısınma, günümüzde dünya genelinde ciddi bir sorun olarak kabul edilmektedir. Bu olgu, sera gazı emisyonlarının aşırı artışı nedeniyle atmosferdeki ozon tabakasının incelmesine, dolayısıyla güneş ışınlarının doğrudan ve daha yoğun şekilde yeryüzüne ulaşmasına neden olmaktadır. Bunun sonucunda, dünya genelinde sıcaklık artışları, iklim değişiklikleri, buzulların erimesi ve deniz seviyelerinin yükselmesi gibi çevresel tehditler ortaya çıkmaktadır. Küresel ısınmanın temel sebepleri arasında fosil yakıt kullanımı, sanayi faaliyetleri, ormansızlaşma ve kontrolsüz enerji tüketimi yer almaktadır. Bu nedenle, birçok ülke karbon salınımını azaltmaya yönelik uluslararası protokoller çerçevesinde hareket etmekte, ancak bu çabalar halen küresel çapta yeterli düzeye ulaşmamaktadır (UN Climate Change, 2023; OECD, 2024). Bu sorunla mücadelede en önemli çözümlerden biri, fosil yakıtlara olan bağımlılığı azaltarak yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımını teşvik etmektir. Ancak, artan nüfus ve buna bağlı olarak büyüyen enerji talebi, mevcut yenilenebilir enerji üretiminin yetersiz kalmasına neden olmaktadır. Günümüzde küresel enerji tüketiminin yalnızca %13.4'ü yenilenebilir kaynaklardan sağlanmaktadır (Wiatros-Motyka vd., 2024). Bu bağlamda, fosil yakıt kullanımının sürmesi ve enerji talebinin hızla artması, küresel ölçekte ekonomik ve çevresel baskıları artırmaktadır. Paris İklim Anlaşması bu soruna çözüm üretmek amacıyla hayata geçirilmiş önemli bir adım olup, 12 Aralık 2015'te kabul edilmiş ve 4 Kasım 2016'da yürürlüğe girmiştir (Bodansky vd., 2021). Anlaşma, sera gazı emisyonlarını azaltmayı, küresel sıcaklık artışını sanayi öncesi seviyelere kıyasla 1.5°C ile sınırlamayı ve karbon salınımının dengelenmesini hedeflemektedir. Bu kapsamda, ülkeler yenilenebilir enerjiye yönelmekte ve binaların enerji verimliliğini artırmaya yönelik çeşitli stratejiler geliştirmektedir (Camarasa vd., 2022).

Binalar, enerji tüketimi açısından büyük bir paya sahip olup, küresel enerji tüketiminin yaklaşık %40'ını oluşturmaktadır (Cuce vd., 2024a). Ülkeler bazında incelendiğinde, Birleşik Krallık'ta bu oran %40 (Alabid vd., 2022), Cezayir'de %33 (Benmicia, 2023), Çin'de %36.3 (Tan vd., 2024), Hindistan'da %26 iken artan nüfus, kentleşme ve yüksek enerji ihtiyacı göz önüne alındığında, bu oranın 2040 yılına kadar %40'ın üzerine çıkması beklenmekte (Christopher vd., 2023) ve Türkiye'de %21

civarındadır (Atmaca ve Atmaca, 2022). Özellikle şehirleşmenin hızlanması ve alanın sınırlılığı, yüksek katlı binaların inşasını teşvik etmektedir. Ancak, yüksek katlı binalar ısı kayıpları açısından büyük bir risk taşımaktadır. Yapılan araştırmalar, bu tip binalarda ısı kayıplarının %40'ının dış cephe duvarlarından, %30'unun ise pencerelerden kaynaklandığını göstermektedir (Cuce vd., 2023). Bu nedenle, binalarda enerji verimliliğini artırmaya yönelik önlemler almak büyük önem taşımaktadır. Binaların enerji verimliliğini artırmanın en etkili yollarından biri, gelişmiş yalıtım sistemlerinin uygulanmasıdır. Isı yalıtımı, hem ısı kayıplarını önleyerek enerji tüketimini azaltmakta hem de iç mekân konforunu artırarak sürdürülebilir yapılar oluşturulmasına katkıda bulunmaktadır. Yalıtım uygulamaları, yapı elemanlarının ısı iletim katsayısını düşürerek enerji kayıplarını minimize eder ve böylece binaların ısıtma ve soğutma ihtiyaçlarını önemli ölçüde azaltır. Geleneksel yalıtım malzemeleri uzun yıllardır kullanılmakla birlikte, günümüzün çevresel hassasiyetleri ve enerji verimliliği beklentileri karşısında yetersiz kalmaktadır. Özellikle yangın güvenliği, esneklik ve sürdürülebilirlik açısından çeşitli sınırlamalar içermektedir. Bu nedenle, düşük/sıfır karbonlu bina hedeflerine ulaşmak için geleneksel yöntemlerin ötesine geçmek zorunlu hale gelmiştir.

Son yıllarda, gelişmiş termal yalıtım malzemeleri ön plana çıkmaktadır. Süper yalıtım malzemeleri (Cuce vd., 2024a), ileri düzey termal yalıtım kaplamaları (Cuce vd., 2024b) ve çevre dostu biyo-bazlı malzemeler (Cuce vd., 2024c), binalarda enerji tüketimini azaltmaya yönelik önemli çözümler arasında yer almaktadır. Aerojeller, olağanüstü düşük yoğunlukları ( $\rho$ ) ve düşük k-değeri ile dikkat çekmektedir. Yangın dayanımı açısından yüksek performans sunan bu malzemeler, minimum kalınlıkta dahi etkili ısı yalıtımı sağlayabilmektedir. Ancak, yüksek maliyetleri nedeniyle yaygın kullanımları sınırlı kalmaktadır (Cuce vd., 2014a). Buna karşın, gelişmiş termal yalıtım sıvaları, düşük  $\rho$  değeri, yüksek termal direnç, kolay uygulanabilirlik ve yangına dayanıklılık gibi avantajlarıyla daha erişilebilir ve sürdürülebilir bir alternatif olarak öne çıkmaktadır. Bu sıvalar, mevcut yapı sistemlerine kolayca entegre edilebilir olmaları sayesinde, enerji verimliliğini artırmak amacıyla geniş bir kullanım potansiyeline sahiptir. Binalarda sürdürülebilirlik odaklı çözümler arasında biyo-bazlı yalıtım malzemeleri de giderek daha fazla ilgi görmektedir. Kenevir, keten, saman gibi doğal liflerden elde edilen katkılar, yalnızca termal performansı artırmakla kalmayıp,

aynı zamanda atık yönetimi ve döngüsel ekonomi ilkelerine de katkı sağlamaktadır (Nasr vd., 2023). Literatürde farklı doğal ve atık kökenli yalıtım malzemelerinin termal iletkenlik ( $k$ ) ve yoğunluk ( $\rho$ ) değerleri üzerine pek çok çalışma yapılmıştır. Örneğin, kenevir sapı 0.063 W/mK  $k$ -değeriyle rapor edilmiştir (Latif, 2024; Nowakowski-Palka ve Roman, 2023), koyun yünü 0.034-0.067 W/mK aralığında bulunmuştur (Parlato ve Porto, 2020; Porubská vd., 2024) ve hindistancevizi lifi 0.040-0.052 W/mK değerleriyle öne çıkmaktadır (Anh ve Zoltán, 2022; Wang vd., 2018). Benzer şekilde pirinç kabukları için 0.039 W/mK (Lubwama vd., 2020; Qin vd., 2018) rapor edilmiştir. Bu tür malzemeler, düşük enerji tüketimiyle üretilebilmeleri ve çevresel sürdürülebilirlikleri sayesinde modern yapı teknolojilerinde önemli bir potansiyele sahiptir.

Ancak, biyolojik parçalanabilirlik ve dayanıklılık gibi bazı zorluklar bulunmaktadır. Günümüzde geliştirilen kimyasal işlemler ve koruma teknikleri sayesinde bu sorunların aşılması mümkün hale gelmiştir (Pawłosik vd., 2025). Bu noktada, enerji verimliliği ve sürdürülebilirlik açısından geliştirilen yeni nesil yalıtım teknolojileri, sadece termal performansı artırmakla kalmayıp aynı zamanda binaların güvenliği açısından da kritik bir rol oynamaktadır. Özellikle, yüksek katlı binalarda yangın güvenliği, enerji tasarrufu ile birlikte ele alınması gereken en önemli unsurlardan biridir. Isı yalıtım uygulamalarında kullanılan bazı geleneksel malzemeler, yeterli yangın dayanımı sağlamadığından, bina güvenliği açısından risk oluşturabilmektedir (Wi vd., 2022). Dış cephelerde kullanılan yalıtım sistemleri, yapı kabuğunun önemli bir kısmını kaplamaları nedeniyle enerji performansı ve yangın güvenliği açısından büyük önem taşımaktadır. Binalarda meydana gelen ısı kayıplarının büyük bölümü dış duvarlar aracılığıyla gerçekleştiği için, bu alanlarda uygulanacak yalıtım çözümleri, enerji verimliliğini doğrudan etkileyen belirleyici unsurlardan biridir (Cuce vd., 2023). Bununla birlikte, dış cephe sistemlerinin yalnızca termal performansı değil, aynı zamanda yangın güvenliğine katkısı da göz önünde bulundurulmalıdır. Özellikle çok katlı yapılarda ve yoğun yerleşim bölgelerinde, yangın güvenliği açısından yüksek standartlara sahip yalıtım malzemelerinin tercih edilmesi, bina kullanıcılarının güvenliği ve yapının bütünlüğü açısından kritik bir gerekliliktir. Bu bağlamda, dış cephe yalıtım sistemlerinde kullanılan malzemelerin yangına dayanıklı olması, sadece enerji tasarrufuna katkı sağlamakla kalmaz, aynı



zamanda yangının başlangıç ve yayılım aşamalarında etkili bir savunma hattı oluşturarak yapı güvenliğini artırır. Yangına dayanıklı yalıtım malzemeleri, alevin yatay ve düşey yönde yayılmasını sınırlayarak yangının büyümesini engeller ve tahliye sürecinde kullanıcıların binayı güvenli şekilde terk edebilmesi için zaman kazandırır (Kim vd., 2021). Bu nedenle, dış duvarlara entegre edilen yalıtım çözümlerinin performans değerlendirmelerinde yalnızca k-değeri gibi termal parametreler değil, aynı zamanda yangına dayanıklılık özellikleri de dikkate alınmalıdır. Günümüzde yapı sektöründe sürdürülebilirlik hedefleri doğrultusunda geliştirilen yeni nesil yalıtım sistemleri, enerji verimliliği sağlarken aynı zamanda yangın güvenliği açısından da daha yüksek standartları karşılamaya yönelik olarak tasarlanmaktadır. Bu doğrultuda hem ısı yalıtımı hem de yangına karşı koruma sağlayan çok işlevli yalıtım malzemelerinin geliştirilmesi, araştırma ve geliştirme faaliyetlerinde öncelikli konular arasında yer almaktadır. Özellikle mineral bazlı veya organik içerikli yalıtım malzemelerine alternatif olarak geliştirilen yenilikçi çözümler, dış cephe uygulamalarında performansı artırmakta ve yapıların güvenliğini üst seviyeye taşımaktadır. Sonuç olarak, bina dış cephelerine yönelik yalıtım sistemlerinin tasarımı ve uygulanmasında, enerji performansı ile yangın dayanımı arasında denge kuran, çevresel ve yapısal gereksinimleri bir arada karşılayabilen bütüncül yaklaşımlar benimsenmelidir. Bu doğrultuda geliştirilen yangına dayanıklı yalıtım çözümleri, yalnızca bireysel yapı güvenliğini değil, aynı zamanda kent ölçeğinde afet risklerini azaltmayı da mümkün kılarak, sürdürülebilir şehircilik anlayışına önemli katkılar sunmaktadır.

Yangın sırasında açığa çıkan yüksek sıcaklıklar, yalnızca can güvenliğini tehdit etmekle kalmaz, aynı zamanda yapıların taşıyıcı sistemlerinde geri dönüşü zor hasarlara neden olarak yapısal bütünlüğü zayıflatır (Rashad, 2017). Beton, yapı sektöründe yaygın olarak tercih edilmesine rağmen, yangına karşı tamamen dayanıklı değildir. Yaklaşık 400°C sıcaklıkta çimento matrisinde bulunan kalsiyum-silikat-hidrat bileşeni bozulmaya başlar; bu da bağlayıcı fazın zayıflamasına ve mikro çatlakların oluşmasına yol açar. 600-700°C seviyelerinde agregaların genleşmesiyle oluşan iç gerilmeler, betonda ileri düzeyde hasar oluşturur. 900°C'nin üzerindeki sıcaklıklarda ise kalsiyum hidroksit ayrışarak betonun mekanik dayanımını neredeyse tamamen kaybetmesine neden olur (Poon ve Azhar, 2003). Donatıların açığa çıkmasıyla birlikte

elik elemanlar doğrudan ısıya maruz kalır, sünekliğini kaybederek mukavemetini yitirir ve yapının çökme riski artar. Bu tür yapısal risklerin azaltılması için betonarme sistemlerin yangına karşı dayanıklılığının artırılması büyük önem taşıtmaktadır. Özellikle en az iki saatlik tahliye süresine dayanabilecek sistemlerin geliştirilmesi, can güvenliğini sağlamak adına kritik bir gerekliliktir (Qin vd., 2022). Bu doğrultuda, yangına dayanıklı kaplamalar ve gelişmiş yalıtım malzemeleri çözüm olarak öne çıkar. Seramik esaslı kaplamalar ve yangın geciktirici sıvalar, beton yüzeyine uygulandığında ısı geçişini yavaşlatarak iç yapının korunmasına katkı sunar. Aerojeller, vakumlu izolasyon panelleri (VIP) ve genişletilmiş perlit gibi süper yalıtım malzemeleri ise düşük k-değerine sahip olması sayesinde betonun yüksek sıcaklıklardan etkilenmesini geciktirir (Gu ve Ling, 2024). Ayrıca, nano-silika, nano-alümina ve grafen gibi nanomalzemeler betonun mikro yapısını iyileştirerek termal gerilmelere karşı direncini artırır (Kumar ve Kumar, 2020). Bu nanomalzemeler, ısı iletkenliğini azaltarak yüzeyde bir bariyer görevi görürken, aynı zamanda mikro çatlak oluşumunu engelleyerek yapının genel dayanımını korur. Yangına karşı koruma sağlamak amacıyla yalnızca yüzey kaplamaları değil, bağlayıcı sistemlerde yapılan değişiklikler de önem arz etmektedir. Geleneksel Portland çimentosuna alternatif olarak geliştirilen jeopolimer betonlar, yangına karşı üstün performans sergiler. Jeopolimerler, yangın sırasında i yapılarında seramik faz oluşumu sayesinde termal kararlılıklarını koruyabilir (Luhar vd., 2021). Ayrıca fosfat bazlı bağlayıcı sistemler de yangın esnasında yapısal çökme riskini azaltabilecek termal direnç sunabilir. Yangın sırasında betonun iç yapısında görülen pul pul dökülme etkisi, yüksek sıcaklıklarda su buharı basıncının ani artışıyla ortaya çıkar. Bu durum, özellikle düşük gözenekli yüksek dayanımlı betonlarda (HSC) daha yaygındır ve betonun yüzeyinde ani patlamalarla ciddi hasarlar oluşabilir. Pul pul dökülme etkisini önlemek amacıyla geliştirilen yangına dayanıklı sıvalar, mikro yapısal düzenlemeler ve genleşme dengeleyici katkılar, bu tür bozulmaları minimize etmektedir.

İklim değişikliği, birçok ülkede özellikle kış aylarında şiddetli hava koşullarına yol açmakta ve bu durum binalar için büyük bir zorluk teşkil etmektedir. Bu koşullardan ilk etkilenen yapı elemanları ise genellikle sıvalar olmaktadır (Bauer vd., 2020). Sıvalar, binaları sadece ateşe karşı korumakla kalmaz (Ustabas vd., 2024), aynı zamanda ani sıcaklık değişimlerine karşı da önemli bir bariyer işlevi görür. Bu zellik,

sıvaların yapısal bütünlüğünü koruyarak iç mekânın sıcaklık dengesini sağlamada etkin bir rol oynar (Savchenko ve Antoniuk, 2024). Ayrıca, sıvaların pürüzsüz yüzeyler oluşturma işlevi, estetik ve yapısal avantajlar sağlar (Ustabas ve Cuce, 2023). Tüm bu nedenlerle sıvalar, sadece termal değil, aynı zamanda mekanik ve akustik özellikleriyle de oldukça önemli bir yapı malzemesidir. Ancak, sıvaların genellikle çimento ve kireç gibi bağlayıcılarla üretilmesi, maliyetlerini düşük tutarken, performanslarını da etkileyebilmektedir. Bu bağlayıcılar sıvaların mukavemetini artırsa da hafif agregalarla yapılan takviyeler sıvaların termal ve mekanik performansını geliştirebilir. Örneğin, perlit, ponza ve vermikülit gibi malzemeler sıvalara eklenerek onların yoğunluğunu ve ısıya karşı dirençlerini artırabilir (Pavlík vd., 2023). Bu tür iyileştirmeler, sıvaların yangın gibi ani ısı değişimlerine karşı daha dayanıklı olmasını sağlarken, iç mekânın konforunu uzun süre korur.

## 1. LİTERATÜR ÖZETİ

Bu bölümde, yapı malzemelerinin ısı performans ve yüksek sıcaklık etkilerine karşı gösterdikleri performans üzerine mevcut literatür incelenmiştir. Yapıların hizmet ömrünü uzatmak, enerji verimliliğini artırmak ve iklim koşullarına karşı daha dirençli çözümler geliştirmek amacıyla malzemelerin çevresel etkilere karşı davranışlarının anlaşılması büyük önem taşımaktadır. Bu kapsamda, literatürde gerçekleştirilen deneysel çalışmalar, modelleme yaklaşımları ve performans iyileştirmeye yönelik geliştirilen yöntemler değerlendirilmiştir. İlk olarak, malzemelerin ısı transfer özellikleri, k-değerleri ve enerji tasarrufuna katkı sağlayacak kompozit çözümler üzerine yapılan araştırmalar ısı performans başlığı altında incelenmiştir. Akabinde, yangın güvenliği ve yüksek sıcaklık ortamlarında malzemelerin fiziksel ve mekanik özelliklerindeki değişimler ile bu koşullara karşı geliştirilen malzeme modifikasyon teknikleri ele alınmıştır. Her bir başlık altında, konuyla ilgili güncel araştırmalar ve elde edilen bulgular sistematik bir şekilde özetlenmiştir.

### 1.1. Isı Performansa Yönelik

Cuce vd. (2024a), Birleşik Krallık'ta 1930'lu yıllardan kalma bir evin enerji performansını, 20 mm kalınlığında aerogel süper yalıtım uygulanarak coheating testi yöntemiyle incelemiştir. Yatak odasının ısı kaybı katsayısında %63 oranında bir azalma sağlanmış ve ısı köprülerinin etkili şekilde giderildiği gözlemlenmiştir. Çalışma, aerogel kullanımının düşük kalınlıkla yüksek yalıtım performansı sağlayarak binalarda enerji verimliliğini artırabileceğini göstermiştir.

Bianco vd. (2015), tarihi binaların enerji iyileştirmesinde, mısır üretimi atıklarından elde edilen bitkisel agregalarla geliştirilmiş yeni bir ısı yalıtım sıvasını araştırmıştır. Laboratuvar ve saha uygulamaları sonucunda, geleneksel sıvalara göre 2.5-3 kat daha düşük ısı iletkenliğe sahip bu malzemenin, duvarlardan geçen ısı akısını %20-40 oranında azalttığı belirlenmiştir. Çalışma, bu malzemenin yüksek mekanik dayanım, iyi nem performansı ve düşük gömülü enerji özellikleriyle tarihi yapıların sürdürülebilir yenilemesinde etkili bir seçenek sunduğunu ortaya koymuştur.

Fenoglio vd. (2018), perlit içeriğinin kireç esaslı ısı yalıtım sıvalarının ısı ve çevresel performansına etkisini deneysel olarak incelemiştir. Çalışmada, laboratuvar

ve saha ölçümleri ile ısı-nem transfer simülasyonları yapılmış ve %40 perlit içeren karışımın en düşük ısı iletkenliğine (0.059 W/mK) ve en düşük çevresel etkiye sahip olduğu belirlenmiştir. Ayrıca, sahada kullanım koşullarında sıvanın ısı iletkenliğinde %26-30 oranında bir artış gözlemlenmiş olup, bu durumun tasarım sürecinde dikkate alınması gerektiği vurgulanmıştır.

Schuss vd. (2017), tarihi yapıların enerji iyileştirmesinde kullanılabilecek aerjel bazlı yalıtım sıvalarının uzun dönem saha performansını incelemiştir. Üç yıl süren deneysel çalışmada farklı yüzey kaplamaları ve donatı ağı varyasyonları ile uygulanan sıva sistemlerinin sıcaklık, nem ve ısı akısı değerleri takip edilmiştir. Bulgular, aerjel sıvaların teorik k-değerlerine yakın performans gösterdiğini, 40 mm kalınlığındaki bir uygulamanın mevcut bir tuğla duvarda %64 oranında U-değeri azalması sağladığını ortaya koymuştur. Ayrıca, ince taneli kaplamaların donatı ağı olmadan zamanla yüzey çatlaklarına daha yatkın olduğu gözlemlenmiştir.

Selvaranjan vd. (2021), duvar sıvalarında kullanılmak üzere pirinç kabuğu külü (RHA) bazlı bir harç geliştirerek, ısı yalıtım performansını ve çevresel sürdürülebilirliği artırmayı amaçlamıştır. Çalışmada, RHA ile kısmi kum ikamesi yapılmış ve %30 RHA içeren sıvanın ısı iletkenliğinin konvansiyonel sıvaya göre %59 daha düşük olduğu, ısı akısında %10, duvar ısı transferinde ise %26 azalma sağladığı belirlenmiştir. Ayrıca, RHA bazlı sıvanın üretiminin sera gazı emisyonlarını yaklaşık %14 oranında azalttığı tespit edilmiştir.

Krstić ve Domazetović (2020), binaların gerçek enerji tüketimini daha doğru belirlemek ve enerji performans farkını azaltmak amacıyla, laboratuvar ortamında gerçekleştirilen uzun süreli bir deneysel çalışmayı sunmuştur. Araştırmada, dış hava koşullarının etkisinin simüle edilerek minimize edildiği bir test odası kullanılarak 40 gün boyunca ısı kaybı katsayısı ve toplam ısı kaybı ölçümleri yapılmıştır. Elde edilen veriler, tasarım ve gerçek enerji performansları arasındaki farkı karakterize etmek için kullanılmıştır. Çalışmada enerji performans farkının %-40 ile %13 arasında değiştiği tespit edilmiştir. Gerçek değerlerin kullanılmasıyla performans farkının azaltılabileceği ve özellikle duvarların U-değerlerindeki değişimlerin toplam ısı kaybı üzerinde belirgin etkiler yarattığı sonucuna varılmıştır.

Charai vd. (2021) sıradan sıvanın ısı özelliklerini iyileştirmek amacıyla sıvaya farklı oranlarda kenevir lifi ekleyerek yaptıkları çalışmada, lif içeriğinin artmasıyla

birlikte k-değeri katsayısının azaldığını tespit etmişlerdir. Yapılan deneyler sonucunda, sıvada kenevir lifi içeriği %0'dan %6'ya çıkarıldığında k-değerinde belirgin bir düşüş gözlemlenmiştir. Bu durum, kenevir lifi katkısının sıvanın yalıtım özelliklerini artırıcı etkisini ortaya koymaktadır.

Topçu ve Işıkdag (2007) %30 oranında perlit ilavesiyle üretilen tuğlanın k-değeri katsayısını hesaplamışlardır. Çalışma sonucunda, standart bir tuğlanın ısı iletkenliği 0.47 W/mK olarak belirlenmişken, perlit katkılı tuğlanın k-değeri 0.22 W/mK olarak hesaplanmıştır. Bu sonuç, perlit katkısının tuğlanın ısı yalıtım performansını önemli ölçüde artırdığını ve perlit katkılı tuğlaların standart tuğlalara kıyasla çok daha iyi bir yalıtım malzemesi olabileceğini göstermektedir.

Rashad vd. (2022), FA, MK ve silis dumanı (SF) gibi puzolanik malzemeler kullanılarak, hafif agrega veya köpürtücü katkı maddesi olmadan ısı yalıtım sıvaları üretilebileceğini göstermiştir. Çalışmada, bu malzemelerle üretilen sıvaların düşük k-değerine (0.30-0.48 W/mK), yüksek gözeneklilik ve düşük  $\rho$  değeri gibi yalıtım açısından avantajlı özelliklere sahip olduğu bulunmuştur. En düşük k-değeri SF ve alçı bazlı sıvalarda elde edilirken, geleneksel çimento harcı en yüksek k-değerine sahiptir. Ayrıca, k-değeri ile  $\rho$  arasında doğrusal bir ilişki olduğu,  $\rho$  azaldıkça iletkenliğin de düştüğü belirlenmiştir.

Li vd. (2017), prefabrike çelik-bambu kompozit duvar yapısının ısı ve enerji performansını deneysel ve sayısal yöntemlerle incelemiştir. Çalışmada, bu yapı elemanının U-değerinde %26.1-48.4 oranında iyileşme sağladığı ve toplam enerji tasarrufunun %27.1-40.9 seviyelerine ulaştığı belirlenmiştir.

Quan vd. (2023), otoklavlanmış gazbeton içerisine doğal bambu ve bazalt lifleri ekleyerek lif içeriği ve uzunluğundaki değişimlerin k-değeri üzerine etkisini araştırmışlardır. Çalışma sonuçlarına göre, %0.4 oranında doğal bambu lifi içeren numuneler, aynı oranda bazalt lifi içeren numunelere göre yaklaşık %11 daha iyi bir k-değeri performansı göstermiştir. Lif uzunluğu 12 mm'ye çıkarıldığında her iki lif türü için de en düşük k-değerleri elde edilmiştir: bazalt lifi için 0.142 W/mK ve bambu lifi için 0.156 W/mK. Bu bulgular, doğal lif katkılarının gazbetonun ısı yalıtım özelliklerini iyileştirmede etkili olduğunu göstermektedir.

Cuce vd. (2016a), binalarda enerji kaybının büyük kısmından sorumlu olan pencerelerin ısı performansını iyileştirmeye yönelik üç yeni camlama teknolojisini

(vakum tüplü pencere, ısı yalıtımlı güneş camı ve güneş havuzu penceresi) deneysel olarak incelemiştir. Standartlaştırılmış coheating testleri sonucunda, en düşük U-değeri  $0.40 \text{ W/m}^2\text{K}$  ile vakum tüplü pencerede elde edilmiş ve bu değer, geleneksel çift camlı pencerelere kıyasla yaklaşık beş kat daha iyi yalıtım sağlamıştır. Diğer iki camlama ürünü de geleneksel ürünlere kıyasla oldukça düşük U-değerleri sunarak enerji verimliliği açısından yüksek potansiyel göstermiştir. Bu teknolojilerin maliyetlerinin de piyasadaki standart camlama ürünleriyle rekabet edebilir seviyede olduğu belirtilmiştir.

Cuce (2017), çift camlı pencerelerde hava sızdırmazlığının ısı yalıtım üzerindeki etkisini deneysel olarak incelemiştir. Nottingham'daki tipik bir konutta yapılan çalışmada, biri hava geçirmez özel kapakla kapatılan, diğeri ise geleneksel halde bırakılan iki pencere kanadı karşılaştırılmıştır. Sonuçlara göre, sızdırmaz pencere kanadının U-değeri  $1.79 \text{ W/m}^2\text{K}$  olarak ölçülmüş ve bu, geleneksel pencerenin ( $2.67 \text{ W/m}^2\text{K}$ ) değerine göre %33 oranında daha düşük ısı kaybı anlamına gelmektedir.

Cuce ve Cuce (2016), içten yapılan ısı yalıtım uygulamalarında termal köprülerin etkisini deneysel ve istatistiksel olarak incelemiştir. 20 mm kalınlığındaki lif-silika bazlı opak arojel battaniyesiyle yapılan iç yalıtım sonrası, yalıtımsız ayırıcı duvardan olan ısı kaybının  $0.66 \text{ W/m}^2$ 'den  $5.86 \text{ W/m}^2$ 'ye çıktığı gözlemlenmiştir. Bu durum, termal köprülerin özellikle duvar birleşim noktalarında belirgin hale geldiğini ve uygun önlemler alınmadığında yalıtımın etkinliğini ciddi şekilde azaltabileceğini göstermektedir. Çalışma, güçlendirme uygulamalarında yalnızca yalıtım yapılmasının yeterli olmadığını, termal köprülerin dikkate alınmasının şart olduğunu vurgulamaktadır.

Abdullah ve Ibrahim (2022), şeker kamışı ve artıklarından elde edilen doğal selülozik liflerin çimento harcına katılarak ısı yalıtım özelliklerine etkisini incelemiştir. %10, %20 ve %30 oranlarında lif katkısıyla yapılan deneylerde, ısı iletim katsayısında belirgin azalmalar gözlemlenmiş; en iyi sonuç %30 lif içeren Model D ile elde edilmiş ve ısı geçiş katsayısında %47.2 azalma sağlanmıştır. Bu durum, eğitim yapılarında soğutma ve ısıtma için gereken enerji tüketimini %11.9 oranında azaltmış, ayrıca karbon salımında %52.2 oranında düşüş sağlamıştır.

Elkhayat vd. (2023), Mısır'daki sıcak ve kurak iklim koşullarında konutlarda kullanılan beş farklı ısı yalıtım malzemesinin (vermikülit, taş yünü, fenolik köpük,

ekstrüde polistiren (XPS) ve polietilen) ısı performans ve enerji tasarrufuna etkisini değerlendirmiştir. DesignBuilder simülasyonlarıyla yapılan analizlerde, dış duvarlara uygulanan yalıtımın iç mekân termal konforunu önemli ölçüde artırdığı ve enerji tüketimini azalttığı belirlenmiştir. En iyi sonuçları XPS sağlamış; yıllık enerji tüketimini %9.72 oranında azaltmış ve iç ortam konfor süresini yılın %33'üne çıkarmıştır.

Messahel vd. (2022), düşük maliyetli konutlarda atık malzemeler kullanarak geliştirilen yapı bileşenlerinin ısı performansını incelemiştir. Çalışmada, içi sırasıyla plastik poşet, kum ve su ile doldurulmuş plastik şişelerden oluşan üç farklı panel test edilmiştir. Deneysel sonuçlara göre en düşük U-değeri, içi plastik poşetle doldurulmuş şişelere sahip örnekte elde edilmiştir ( $1.58 \text{ W/m}^2\text{K}$ ), bu da kum dolu şişelere kıyasla yaklaşık %60 daha iyi ısı yalıtım sağlamıştır. Ancak bu tür örneklerin düşük basınç dayanımı inşaatta uygulama açısından sınırlayıcı olabileceği unutulmamalıdır.

El-Lawindy vd. (2024), şeker kamışından elde edilen selüloz liflerinin farklı oranlarda (%5-%20) kil tuğlalara eklenmesiyle elde edilen ısı yalıtım performansını incelemiştir. Yapılan deneyler ve simülasyonlar, lif oranı arttıkça ısı iletim katsayısında belirgin düşüşler ve  $\text{CO}_2$  emisyonlarında %63.3'e varan azalma sağlandığını ortaya koymuştur.

Cuce vd. (2023), geleneksel briket yüzeyine uygulanan YYS'nin farklı kalınlıklarda ısı yalıtımına etkisini deneysel olarak incelemiştir. Yapılan testler sonucunda, yalıtımsız brikette  $5.5 \text{ W/m}^2\text{K}$  olarak ölçülen toplam ısı geçiş katsayısı, 20-20 mm YYS kalınlığı uygulanan örnekte  $2.86 \text{ W/m}^2\text{K}$ 'ye düşmüş ve bu durum yaklaşık %48 oranında iyileşme anlamına gelmiştir. Elde edilen bu sonuç, yeni nesil sıvanın iç yapısındaki ölü hava boşlukları ve bor minerallerinin sağladığı ek ısı direnci sayesinde gerçekleşmiştir. Bu çalışma, düşük maliyetli ve uygulanabilir yalıtım çözümlerinin enerji kayıplarını önemli ölçüde azaltılabileceğini göstermesi açısından dikkat çekicidir.

Cuce vd. (2024d) ise doğal bir malzeme olan bambu liflerinin briket harcına %2 oranında eklenmesiyle elde edilen ısı iyileşmeleri değerlendirmiştir. Coheating test metodolojisiyle yapılan ölçümlerde, yalıtımsız briketin toplam ısı geçiş katsayısı  $5.5 \text{ W/m}^2\text{K}$  olarak belirlenmiş, bambu katkılı örnekte bu değer  $5.26 \text{ W/m}^2\text{K}$ 'ye düşmüştür. Bu da yaklaşık %5 oranında bir iyileşmeye karşılık gelmektedir. Elde



edilen sonuçlar, düşük oranda kullanılan bambu liflerinin dahi ısı geçiş üzerinde olumlu etkisi olduğunu ve doğal, sürdürülebilir malzemelerin yapı sektöründe kullanılabilirliğini kanıtlamaktadır.

Vijayan vd. (2022), yaz aylarında iç mekânların aşırı ısınmasını önlemek amacıyla gelişmiş cam teknolojilerini değerlendirmiştir. Çalışmalarında, aerojel camların pencere kaynaklı ısı geçişini %57 oranında azalttığını ve çift camlara göre %8.5 daha yüksek ısı performans sağladığını rapor etmişlerdir. Bu bulgu, özellikle ticari binalarda enerji verimliliği ve ısı konfor açısından aerojel camların etkili bir çözüm sunduğunu ortaya koymaktadır.

Van de Putte vd. (2021), enerji kullanımı yüksek ve iç konforu zayıf olan tarihi mimariye sahip 12 yardım evinde, dış cephe karakterini koruyarak aerojel sıva ile ısı iyileştirme çalışması gerçekleştirmiştir. Önceden yapılan hesaplamalar, ısı kayıp katsayısında %57 oranında iyileşme (382'den 163 W/K) öngörmüşken, saha ölçümleri sonrası gerçek iyileşme %37 olarak düzeltilmiştir. Bu fark, mevcut duvarların beklenenden daha iyi performans göstermesi ve yeni izolasyon malzemelerinin uygulama kaynaklı düşük performansı ile açıklanmıştır. Çalışma, aerojel sıvanın düşük ısı iletkenliğine rağmen, yetersiz hava sızdırmazlığı ve işçilik hatalarının ısı performansı sınırladığını vurgulamakta; coheating testi gibi yerinde ölçüm yöntemlerinin tasarım ve gerçek performans arasındaki farkı kapatmada önemli olduğunu göstermektedir.

Kim vd. (2022), mevcut binalarda ısı köprülerinden kaynaklanan ısı kayıplarını daha doğru ölçmek amacıyla yerinde ısı köprüsü ölçüm yöntemini geliştirmiştir. Bu yöntem, klasik ısı akı ölçer yöntemine ek olarak coheating testi ile birleştirilmiş ve ısı köprülerinin neden olduğu kayıpların %16.98'ini oluşturan yaklaşık 21.33 W/K değerinde ısı kaybı belirlenmiştir.

Buna ek olarak, literatürde gelişmiş termal yalıtım malzemelerinin yanı sıra doğal ve atık kökenli yalıtım malzemeleri de giderek artan bir ilgi görmektedir. Kenevir, koyun yünü, mantar, hindistancevizi lifi, pirinç kabukları gibi malzemeler üzerine yapılan araştırmalar, düşük ısı iletkenliği ( $k$ ) ve farklı yoğunluk ( $\rho$ ) değerleri ile enerji verimliliğini artırmada önemli potansiyel sunduğunu göstermektedir (Latif, 2024; Anh ve Zoltán, 2022; Lubwama vd., 2020). Bu çalışmalara ilişkin ayrıntılı  $k$  ve  $\rho$  değerleri Tablo 1'de özetlenmiştir. Tablo, kenevir sapı için 0.063 W/mK (Latif, 2024;

Nowakowski-Pałka ve Roman, 2023), koyun yünü için 0.034-0.067 W/mK (Parlato ve Porto, 2020; Porubská vd., 2024), hindistancevizi lifi için 0.040-0.052 W/mK (Anh ve Zoltán, 2022; Wang vd., 2018), pirinç kabukları için 0.039 W/mK (Lubwama vd., 2020; Qin vd., 2018) gibi değerleri göstermekte olup, farklı doğal ve atık bazlı malzemelerin termal performansını karşılaştırmalı olarak sunmaktadır.

**Tablo 1.** Sürdürülebilir yapı uygulamalarında değerlendirilen doğal ve atık bazlı yalıtım malzemelerine ait k-değeri ve yoğunluk değerleri

| Malzeme              | k-değeri (W/mK) | $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> ) | Kaynak                                         |
|----------------------|-----------------|-----------------------------|------------------------------------------------|
| Kenevir Sapı         | 0.063           | ~930                        | (Latif, 2024; Nowakowski-Pałka ve Roman, 2023) |
| Koyun yünü           | 0.034-0.067     | 10-20                       | (Parlato ve Porto, 2020; Porubská vd., 2024)   |
| Mantar               | 0.037-0.050     | 150                         | (Alves vd., 2024; Wilton, 2024)                |
| İnsan saçı           | 0.037           | 900                         | (Nanda ve Satapathy, 2020)                     |
| Kamış                | 0.056           | 137.6                       | (Tsapko vd., 2020)                             |
| Saman balyası        | 0.052-0.066     | 80-120                      | (Tlajji vd., 2023)                             |
| Hindistancevizi lifi | 0.040-0.0522    | 1150                        | (Anh ve Zoltán, 2022; Wang vd., 2018)          |
| Mısır koçanı         | 0.046-0.057     | ~247                        | (Bovo vd., 2022)                               |
| Buğday sapı          | 0.063-0.334     | 85                          | (Binici vd., 2020; Carlos Javier vd., 2023)    |
| Hurma lifi           | 0.083           | 900-1200                    | (Abdellah vd., 2024)                           |
| Ayçiçeği             | 0.050           | 14                          | (Abbas vd., 2021)                              |
| Ceviz kabuğu         | 0.050           | 1220                        | (Pradhan vd., 2020)                            |

**Tablo 1 (Devam).** Sürdürülebilir yapı uygulamalarında değerlendirilen doğal ve atık bazlı yalıtım malzemelerine ait k-değeri ve yoğunluk değerleri

| Malzeme              | k-değeri (W/mK) | $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> ) | Kaynak                                 |
|----------------------|-----------------|-----------------------------|----------------------------------------|
| Ananas yaprağı lifi  | 0.030-0.034     | 1526                        | (Do vd., 2021; B a vd., 2022)          |
| Çam kozalağı         | 0.057           | 505                         | (Pradhan vd., 2020)                    |
| Yer fıstığı kabuğu   | 0.14            | ~316                        | (Lamrani vd., 2017)                    |
| Durian               | 0.064           | 428                         | (Mahmood, 2020)                        |
| Şeker kamışı lifleri | 0.045           | 100-120                     | (Beheshti vd., 2023; Ramlee vd., 2021) |
| Midye kabuğu         | 0.175           | 1100                        | (Martínez-García vd., 2020)            |
| Pirinç kabukları     | 0.039           | 1143                        | (Lubwama vd., 2020; Qin vd., 2018)     |
| Kahve posası         | 0.11            | 100-140                     | (Lubwama vd., 2020; Meharu, 2019)      |
| Muz lifi             | 0.0415          | ~73                         | (Shobha, 2020)                         |

## 1.2. Yüksek Sıcaklıklara Karşı Performansına Yönelik

Lee vd. (2012), 120-200 MPa basınç dayanımına sahip UHSC kolonlarda farklı türdeki liflerin yangın dayanımı üzerindeki etkilerini incelemiştir. Çalışmada polipropilen, naylon ve çelik liflerin birlikte kullanılmasıyla patlamalı ayrılmanın önlenildiği ve yangın direncinin önemli ölçüde arttığı belirlenmiştir. Ayrıca, EAO cürufu agregalarının daha yüksek basınç dayanımı sağladığı ve yangın sonrası kalan dayanımın lif tipine bağlı olarak büyük ölçüde değişmediği rapor edilmiştir.

Molay vd. (2019), farklı petrografik kökene sahip kırılmış kumlarla üretilen betonların yüksek sıcaklıklara karşı dayanımını incelemiştir. Çalışmada, bazalt, gnays ve alüvyonik kumlu betonlar karşılaştırılmış; 300°C, 600°C ve 900°C'ye kadar ısıtma-soğutma döngülerine maruz bırakılmıştır. Sonuçlar, bazaltlı betonun mekanik özelliklerinde ve yoğunlukta en fazla bozulmayı gösterdiğini, buna karşılık alüvyonik

ve gnays kumlu betonların yüksek sıcaklık dayanımında daha iyi performans sergilediğini ortaya koymuştur. Yoğunluk ve porozite gibi fiziksel özelliklerle dayanım kayıpları arasında güçlü bir ilişki tespit edilmiştir.

Ma vd. (2023), aerjel katkılı betonların yüksek sıcaklıklara maruz kalması sonrası fiziksel, termal ve mekanik özelliklerindeki değişimleri incelemiştir. Çalışma, özellikle 200-600°C aralığında aerjelin beton dayanımını korumada etkili olduğunu; 800-1000°C'de ise mineralojik yapıda büyük değişimlerin ve mekanik kayıpların meydana geldiğini ortaya koymuştur.

Kiran vd. (2022) çalışmasında, yüksek sıcaklıklara maruz kalan HSC mekanik özelliklerini korumak amacıyla hafif yalıtım sıvalarının etkisi araştırılmıştır. Geliştirilen sıvalar arasında kum sıvası (SP), alçı-perlit sıvası (GPP) ve alçı-mineral yünü sıvası (GMP) yer almıştır. Deneysel bulgular, GPP ve GMP ile kaplanan beton örneklerinin referans ve SP örneklerine kıyasla daha düşük sıcaklık penetrasyonuna, daha az kütle kaybına ve daha az yüzey çatlağına sahip olduğunu göstermiştir. Özellikle 986°C'ye kadar ısıtılan numunelerde GMP kaplaması, bağ dayanımındaki kaybı %17.8 ile sınırlı tutarken, referans numunelerde bu kayıp %61.1'e ulaşmıştır.

Aydın (2008) çalışmasında, öğütülmüş yüksek fırın cürufu (BFS) katkılı ponza esaslı çimento harçlarının yüksek sıcaklıklara (900°C'ye kadar) karşı mekanik ve mikro yapısal performansları araştırılmıştır. Deneyler, öğütülmüş BFS içeriğinin artmasının özellikle 900°C'de yüksek sıcaklık dayanımını önemli ölçüde iyileştirdiğini göstermektedir. Örneğin, %80 öğütülmüş BFS içeren harçların 900°C'ye maruz bırakılıp hava soğutulması durumunda basınç dayanımı kaybı yalnızca %23 olurken, öğütülmüş BFS içermeyen harçlarda bu kayıp yaklaşık %70'e ulaşmıştır.

Mundhada ve Pofale (2015) çalışmasında, farklı beton dayanım sınıflarının (M20, M25 ve M30) yüksek sıcaklıklara maruz kaldıktan sonraki basınç dayanımı performansı değerlendirilmiştir. Toplam 90 adet beton küp numune, 28 günlük kür ve 24 saatlik hava kurutmasının ardından 200°C ile 800°C arasında değişen sıcaklıklara, 1 saat ve 2 saatlik maruziyet süreleriyle fırında tabi tutulmuştur. Numuneler oda sıcaklığında 24 saat soğutulduktan sonra basınç dayanımı testine alınmıştır. Bulgular, 500°C'ye kadar betonun basınç dayanımında yalnızca sınırlı düşüş olduğunu ve bu sıcaklığa kadar yapı elemanlarının kullanılabilirliğini koruduğunu göstermektedir.

Ancak, 650°C civarında dayanımdaki belirgin düşüş yapısal güvenlik açısından kritik seviyeye ulaşmakta ve güçlendirme ihtiyacını gündeme getirmektedir.

Aydın ve Baradan (2007) tarafından gerçekleştirilen bu çalışmada, yüksek sıcaklıkların ponza ve FA içeren çimento esaslı harçların mekanik özelliklerine etkisi araştırılmıştır. Dört farklı karışım, 300°C, 600°C ve 900°C sıcaklıklara 3 saat boyunca maruz bırakılmış, ardından numuneler hava ile ya da su ile soğutularak artık basınç ve eğilme dayanımları belirlenmiştir. Sonuçlara göre, %60 oranında FA içeren harç karışımı (FA60) özellikle 900°C’de üstün performans sergilemiştir.

Bilow ve Kamara (2008), silisli agregaya içeren beton numuneleri yüksek sıcaklıklarda test etmişlerdir. Bu testlerin sonucunda elde edilen bilgilere göre, betonun basınç dayanımında 400°C’ye kadar belirgin bir değişim görülmezken, 650°C ve sonrasında kademeli bir azalma başladığını ve basınç dayanımı testinde %55’lik bir kayıp meydana geldiğini belirtmişlerdir.

Sancak vd. (2008), ponza agregasıyla üretilmiş hafif betonlar (LWC) ile normal ağırlıklı betonların (NWC) yüksek sıcaklıklara karşı performansını karşılaştırmalı olarak incelemiştir. Bu amaçla, SF ve süper akışkanlaştırıcı (SP) katkılarıyla hazırlanan 12 farklı beton karışımı 20-1000°C aralığında test edilmiştir. Basınç dayanımı ve ağırlık kaybı parametreleri değerlendirilmiştir. Elde edilen bulgulara göre, LWC örneklerinin birim ağırlığı NWC’ye göre %23 daha düşük bulunmuştur. Ayrıca, %2 oranında SP içeren LWC karışımı, yüksek sıcaklık sonrası başlangıç basınç dayanımının %38’ini koruyabilmiştir. 800°C ve üzerindeki sıcaklıklarda SF içeriği arttıkça, basınç dayanımı kayıplarının da arttığı gözlenmiştir.

Kiran vd. (2023) kil tuğla prizmalarının yangın performansını incelemiş; Mukum, vermikülit ve perlit sıvalarla kaplanmış örnekler, ISO 834 standardına göre 30 ila 120 dakika arasında 821°C ile 1029°C sıcaklıklara maruz bırakılmıştır. Sonuçlar, perlit sıvalı örneklerin 1029°C’de anlamlı bir dayanım kaybı göstermeyip %70’e varan yüksek direnç sağladığını göstermiştir. Vermikülit ve perlit sıvalar, yüksek sıcaklıklarda tuğla yapıların termal korumasını artıran, sürdürülebilir ve ekonomik malzemeler olarak öne çıkmaktadır.

Koksal vd. (2023), genişletilmiş vermikülit tozu (EVP) ve iki farklı çimento türü (Portland ve kalsiyum alüminat) ile üretilen hafif sıvaların yalıtım ve yangına dayanım özelliklerini 20-1100°C arası sıcaklıklarda incelemiştir. EVP/CAC oranı 4

olan karışım, yüksek sıcaklık karşısında en iyi basınç dayanımını gösterirken, EVP/CAC oranı 6 olan örnek en düşük ısı iletkenliğine ulaşmıştır.

Li vd. (2023), genleşmeyen yangına dayanıklı kaplama uygulanan betonun yüksek sıcaklığa (200-800°C) maruz kalması sonrası mekanik özelliklerini ve farklı soğutma yöntemlerinin (hava ve su) etkilerini incelemiştir. Yangın kaplaması, betonun ısı geçişini yavaşlatmış, kütle kaybını azaltmış ve kaplamasız örneklerle göre basınç dayanımını %10-%93.1, yarıma çekme dayanımını ise %24.7-%70.7 oranlarında artırmıştır. Ayrıca, su ile soğutulan örneklerde dayanım ciddi oranda düşerken, hava ile soğutulan kaplamalı örnekler daha yüksek kalıntı dayanım göstermiştir.

Li vd. (2004), C40, C60 ve C70 sınıfındaki normal ve HSC'lerin 200-1000°C sıcaklıklara maruz bırakılması sonrası mekanik davranışlarını incelemiştir. Yağ fırını kullanılarak yapılan deneylerde, özellikle HSC'lerin basınç dayanımının sıcaklıkla birlikte erken aşamada azalmaya başladığı ve 1000°C'de C70 betonun basınç dayanımının yalnızca %27.3'ünün korunduğu belirlenmiştir. Eğilme ve yarıma çekme dayanımları da benzer şekilde sıcaklıkla azalmış, özellikle 800°C sonrası ciddi bozulmalar gözlemlenmiştir.

Asamatdinov ve ark. (2020), kil-alçı esaslı modifiye bağlayıcılar içeren dağınık donatılı sıva karışımlarının reolojik ve yapısal özelliklerini incelemiştir. Mineral lif takviyesi ile özellikle eğilme dayanımında %20'ye varan artış sağlanarak sıva kaplamalarının yüksek sıcaklıklara karşı direncinin arttığı görülmüştür. Lif çapı önemli bir etki göstermezken, yarı hidrat alçı içeriği basınç dayanımını doğrudan etkilemiştir.

Shen ve Xu (2019), farklı sıcaklıklarda kurutulan betonların basınç dayanımı ile gözeneklilik ve nem içeriği arasındaki ilişkiyi deneysel ve kuramsal olarak incelemiştir. Çalışmada, 40°C ila 250°C arasında kurutulan betonlarda nem azaldıkça basınç dayanımının önce düştüğü, sonra arttığı; ayrıca aynı nem oranında bile sıcaklık yükseldikçe dayanımın azaldığı belirlenmiştir. 105°C üstü sıcaklıklarda kimyasal bağlı suyun kaybı nedeniyle gözeneklilikte ve gözenek bağlantısında belirgin artışlar gözlenmiştir.

Reddy ve Ramaswamy (2017), granit ve demir cevheri agregası içeren, saf çimento veya %40 oranında FA ile ikame edilmiş çimento kullanılan beton örneklerini, 28 ve 365 günlük yaşlarda fırın içinde farklı sıcaklıklara maruz bırakarak deneysel bir

Çalışma yrtmştir. Numunelerde su imento oranı 0.4 ve imento miktarı 385 kg/m<sup>3</sup> olarak belirlenmiştir. Fırın sıcaklığı dakikada 12°C artacak şekilde kontrol edilerek sırasıyla 200°C, 374°C, 500°C, 700°C ve 800°C'ye ulaşılmıştır. Bu sıcaklıklara maruz kalan betonların basınç dayanımı (CS), oda sıcaklığında tutulan referans numunelere kıyasla değerlendirildiğinde, 200°C'de yaklaşık %3, 374°C'de %20, 500°C'de %40 oranında azalma göstermiştir. Sıcaklık arttıkça bu azalma daha belirgin hale gelmiş ve 700°C'de %55, 800°C'de ise %75'e ulaşmıştır. Özellikle %40 FA içeren betonlarda 800°C'ye ulaşıldığında basınç dayanımı kaybı %80 seviyesine kadar çıkmıştır.

Zulkifeli ve Saman (2017), kum harcını genleştirilmiş perlit (EP) agregası ile hacimce %0, 10, 20, 30 ve 40 oranlarında iyileştirmeyi amaçlamaktadır. Çalışmada sıcaklık değişkenleri oda sıcaklığı, 200, 400, 700 ve 1000°C olarak belirlenmiş ve bu sıcaklıklarda numunelere basınç dayanımı testi uygulanmıştır. Çalışma sonucunda, %0 EP agregalı numune oda sıcaklığı ile 400°C arasındaki en iyi basınç dayanımını gösterirken, %20 EP agregalı numune 700 ile 1000°C arasındaki yüksek sıcaklıklarda en iyi dayanımı sergilemiştir.

Ustabas vd. (2024) alışmasında, yangına maruz kalan beton yüzeylerin dayanımını artırmak amacıyla YYS, RP ve sıvasız (UNP) rnekler karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. 300, 450 ve 600°C sıcaklıklara sırasıyla 60, 90 ve 120 dakika boyunca fırında maruz bırakılan numunelerin basınç dayanımları test edilmiştir. Sonuçlar, özellikle 30 mm kalınlığındaki YYS ile kaplanan beton rneklerinin 600°C'de 120 dakika maruziyet sonunda 30 MPa üzerinde dayanım göstererek en iyi performansı sergilediğini ortaya koymaktadır. Ayrıca, YYS uygulamasının RP'ye göre %13.4 daha iyi koruma sağladığı belirlenmiş; regresyon ve HAD analizleriyle bu sonuçlar desteklenmiştir.

Yao vd. (2024) alışmasında, yüksek sıcaklığa maruz kalan polipropilen fiber takviyeli betonun (PFRC) basınç dayanımı ve kırılma özellikleri, farklı fiber içerikleri ve uzunluklarıyla incelenmiştir. Çalışma, fiberlerin oda sıcaklığında basınç dayanımını ve kırılma enerjisini artırdığını, ancak 300°C zerindeki sıcaklıklarda bu etkinin azaldığını göstermektedir. 600°C'de fiber katkılı örneklerin kırılma enerjisi HSC göre daha düşük bulunmuş ve kırılma kuvveti kaybı %81'in üzerine çıkmıştır. Ayrıca, fiber içeriği ve uzunluğunun etkisinin yüksek sıcaklıklarda tutarsız olduğu, en iyi dayanımın 6 mm uzunluk ve %0.2 içerikte sağlandığı tespit edilmiştir.

Ezzedine El Dandachy vd. (2024), MK bazlı jeopolimer harçların yangın dayanımını incelemiştir. MK harçlar, 600-700°C'ye kadar mekanik dayanımlarını korurken, Portland çimentosu esaslı harçlar 500-600°C arasında dayanım kaybı yaşamaktadır. Ayrıca, MK harçların 200°C'de basınç dayanımı artmakta ve yüksek sıcaklıklarda daha iyi termal kararlılık göstermektedir.

Gao vd. (2023), yüksek sıcaklıklarda UHPC çelik lif içeriği ve sıcaklık etkilerini incelemiştir. Sıcaklık 600°C'ye kadar arttıkça, %3 çelik lif katkısıyla UHPC'nin kalan basınç dayanımı %26'ya kadar artmakta, ancak 600°C'nin üzerindeki oksidasyon nedeniyle dayanım azalması gözlenmektedir. Ayrıca, %6 çelik lif oranı UHPC'nin işlenebilirliği için kritik sınır olarak belirlenmiştir. Yüksek sıcaklıklarda liflerin matrisle uyumsuz genleşmesi, ara yüzeyde hasarı artırarak dayanım düşüşüne neden olmaktadır.

Pachideh vd. (2024), yüksek sıcaklıklara maruz kalan betonlarda çimentonun %6 ve %10 oranında zeolit ve bentonit ile kısmi ikamesinin mekanik dayanım üzerindeki etkilerini incelemiştir. 150°C'de, özellikle %10 bentonit içeren numunelerde basınç dayanımında %40'a varan artışlar gözlenirken, 300 ve 700°C'de çekme dayanımında belirgin azalmalar yaşanmaktadır. 700°C'de basınç dayanımı, 300°C'ye kıyasla %30-40 oranında azalmaktadır.

Deneysel çalışmaların sınırlılıklarına rağmen, güncel literatürde yapay zekâ tabanlı yöntemlerin, betonun mekanik özelliklerinin öngörülmesi gibi mühendislik problemlerinde giderek daha fazla tercih edildiği görülmektedir. Yapay zekâ, zaman alıcı ve maliyetli deneysel süreçlerin yerini alabilecek hızlı, esnek ve doğruluğu yüksek modelleme imkânları sunarak bu alana önemli katkılar sağlamaktadır. Örneğin, Ahmad vd. (2021a), betonun yüksek sıcaklıkta basınç dayanımını tahmin etmek amacıyla AdaBoost, rastgele orman (RF) ve karar ağacı gibi denetimli öğrenme algoritmalarını karşılaştırmalı olarak incelemiştir. 207 deney verisi kullanılarak oluşturulan modeller,  $R^2$ , RSR, MAPE ve RRMSE gibi istatistiksel kriterlerle değerlendirilmiş ve özellikle AdaBoost algoritmasının yüksek doğruluk ve düşük hata oranıyla öne çıktığı belirlenmiştir. Çalışma, aynı zamanda hassasiyet analizi yoluyla çimento içeriği, agrega türleri ve süper akışkanlaştırıcının dayanım tahmininde en etkili girdiler olduğunu göstermektedir. Sonuçlar, AdaBoost modelinin yüksek sıcaklık



koşullarında beton basınç dayanımını tahmin etmede etkili ve güvenilir bir yöntem olduğunu ortaya koymaktadır.

Ahmad vd. (2021b), betonun yüksek sıcaklıkta basınç dayanımını tahmin etmek amacıyla karar ağacı, yapay sinir ağı (ANN), çanta topluluk yöntemi (bagging) ve gradyan artırma (GB) gibi denetimli öğrenme algoritmalarını karşılaştırmalı olarak incelemiştir. 207 veri noktasıyla oluşturulan modellerin doğruluğu istatistiksel göstergeler ( $R^2$ , MAE, MSE, RMSE) ile değerlendirilmiş; özellikle topluluk yöntemlerinden bagging algoritmasının en yüksek performansı gösterdiği bulunmuştur ( $R^2 = 0.90$ ). Ayrıca, duyarlılık analizi sayesinde en etkili girdilerin tespit edilmesi sağlanmış ve k-fold çapraz doğrulama yöntemi ile model güvenilirliği artırılmıştır.

Zeyad vd. (2024), nano katkıları içeren betonun 200-800°C aralığında sıcaklığa maruz kaldıktan sonraki artık basınç dayanımını tahmin etmek amacıyla dört farklı yapay zekâ tabanlı model geliştirmiştir. Yöntemler arasında ANN, bulanık mantık (FLM), genetik algoritma (GA), su döngüsü algoritması (WCA) ve karşılaştırma amacıyla çoklu doğrusal regresyon (MLR) yer almaktadır. 156 deneysel veri üzerinde yapılan modelleme sonucunda en düşük hata oranları WCA modeliyle elde edilmiş ve bu modelle 0.309 MPa (eğitim), 0.191 MPa (doğrulama ve test) düzeyinde ortalama mutlak hata (MAE) yakalanmıştır.

Li vd. (2022), çelik lif takviyeli beton ve harcın yüksek sıcaklıklardaki basınç dayanımını tahmin etmek amacıyla 674 numuneden oluşan kapsamlı bir veri tabanı oluşturmuş ve sekiz farklı makine öğrenimi algoritmasını karşılaştırmıştır. Bu çalışma, doğrudan yüksek sıcaklık altında yapılan testler ile soğutma sonrası yapılan artık dayanım testlerinin sonuçlarının birbirinin yerine kullanılamayacağını vurgulamış; farklı dayanım kaybı eğilimlerinin oluştuğunu göstermiştir. XGBoost algoritması, diğer modellerle (RF, ANN, SVR, AdaBoost, vb.) karşılaştırıldığında en yüksek tahmin başarısını göstermiş ve EN1992-1-2'deki tablo değerlerine göre %21 oranında daha yüksek doğruluk sağlamıştır.

Benzer şekilde, Javed vd. (2024) çalışmasında da çelik lif takviyeli beton (SFRC) yüksek sıcaklıklara maruz bırakılarak basınç dayanımı üzerine yapılan tahminlerde, makine öğrenimi modellerinin etkinliği değerlendirilmiştir. Bu çalışmada, klasik modellerin yanı sıra hibrit modellerin (SVR-FFA, SVR-GWO, SVR-

PSO) kullanılması öne çıkmış; özellikle SVR-FFA modeli,  $R>0.99$  ve düşük hata oranları ile en yüksek tahmin doğruluğuna ulaşmıştır. SHAP analizleri, sıcaklığın basınç dayanımı üzerindeki etkisinin ısıtma hızına göre çok daha yüksek olduğunu göstermiştir. Ayrıca, çelik lif oranının %1.5'e kadar artırılmasının dayanımı olumlu yönde etkilediği, ancak bu oranın üzerinde ek bir iyileşme sağlanamadığı tespit edilmiştir.

Alyousef vd. (2023), SFRC yüksek sıcaklıklardaki basınç dayanımını tahmin etmek amacıyla üç farklı makine öğrenimi yöntemi geliştirmiştir. 307 deneysel veri kullanılarak geliştirilen modeller arasında GEP modeli, 0.998 korelasyon katsayısı ( $R^2$ ) ile en yüksek doğruluğa ulaşarak ANN (0.962) ve ANFIS (0.968) modellerinden daha başarılı bulunmuştur. SHAP analizi, çimento içeriği, sıcaklık ve su çimento oranının basınç dayanımı üzerindeki etkisini vurgulamış; sıcaklık etkisinin ısıtma hızına kıyasla çok daha belirleyici olduğu gösterilmiştir.

Yang vd. (2025), çevresel olarak sürdürülebilir bir yapı malzemesi olan jeopolimer betonun yüksek sıcaklıklarda basınç dayanımını tahmin etmek amacıyla tekli, bütünleşik ve melez makine öğrenmesi modelleri geliştirmiştir. 1000°C'ye kadar olan sıcaklıklarda yapılan tahminlerde, genetik algoritma-rastgele orman (GA-RF) hibrit modeli en yüksek doğrulukla öne çıkmış ( $R^2 = 0.937$ ), onu XGBoost ( $R^2 = 0.933$ ) takip etmiştir.

Almasaeid vd. (2022), yüksek sıcaklık sonrası betonun taşıma kapasitesini tahribatsız test yöntemleriyle tahmin etmek amacıyla bir ANN modeli geliştirmiştir. Ultrasonik darbe hızı ve Schmidt çekici testleri ile elde edilen veriler, literatürden sağlanan verilerle birleştirilerek modelin eğitimi gerçekleştirilmiş; 200-800°C aralığında yapılan tahminlerde modelin yüksek doğrulukla çalıştığı ( $R^2 = 0.944$ ) gösterilmiştir. ANN modeli, yalnızca tahribatsız test verileri kullanılarak betonun basınç dayanımı, maruz kaldığı sıcaklık ve hasar seviyesini başarılı şekilde öngörebilmiştir. Bu yaklaşım, yangın sonrası yapıların değerlendirilmesinde tahribat içermeyen, güvenli ve ekonomik bir alternatif sunmaktadır.

Alaskar vd. (2023) çalışması ise klasik beton karışımlarının yüksek sıcaklık altındaki basınç dayanımını tahmin etmek için evrimsel programlama teknikleri olan Gene Expression Programming (GEP) ve Multi Expression Programming (MEP) yöntemlerini kullanarak önemli katkılar sunmuştur. Dokuz farklı giriş parametresine

(ör. nano silika, çimento, FA, sıcaklık vb.) dayanan bu modelleme çalışmasında, GEP modeli  $R^2 = 0.854$ , RMSE = 5.331 MPa ve MAE = 0.028 MPa gibi tatmin edici performans değerleriyle MEP modelinden üstün bulunmuştur. Ayrıca, GEP modeli basit matematiksel ifadeler üretme kabiliyeti sayesinde uygulamada kullanılabilirlik açısından avantaj sağlamaktadır. Duyarlılık analizine göre, çimento (%26.5), su (%15.5) ve sıcaklık (%14.87) model çıktısını en fazla etkileyen değişkenler olarak belirlenmiştir.

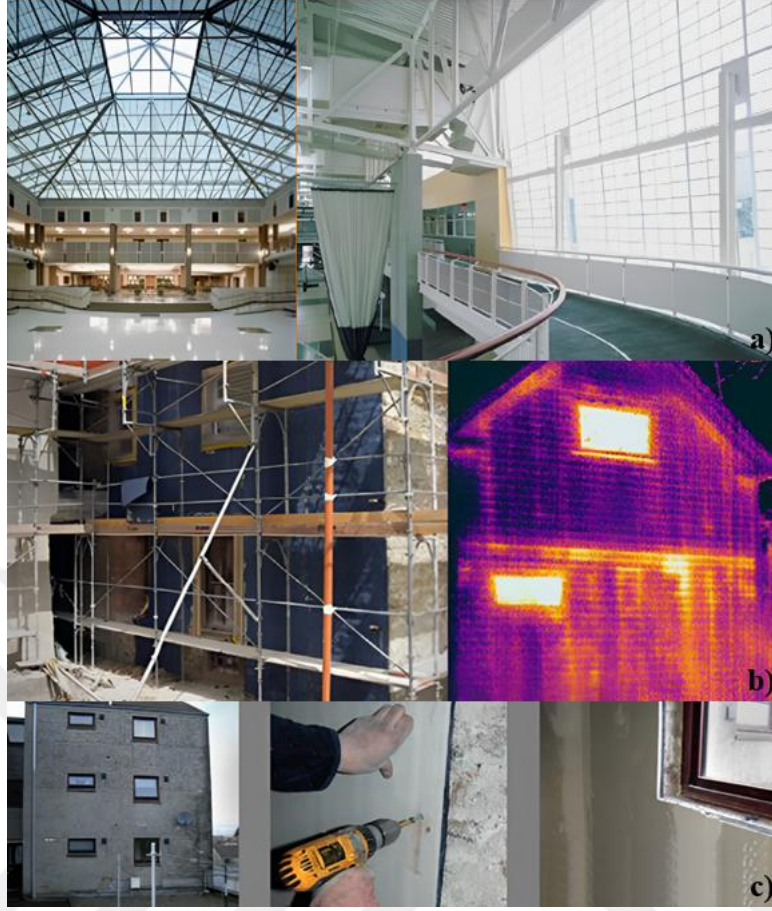
Shafighfard vd. (2022) çalışması, yüksek sıcaklık altında SFRC'nin basınç dayanımını tahmin etmek üzere, 307 deneysel veri kullanarak geniş kapsamlı ve otomatikleştirilmiş bir makine öğrenimi platformu geliştirmiştir. Bu çalışmada Python kütüphaneleri kullanılarak hiper parametre optimizasyonu ve k-fold çapraz doğrulama ile yedi farklı model kombinasyonu test edilmiştir. En yüksek başarı, destek vektör makineleri (SVM), rastgele ormanlar (RF), gradyan artırma (GBM), ekstra ağaç regresyonu (ETR) ve k-en yakın komşu (KNN) algoritmalarının birleşimiyle oluşturulan yığılmış model ile elde edilmiştir. Bu model,  $R^2 = 0.92$  ile oldukça yüksek bir doğruluk sağlamış; ayrıca RMSE = 293.64 ve MAE = 10.54 gibi değerlerle güvenilirliğini ortaya koymuştur.

Xu vd. (2025), yüksek sıcaklık altında betonun basınç dayanımını tahmin etmek ve yangına dayanıklı karışım tasarımlarını optimize etmek için Bayesian model güncelleme ile Cuckoo arama algoritmasını entegre eden yenilikçi bir yöntem geliştirmiştir. Çalışma, betonun mekanik performansı, maliyeti ve karbon ayak izini dengeleyen optimal karışım oranlarını belirlemiş; özellikle agrega/bağlayıcı oranı ve BFS içeriğinin dayanımı ve sürdürülebilirliği olumlu etkilediğini göstermiştir. Önerilen model %40'a varan karbon emisyonu azalması ve %30'a varan maliyet düşüşü sağlarken, beton dayanımını korumaktadır.

### **1.3. VIP ve Aerojel Bazlı Süper Yalıtım Malzemeleri**

Binalarda ısı yalıtımı amacıyla kullanılan gelişmiş malzemeler arasında öne çıkan aerogel, dünyanın en hafif katı yapılı malzemesi olması, yarı saydam özelliği ve olağanüstü düşük ısı iletkenliği ( $\sim 0.008$  W/mK) sayesinde farklı amaçlara yönelik olarak değerlendirilebilmektedir (Cuce vd., 2014b). Aerojeller genel olarak üç ana grupta sınıflandırılır: silika ( $\text{SiO}_2$ ), karbon ve alümina aerogeller. Bu gruplar arasında,

silika esaslı aerojeller sahip oldukları üstün özellikler nedeniyle en yaygın olarak kullanılan türdür. Silika aerojellerin yapısında, birbirine bağlı  $\text{SiO}_2$  zincirleri ile çevrelenmiş çok sayıda hava boşluğu yer almakta ve bu gözenekli yapı sayesinde malzeme olağanüstü bir ısı direnç sunmaktadır. Gözenek çaplarının 10 ila 100 nm aralığında olması, bu malzemelere  $5 \text{ kg/m}^3$ 'nin altında bir yığın yoğunluğu kazandırmaktadır. Ancak, bu kadar düşük yoğunluğa sahip aerojellerin son derece kırılğan olması nedeniyle, bina uygulamalarında genellikle  $100 \text{ kg/m}^3$ 'nin üzerinde yoğunluğa sahip aerogel türleri tercih edilmektedir. Silika aerojeller modern mimaride özellikle çatı, cephe (Cuce ve Cuce, 2016) ve pencere uygulamalarında sıklıkla tercih edilmektedir (Cuce ve Riffat, 2015a). Bu kullanım alanlarında aerogelin sadece ısı özelliklerinden değil, aynı zamanda akustik performansından da yararlanılmaktadır. Özellikle granül formdaki aerojeller, pencere sistemlerinde hem ses yalıtımı hem de ısı yalıtımı sağlamak amacıyla yaygın şekilde kullanılmaktadır (Moretti vd., 2017). Aerogel cam sistemleri, yarı saydam yapısı ve hava geçirmez tasarımı sayesinde, cam yüzeylerdeki ısı kayıplarını azaltan etkili bir iyileştirme çözümü sunmaktadır (Cuce, 2017). Aynı zamanda bu sistemler, gün ışığına olanak tanırken enerji verimliliğinden ödün vermemektedir. Şekil 1'de çatı ve cephe uygulamalarında kullanılan aerogel yalıtım örnekleri gösterilmektedir (Cuce vd., 2014a). Özellikle cephe uygulamalarında kullanılan opak aerogel paneller, ısı köprülerinin önüne geçmekte ve bina kabuğundan olan istenmeyen ısı kayıplarını en aza indirmektedir. 2007 yılında Birleşik Krallık'ta Bob Stoker'a ait evin, aerogel ile yalıtılan ilk yapı olduğu rapor edilmiştir.



**Şekil 1. a)** Bina çatıları ve cepheleri için aerogel cam uygulamaları, **b)** ısı kaybı değerlendirmesi için aerogel yalıtımlı ve yalıtımsız bina cepheleri, **c)** ve 2007'de İngiltere'deki ilk aerogel yalıtımlı bina

Aerogeller dışında, vakum teknolojisi de günümüzde düşük ya da sıfır karbon salınımlı bina standartlarını karşılamak amacıyla önemli bir çözüm olarak öne çıkmaktadır (Cuce ve Riffat, 2015b). Vakum ortamı, atomların tamamen yokluğu nedeniyle bilinen en iyi ısı yalıtım ortamı olarak kabul edilmektedir. Bu prensipten yararlanan VIP'ler, yapı sektöründe vakum teknolojisinin en etkili uygulamaları arasında yer almaktadır. VIP'ler, eski ve yalıtım açısından zayıf binaların yenilenmesinde ideal, güvenilir ve kolay uygulanabilir olmaları nedeniyle termal süper yalıtım malzemeleri (TSYM) arasında öne çıkmaktadır (Biswas vd., 2019). Son yıllarda düşük maliyetli ve yüksek yalıtım değerine sahip VIP'lerin geliştirilmesine yönelik çalışmalar dikkat çekmektedir. Şekil 2'de bu yöndeki bazı yeni nesil VIP ürünleri gösterilmektedir. Bu panellerin oda sıcaklığı koşullarındaki k-değeri yaklaşık 0.0041 W/mK olup, bu değer mevcut TSYM'ler arasında en düşük olanlardan biridir

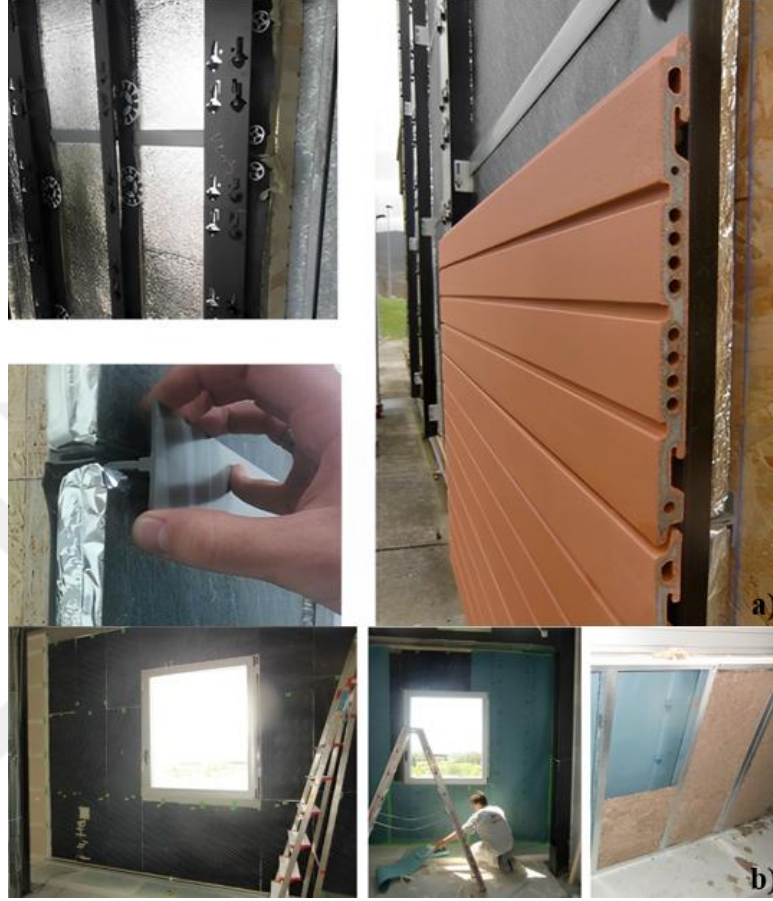
(Biswas vd., 2019). VIP'ler sadece dıştan değil, içten uygulama olanağı da sunması sayesinde, özellikle tarihi yapıların restorasyonunda son derece dikkat çekici bir seçenek haline gelmiştir (Johansson vd., 2014a).



**Şekil 2. a)** Dış duvarların enerji açısından verimli bir şekilde yeniden donatılması için düşük maliyetli VIP'ler (Biswas vd., 2019) ve **b)** EPS köpüklerle VIP'lerin hibrit dış duvar izolasyonu (Johansson vd., 2014a)

Bazı durumlarda, VIP'ler geleneksel ısı yalıtım malzemeleri ile birlikte kullanılarak hem kaplanan yüzey alanı artırılmakta hem de potansiyel ısı köprülerinin oluşumu engellenmektedir. Örneğin, genellikle genişleşmiş polistiren (EPS) köpüklerle birlikte uygulanmaları bu amaca hizmet etmektedir (Johansson vd., 2014b). VIP'ler sayesinde, neredeyse sıfır enerji tüketen binalar hedefi doğrultusunda önemli kazanımlar elde edilmesi mümkündür. Bu bağlamda, VIP'ler cephe kaplama elemanlarıyla entegre şekilde kullanılarak ince duvar detayları aracılığıyla ısı kayıp ve kazançlarında önemli azalmalar sağlanabilir (Uriarte vd., 2019). Şekil 3'te geleneksel iç yalıtım uygulamalarının yanı sıra VIP entegreli havalandırılmalı cephe uygulamaları gösterilmektedir. Bu tür uygulamalar hem enerji performansını artırmakta hem de yapı kabuğunun daha kompakt kalmasını mümkün kılmaktadır. VIP destekli havalandırılmalı cephe sistemlerinin ve içten VIP uygulamalı duvarların sırasıyla  $0.28 \text{ W/m}^2\text{K}$  ve  $0.14$

$W/m^2K$  U-değeri sağladığı bildirilmektedir. Bu değerler, bu sistemlerin güncel yalıtım standartlarını karşılama kapasitesini açıkça ortaya koymaktadır.



**Şekil 3. a) VIP tabanlı dış duvar izolasyonlu havalandırılmalı cephe tasarımı ve b) VIP'lerin standart saplamalı iç duvar izolasyonu (Uriarte vd., 2019)**

### **1.3.1. Aerojel ve VIP Tabanlı Harici TSYM'nin Artıları ve Eksileri**

Dış duvar yalıtımı, yapının enerji verimliliğini artırmada oldukça etkili bir yöntemdir. Özellikle VIP teknolojisinin havalandırılmalı dış cephe uygulamalarında kullanılması durumunda, duvarın U-değeri yaklaşık olarak  $0.28 W/m^2K$  seviyesine kadar düşebilmektedir. Bu düşük U-değeri sayesinde dış ortamdan kaynaklanan hava akımları yapı kabuğundan geçemez hâle gelir ve böylelikle iç mekânlarda homojen bir ısı dağılımı sağlanır. Bu durum, istenmeyen hava hareketlerinin ortadan kalkmasına ve termodinamik konfor koşullarının tesis edilmesine olanak tanır. Isıtma sistemi kapatıldıktan sonra bile iç mekân ısının uzun süre sabit kalabilmesi, dış duvar yalıtımının sunduğu bir başka önemli avantajdır. Bu, ısıl süper yalıtımın sunduğu



direnç sayesinde, iç ortama geri dönen ısı akışı ile gerçekleşmektedir. Dolayısıyla sistem kapalıyken bile bina, belirli bir süre kendi içinde ısıyı muhafaza edebilir. Yapılan araştırmalar, yapı dış duvarlarının tamamının yalıtılması durumunda enerji tüketiminde yaklaşık %35 oranında bir tasarruf sağlanabileceğini göstermektedir. Dış duvar yalıtım uygulamalarında yalıtım katmanı, yapının dış kabuğu üzerine monte edilir. Bu yöntem yalnızca termal performansı artırmakla kalmaz; aynı zamanda dış etkenlere karşı fiziksel bir koruma sağlayarak yapı ömrünü de uzatır. Dış yalıtım uygulamaları, binanın dış yüzeyini destekleyici bir tabaka olarak işlev görürken, yapının daha estetik bir görünüme kavuşmasını da mümkün kılar. Örneğin; hasarlı sıvaların, çatlakların ya da dış yüzeydeki deformasyonların kapatılması bu yöntemle kolaylıkla sağlanabilir. Ayrıca, dıştan yapılan yalıtım uygulamaları binaya dış ortamdan nem girişini engelleyerek iç mekânlarda nem kaynaklı hasarların önüne geçer. Bunun yanı sıra, dış ortamdan gelen gürültülerin azaltılmasına da katkı sağlar; bu da akustik konfor açısından önemli bir avantaj olarak değerlendirilmektedir. Tüm uygulamaların binanın dış cephesinde gerçekleştirilmesi, iç mekân kullanıcılarının yaşam düzeninin etkilenmeden sürmesini sağlar. Bu yönüyle dış cephe yalıtımı, özellikle aktif kullanılan yapılarda tercih edilen bir yöntem hâline gelmiştir.

Ancak tüm bu avantajlarına rağmen, dış cephe yalıtımının bazı dezavantajları da bulunmaktadır. Öncelikle, uygulanacak malzeme kalitesinin yanı sıra bağlantı sistemleri, yapıştırıcılar ya da mekanik sabitlemeler gibi detaylar da yüksek düzeyde işçilik gerektirdiğinden, uygulamayı gerçekleştirecek firmanın uzmanlığı büyük önem taşımaktadır. Aksi takdirde, zaman içinde yalıtım katmanının yapıdan ayrılması gibi sorunlar ortaya çıkabilir ve bu durum çok daha yüksek maliyetlere neden olabilir. Yaygın karşılaşılan bir diğer teknik zorluk ise, çatıların duvarların dışına taşan alt kısımlarının genellikle 100 mm'den daha fazla olmasıdır. Bu gibi durumlarda, yalıtımın arka kısmına nem sızmasını önlemek amacıyla üstten sızdırmazlık sağlanmalı ya da çatı çıkıntısı yalıtımı kapsayacak şekilde genişletilmelidir. Bazı özel mülkiyetlerde ise sadece bina sahibinin kararı dış cephe yalıtımı için yeterli olmamakta; yerel idarelerden gerekli izinlerin alınması gerekebilmektedir. Yalıtım uygulayıcısının rutubetli zeminlere yakın alanlarda doğrudan uygulamaya başlamaması önemlidir; böyle bir durumda, uygulama başlangıcının yeniden planlanması gerekebilir. Ancak bu yeniden planlama, söz konusu bölgede bir soğuk



köprü oluşmasına neden olabilir. Ayrıca, özellikle çok katlı yapılarda dış cephe yalıtımı uygulanırken, iskele kurulması zorunlu olabilir ve bu da ekstra maliyet anlamına gelir. Gerekli iş sağlığı ve güvenliği önlemleri de alınmak zorundadır, bu da süreci hem maliyet hem de zaman açısından daha karmaşık hâle getirebilir (Cuce vd., 2024b). Tablo 2’de, aerogel ve VIP tabanlı dış cephe TSYM kullanılarak gerçekleştirilen uygulamaların teknik ve uygulama temelli avantajları ile potansiyel dezavantajları sistematik olarak özetlenmiştir. Özellikle düşük U-değeri sayesinde sağlanan yüksek ısı direnç, iç mekân termal konforunu artırmakta ve enerji tüketimini önemli ölçüde azaltmaktadır. Bununla birlikte, uygulama sürecinde karşılaşılabilecek detay çözümleme zorlukları, işçilik kalitesi gereksinimi ve maliyet gibi faktörler de bu sistemlerin etkinliğini doğrudan etkileyebilmektedir. Tabloda aktarılan bu çok boyutlu değerlendirme, VIP ve aerogel gibi ileri seviye yalıtım malzemelerinin performans ve uygulanabilirlik dengesine ışık tutmaktadır.

**Tablo 2.** Aerogel ve VIP tabanlı dış cephe ısı yalıtım sistemlerinin (TSYM) teknik ve uygulamaya dayalı avantajları ile potansiyel dezavantajlarının karşılaştırmalı değerlendirmesi

| Kategori           | Avantajlar                                                                                                                                            | Dezavantajlar                                                                                                                                                      |
|--------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Termal performans  | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Düşük U-değeri</li> <li>- Isı köprülerinin azaltılması</li> <li>- Uzun süreli ısı muhafazası</li> </ul>      | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Soğuk köprü oluşum riski (uygulama kesintilerinde)</li> <li>- Çatı çıkıntıları altında detay çözüm gerekliliği</li> </ul> |
| İç konfor          | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Homojen iç ortam sıcaklığı</li> <li>- Hava akımlarının önlenmesi</li> <li>- Akustik konfor artışı</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Neme karşı arka kısımlarda yetersiz detaylandırma varsa yoğuşma riski</li> </ul>                                          |
| Enerji verimliliği | <ul style="list-style-type: none"> <li>- %35’e varan enerji tasarrufu</li> </ul>                                                                      | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Uygulama hataları durumunda beklenen verimin sağlanamaması</li> </ul>                                                     |
| Mekânsal etki      | <ul style="list-style-type: none"> <li>- İç mekân hacmine müdahale gerektirmez</li> </ul>                                                             | <ul style="list-style-type: none"> <li>- İskele ihtiyacı (özellikle çok katlı binalarda)</li> </ul>                                                                |

**Tablo 2 (Devam).** Aerogel ve VIP tabanlı dış cephe ısı yalıtım sistemlerinin (TSYM) teknik ve uygulamaya dayalı avantajları ile potansiyel dezavantajlarının karşılaştırmalı değerlendirmesi

| Kategori                | Avantajlar                                                                                                                         | Dezavantajlar                                                                                                                                                |
|-------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Yapısal koruma          | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Dış kabuğun fiziksel korunması</li> <li>- Dış yüzey hasarlarının giderilmesi</li> </ul>   | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Yüksek kaliteli malzeme ve işçilik gerektirir; aksi hâlde katman ayrılması riski</li> </ul>                         |
| Estetik ve görsellik    | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Dış cephe estetiğinin iyileştirilmesi</li> <li>- Hasarlı sıvaların kapatılması</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Yerel idarelerden izin gereksinimi (tarihi/özel mülklerde)</li> </ul>                                               |
| Nem ve gürültü kontrolü | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Dış ortam nemi ve gürültüsünün engellenmesi</li> </ul>                                    | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Rutubetli zeminlere yakın bölgelerde başlangıç noktası dikkatle seçilmeli, aksi takdirde riskli olabilir</li> </ul> |
| İşletme süreci          | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Yaşam alanı kullanımında kesintiye neden olmaz</li> </ul>                                 | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Yüksek uygulama maliyeti</li> <li>- Zaman ve iş gücü gereksinimi</li> <li>- İş güvenliği önlemleri</li> </ul>       |

### 1.3.2. Aerogel ve VIP Tabanlı Dahili TSYM'nin Artıları ve Eksileri

Binalarda dış duvarların yalıtılması ne kadar önemliyse, bazı özel durumlarda iç duvarların yalıtılması da enerji tasarrufu açısından hayati öneme sahiptir. İçten yalıtım uygulamaları, bazı avantajları sayesinde tercih edilen bir yöntem olsa da beraberinde bazı dezavantajları da getirmektedir. İçten yalıtımın başlıca avantajlarından biri, estetik kaygı taşıyan kullanıcılar açısından iç mekân görünümünün kolaylıkla iyileştirilebilmesidir. Özellikle iç cephe kaplamalarının yenilenmesi, hasarlı yüzeylerin giderilmesi ya da duvar dekorasyonunun iyileştirilmesi gibi estetik amaçlar doğrultusunda içten yalıtım önemli bir fırsat sunmaktadır. Bunun yanı sıra, dış cepheye müdahale edilemeyen durumlarda, örneğin, tarihi binalar veya ortak kullanım alanlarında dış cephede değişiklik yapılamayan yapılarda, iç duvar yalıtımı alternatif bir çözüm olarak öne çıkmaktadır. Ayrıca, içten yalıtımın uygulama süreci genellikle daha kolaydır ve dış cephedeki gibi iskele kurulumuna gerek

duyulmamaktadır. Bu da hem iş güvenliği risklerini azaltmakta hem de uygulama süresini kısaltmaktadır. Özellikle sürekli olarak kullanılmayan sinema salonları, tiyatrolar veya konferans salonları gibi mekânlarda, geçici ve hızlı ısıtmanın gerekli olduğu durumlarda içten yalıtım uygulamaları daha pratik bir çözüm sunmaktadır. Ancak içten yalıtım uygulamalarının birtakım dezavantajları da söz konusudur. En önemli sorunlardan biri, iç hacim kaybıdır. Kullanıcılar için değerli olan iç mekân alanlarının daralması, bu yöntemin en çok eleştirilen yönlerinden biridir. Örneğin, 5 m x 5 m ölçülerinde bir odada tüm duvarlara 100 mm kalınlığında yalıtım uygulanması durumunda, kaybedilen hacim göz ardı edilemeyecek düzeyde olacaktır. Bu durum yalnızca alan kaybı değil, aynı zamanda nitelikli yalıtım malzemeleri kullanıldığında artan maliyetler anlamına da gelmektedir. Dış cephe yalıtımında genellikle sınırsız bir uygulama özgürlüğü varken, iç ortamlarda bu durum sınırlı kalabilmektedir. Mobilya yerleşimi, iç dekorasyon unsurları, kullanıcı davranışları ve nem koşulları gibi birçok değişken, içten yalıtımın uygulanabilirliğini doğrudan etkiler. Ayrıca içten uygulanan yalıtım, katlar arasında termal köprü oluşumuna yol açabilir. Zemin döşemeleri kaldırılmadan yapılan uygulamalarda, yalıtımın sürekliliği sağlanamadığı için ısı köprüleri oluşur ve bu da ısı kaybının tamamen önlenememesine neden olur. İç yalıtım uygulamasına başlamadan önce, duvar yüzeylerinde nem problemi olup olmadığının mutlaka kontrol edilmesi gerekmektedir. Aksi takdirde, yalıtım malzemesiyle kapatılan nemli yüzeyler zamanla daha büyük hasarlara yol açabilir ve bu da daha yüksek onarım maliyetlerine neden olur. Uygulayıcılar için bir diğer zorluk ise, yalıtım sırasında sıva tabakasının üzerine mutlaka su geçirmez bir tabakanın uygulanması gerekliliğidir. Bu durum, uygulama sürecini karmaşıktırmakta ve işçilik açısından daha dikkatli bir planlama gerektirmektedir (Cuce vd., 2024b). Tablo 3'te, aerjel ve VIP tabanlı içten ısı yalıtım sistemlerine ilişkin avantajlar ve dezavantajlar çok boyutlu olarak sınıflandırılmıştır. Özellikle dış cepheye müdahalenin mümkün olmadığı yapılar için önemli bir alternatif oluşturan içten yalıtım uygulamaları, estetik açıdan mekân iyileştirmesi ve uygulama kolaylığı gibi avantajlar sunarken; hacim kaybı, nem riski ve ısı köprülerine yol açma potansiyeli gibi sınırlayıcı unsurları da beraberinde getirmektedir. Tablo hem kullanıcı deneyimi hem de teknik performans açısından içten yalıtım uygulamalarının değerlendirilmesine olanak sağlamaktadır.

**Tablo 3.** Aerogel ve VIP tabanlı içten ısı yalıtım sistemlerinin (dahili TSYM) sunduğu avantajlar ile beraberinde getirdiği uygulama sınırlamaları ve teknik zorlukların bütüncül değerlendirmesi

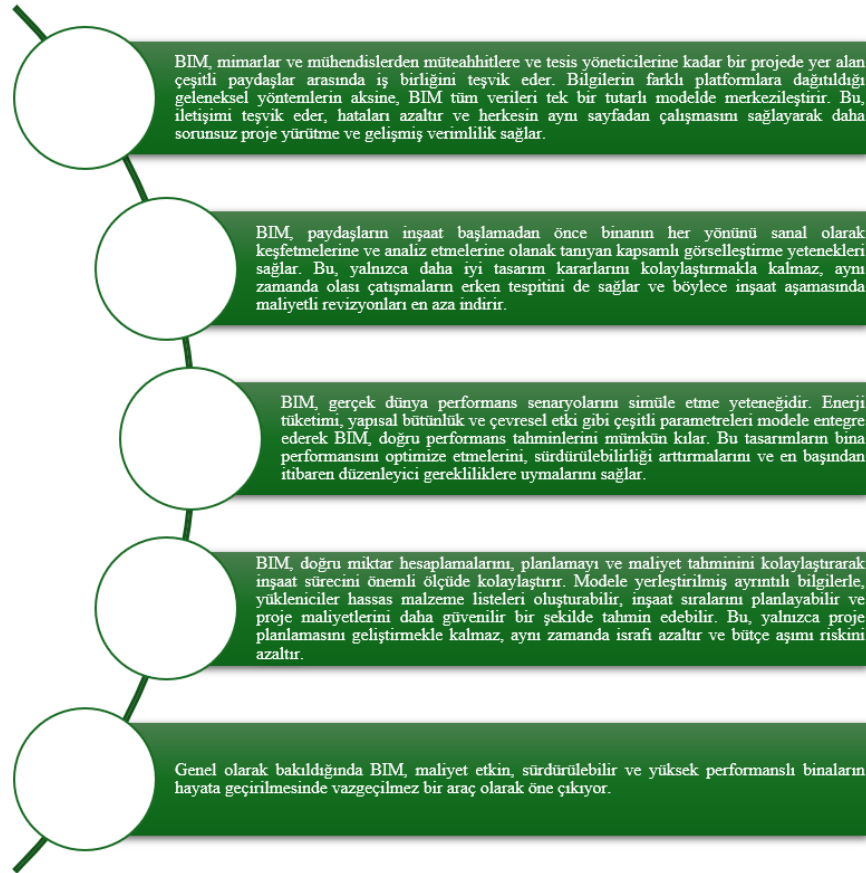
| Kategori                          | Avantajlar                                                                                                                                                                   | Dezavantajlar                                                                                                                                                                       |
|-----------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Estetik ve İç Mekân İyileştirmesi | <ul style="list-style-type: none"> <li>- İç cephe görünümünün yenilenmesi</li> <li>- Hasarlı yüzeylerin giderilmesi</li> <li>- Estetik dekorasyonun desteklenmesi</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>- İç hacim kaybına neden olur</li> <li>- Mobilya yerleşimi ve dekorasyonla uyum zor olabilir</li> </ul>                                      |
| Uygulanabilirlik                  | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Tarihi veya dış müdahalesi kısıtlı binalarda çözüm sağlar</li> <li>- Dış cepheye erişim gerektirmez</li> </ul>                      | <ul style="list-style-type: none"> <li>- İç ortam sınırlamaları uygulama özgürlüğünü kısıtlar</li> <li>- Katlar arası süreksizlik ısı köprülerine yol açabilir</li> </ul>           |
| İş Güvenliği ve Süreç             | <ul style="list-style-type: none"> <li>- İskele kurulumu gerektirmez</li> <li>- Daha düşük güvenlik riski</li> <li>- Uygulama süresi görece daha kısa</li> </ul>             | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Su geçirmez bariyer gereksinimi uygulamayı karmaşıktırır</li> <li>- Sıva altı detaylar işçilik kalitesiyle doğrudan ilişkilidir</li> </ul> |
| Enerji Performansı                | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Geçici kullanıma sahip alanlarda hızlı ısıtma sağlar</li> <li>- Lokal konfor artışı sağlar</li> </ul>                               | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Termal köprüler oluşabilir</li> <li>- Kesintili uygulamalarda yalıtım sürekliliği bozulabilir</li> </ul>                                   |
| Maliyet ve Malzeme                | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Dış müdahale gerektirmemesi nedeniyle bazı durumlarda maliyet avantajı sağlar</li> </ul>                                            | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Hacim daralmasına rağmen nitelikli malzeme kullanımı nedeniyle maliyet artabilir</li> <li>- Nemli yüzeylerde risklidir</li> </ul>          |
| Nem ve Zemin Durumu               | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Nem problemi olmayan alanlarda pratik çözümdür</li> </ul>                                                                           | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Yalıtım arkasında nem birikimi yapısal hasara neden olabilir</li> </ul>                                                                    |

#### 1.4. BIM ve Enerji Verimliliği

Yapılı çevre, insan yaşamının sürdürüldüğü alanlar olan yaşam alanları, çalışma mekânları ve sosyal etkileşim ortamlarını kapsayan fiziksel bir varlık olmanın ötesinde, aynı zamanda kültürel ve mekânsal bir olgudur (Ingrao vd., 2018). Bu çevre; binalar, açık alanlar ve altyapı sistemlerini bir bütün olarak içerir ve insan konforunu sağlamada, sosyal yaşamı düzenlemede ve SKH'lerini gerçekleştirmede hayati bir rol üstlenir (Lucchi vd., 2023). Ancak son yıllarda nüfus artışı ve kentleşmenin hız kazanması ile birlikte yapı sayısındaki ciddi artış, enerji üretimi ve malzeme tüketimini kaçınılmaz olarak artırmakta, bu da hem çevre hem de insan sağlığı üzerinde olumsuz etkilere yol açmaktadır (Scrucca vd., 2023). Bu doğrultuda Birleşmiş Milletler SKH'leri, yapı sektöründe özellikle enerji verimliliğine öncelik verilmesi gerektiğini vurgulamaktadır (Bungau vd., 2022). Yapı performansının belirli bir seviyeye çekilmesi ve uygun yapı malzemelerinin kullanılması, sürdürülebilir bina tasarımının temelini oluşturmakta ve çevresel bozulmanın azaltılmasına katkı sağlamaktadır (Anaç vd., 2024). Ancak mevcut binaların büyük çoğunluğu hâlâ düşük ısıl dirençli malzemelerle inşa edilmiş olduğundan ciddi enerji kayıplarına neden olmakta ve bu da hem ısıl konforun sağlanmasını zorlaştırmakta hem de enerji tüketimini artırmaktadır (Cuce vd., 2023).

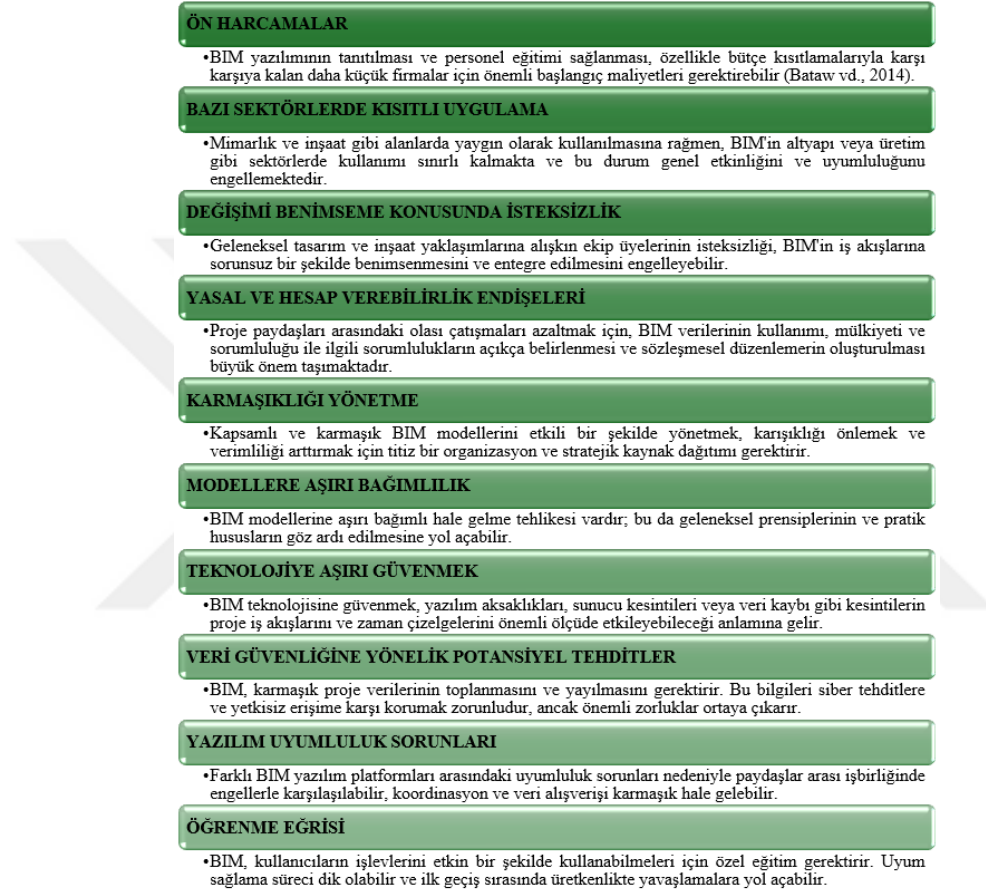
Yapılarda enerji verimliliğinin artırılması bağlamında bina kabuğunun performansı belirleyici bir unsur olarak öne çıkmaktadır. Özellikle ısı kayıplarının azaltılması, yaz aylarında aşırı ısı kazancının önlenmesi ve böylece mekanik ısıtma/soğutma sistemlerine olan ihtiyacın düşürülmesi açısından bina kabuğu büyük önem taşımaktadır (Sarihi vd., 2021). Yeni yapılar için bu kabuğun yüksek performanslı malzemelerle oluşturulması mümkündür, ancak mevcut yapı stokunun dönüştürülmesi sürecinde tam yeniden inşa yüksek maliyetli ve çoğu zaman pratik olmayan bir çözümdür (El-Darwish ve Gomaa, 2017). Bu noktada "güçlendirme" yani mevcut yapıların enerji verimliliğini artırmaya yönelik yenileme müdahaleleri, ekonomik ve uygulanabilir bir çözüm olarak ön plana çıkmaktadır. Bu tür müdahaleler; bina sistemlerinin güncellenmesi, yalıtımın artırılması, yenilenebilir enerji sistemlerinin entegrasyonu gibi farklı stratejileri içerebilir ve her yapının özgün koşullarına göre uyarlanabilir. Yapıların enerji performansını artırmak için iki temel yol mevcuttur: mevcut yapının güçlendirilmesi veya tamamen yıkılarak enerji verimli

biçimde yeniden inşa edilmesi (Jayalath vd., 2024). Ancak günümüzde teknolojik ilerlemeler sayesinde bu seçeneklerin her biri bilgisayar ortamında modellenebilir hâle gelmiştir. Malzeme değişiklikleri, enerji kazanımları, maliyet analizleri, yaşam döngüsü performansı gibi pek çok parametre, herhangi bir fiziksel inşaat sürecine geçmeden önce dijital ortamda değerlendirilebilmektedir (Alvur vd., 2024). Bu bağlamda BIM, mimarlar, mühendisler, yükleniciler ve diğer paydaşlar için proje tasarımı, planlama, maliyet tahmini ve enerji verimliliği analizlerini tek bir platformda birleştiren devrim niteliğinde bir dijital araç olarak öne çıkmaktadır (Olanrewaju vd., 2022; Costin vd., 2018). BIM sayesinde projenin her aşamasında senaryo temelli simülasyonlar yapılabilmekte, oluşabilecek problemler önceden tespit edilerek hızlı müdahale imkânı sağlanmaktadır. Bu yaklaşım hem malzeme israfını hem de zaman ve iş gücü kaybını önemli ölçüde azaltmaktadır. Şekil 4, BIM'in bu çok yönlü avantajlarını görsel olarak özetlemektedir.



Şekil 4. BIM kullanımının avantajları

Öte yandan, BIM uygulamalarının yaygınlaştırılmasının önünde bazı kısıtlamalar da bulunmaktadır. Bunlar arasında yüksek başlangıç maliyetleri, yazılım uyumsuzlukları, kullanıcı alışkanlıklarına bağlı direnç, veri güvenliği problemleri ve karmaşık proje yönetimi yer almaktadır (Bataw vd., 2014). Şekil 5’te bu olumsuzluklar başlıklar altında sistematik şekilde açıklanmakta ve çözüm yolları önerilmektedir.



**Şekil 5. BIM kullanımının dezavantajları**

BIM yazılımları aracılığıyla yapı performansı; bina kabuğu bileşenleri (Najjar vd., 2019), ısıtma-soğutma sistemleri (Anbouhi vd., 2016), aydınlatma sistemleri ve yenilenebilir enerji uygulamaları gibi çok sayıda değişken üzerinden değerlendirilebilir. Bu bağlamda Tablo 4’te farklı BIM yazılımlarının hangi performans parametrelerini değerlendirebildiği sistemli biçimde gösterilmiştir.

**Tablo 4.** Yazılıma göre kullanım alanı

| Yazılım                           | Enerji | Karbon<br>emisyonları | Doğal<br>havalandırma | Güneş ve<br>gün ışığı | Akustik |
|-----------------------------------|--------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|---------|
| e-QUEST                           | +      |                       | +                     | +                     |         |
| Energy plus                       | +      | +                     |                       | +                     |         |
| Odeon room<br>acoustic software   |        |                       |                       |                       | +       |
| Design builder                    | +      | +                     | +                     | +                     |         |
| Autodesk green<br>building studio | +      | +                     | +                     | +                     |         |

Örneğin EnergyPlus ve DesignBuilder yazılımları enerji ve karbon salımı analizinde öne çıkarken, Autodesk Green Building Studio hem doğal aydınlatma hem de enerji verimliliği senaryolarında kullanılmaktadır. Odeon yazılımı ise yalnızca akustik simülasyonlara odaklanmaktadır. BIM uygulamalarının sahadaki etkisi, uluslararası çalışmalarla da net bir şekilde ortaya konmuştur. Yunanistan’da üniversite binaları üzerine yapılan bir çalışmada Revit ve Green Building Studio gibi yazılımlar kullanılarak bina kabuğu ve pencere tasarımında yapılan değişikliklerin enerji performansını doğrudan etkilediği gösterilmiştir (Mytafides vd., 2017). Tayland’da yapılan bir başka üniversite çalışmasında, e-QUEST aracılığıyla bina yeniden tasarımı gerçekleştirilmiş ve bina kabuğu değiştirilerek önemli enerji tasarrufu elde edilmiştir (Guo ve Wei, 2016). Çin’de kamu binalarında yapılan analizlerde, iklimlendirme ve aydınlatma sistemlerinin toplam enerji tüketiminde önemli paya sahip olduğu BIM aracılığıyla doğrulanmıştır (Ma vd., 2017). Suudi Arabistan’da karmaşık cami yapılarının enerji analizleri BIM ile başarıyla gerçekleştirilmiş ve önceden öngörülen verilerle zaman ve maliyet yüklerinin önüne geçilmiştir (Al-Shaalan vd., 2017). Benzer şekilde, Mısır’da yapılan bir eğitim binası çalışmasında Autodesk Revit kullanılarak %22’lik bir performans artışı sağlanmış ve bu yapıların kendi kendine yeten enerji verimli sistemlere dönüşebileceği gösterilmiştir (Allothman vd., 2021). Çin’de prefabrik beton projelerinde karbon salımı analizleri BIM aracılığıyla gerçekleştirilmiş ve karbon salımının azaltıldığı doğrulanmıştır (Li vd., 2021; Hao vd., 2020). İran’da ise NSGA-II algoritması ile birlikte EnergyPlus kullanılarak maliyet ve



emisyona optimizasyonu yapılmıştır (Heydari ve Heravi, 2023). Türkiye’de Autodesk Revit ile yürütölen bir konut projesinde yıllık karbon salımı 6.2 Mg’dan 3.3 Mg’a düşürölmüştür (Armutlu ve Gülden, 2019). Ayrıca, Hong Kong’daki yüksek katlı konut projelerinde yapılan HAD destekli BIM analizlerinde rüzgârla çalışan doğal havalandırma sistemlerinin elektrik tüketimini %25’e kadar azaltabileceği gösterilmiştir (Weerasuriya vd., 2019). Çin’deki projelerde ise su tesisatı ve HVAC sistemlerinin pasif enerji çözümleriyle entegre çalışarak enerji verimliliğini ve iç mekân konforunu artırdığı kanıtlanmıştır (Liu ve Wang, 2022). Sonuç olarak, BIM teknolojisi, yapıların enerji performansını artırma, çevresel etkileri azaltma ve ekonomik kaynakların verimli kullanımı konularında çok yönlü avantajlar sunmaktadır. Bu teknoloji sayesinde, yapı ömrü boyunca alınacak tasarım ve uygulama kararları daha bilinçli hale gelmekte, riskler minimize edilmekte ve SKH’lerine katkı sağlanmaktadır. Enerji verimli bir gelecek için BIM destekli uygulamaların yaygınlaştırılması ve güçlendirme gibi yenileme stratejilerinin etkin biçimde hayata geçirilmesi kaçınılmazdır. Bu bağlamda BIM, yalnızca teknik bir yazılım değil; aynı zamanda sürdürülebilir bir yapı geleceğinin anahtarıdır.

### **1.5. Araştırmanın Amacı ve Kapsamı**

Bu çalışmanın amacı, yapı sektöründe sürdürülebilirlik hedefleri doğrultusunda geliştirilen yüksek ısı dirençli, düşük karbon salımlı ve yangına dayanıklı dış cephe teknolojilerini bütöncöl bir yaklaşımla değerlendirmektir. Küresel ısınma, artan enerji talebi ve yapı sektörünün karbon ayak izi göz önünde bulundurulduğunda, enerji verimliliği sağlayan ve çevresel etkileri minimize eden cephe sistemlerinin geliştirilmesi bilimsel ve pratik açıdan önemli bir gereklilik haline gelmiştir. Bu bağlamda araştırma, hem yeni nesil cephe malzemelerinin termal, mekanik ve çevresel performansını incelemek hem de bu malzemelerin sürdürülebilir yapılaşmaya entegrasyon potansiyelini değerlendirmek amacıyla tasarlanmıştır. Araştırma kapsamı, yüksek performanslı süper yalıtım malzemelerinden YYS’lerine, doğal katkılı yapı elemanlarından dijital modelleme araçlarına kadar geniş bir yelpazeyi kapsamaktadır. Çalışmada; malzeme temelli ısı performans iyileştirme çözümleri, yangın güvenliğini artıran kaplama sistemleri ve yapı kabuğunun çevresel dayanıklılığı ele alınmıştır. Bu tez çalışması, sürdürülebilir yapılaşma hedefleri

doğrultusunda, yapı teknolojileri ile enerji sistemleri mühendisliğinin kesişiminde konumlanarak; yüksek ısı dirençli, düşük karbon salınımlı ve yangına dayanıklı cephe çözümlerinin geliştirilmesine katkı sunmayı amaçlamaktadır. Yapı fiziği, malzeme bilimi ve dijital modelleme tekniklerini disiplinlerarası bir yaklaşımla bütünleştiren bu araştırma, yalnızca yeni nesil yapı malzemelerinin performans analizine odaklanmakla kalmamakta; aynı zamanda bu malzemelerin çevresel sürdürülebilirlik ve enerji verimliliği açısından değerlendirilmesini de kapsamaktadır. Geliştirilen özgün cephe teknolojilerinin, hem akademik literatürdeki boşlukları dolduracak yenilikçi katkılar sunması hem de sektör için ölçeklenebilir, çevre dostu ve fonksiyonel uygulamalar ortaya koyması hedeflenmektedir. Bu bağlamda, çalışma sonuçlarının yalnızca bina ölçeğinde değil; aynı zamanda iklim değişikliğiyle mücadele, afet direnci ve sürdürülebilir şehircilik politikalarının geliştirilmesi gibi geniş kapsamlı alanlara da doğrudan katkı sağlayabilecek nitelikte olması amaçlanmaktadır.

## 2. MALZEME VE YÖNTEM

### 2.1. Yenilikçi Yalıtım Sıvasının Termofiziksel Özellikleri ve Numune Hazırlığı

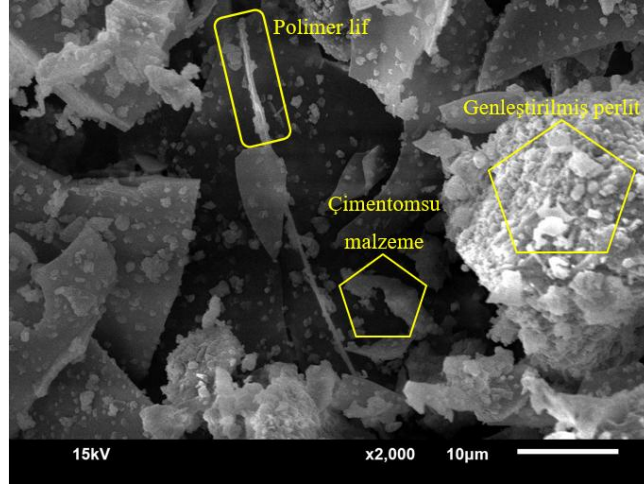
#### 2.1.1. Yenilikçi Yalıtım Sıvasının Malzeme Özellikleri

Bu çalışmada kullanılan YYS, TSE EN 13501-1 standardına uygun olarak üretilmiştir ve A1 sınıfı yangın dayanımı sertifikasına sahiptir. Isı, su ve ses yalıtımının yanı sıra yangın güvenliği açısından da uluslararası standartlara uygun biçimde hazırlanmıştır. Yaklaşık 1000°C sıcaklığa kadar 3 saat boyunca dayanım gösterebilmektedir. Kanserojen madde içermeyen tamamen doğal yapısıyla dikkat çeken bu sıva aynı zamanda nefes alabilen bir özelliktedir. Yapısı itibarıyla binalarda meydana gelebilecek nem, küf ve mantar gibi oluşumları engelleyici özelliktedir. Bu araştırmada, Türkiye’de ilk defa bor madeni kullanımına yönelik patenti alınmış YYS kullanılmıştır. Kullanılan sıvanın teknik özellikleri Tablo 5’te sunulmuştur.

**Tablo 5.** YYS’nin teknik özellikleri

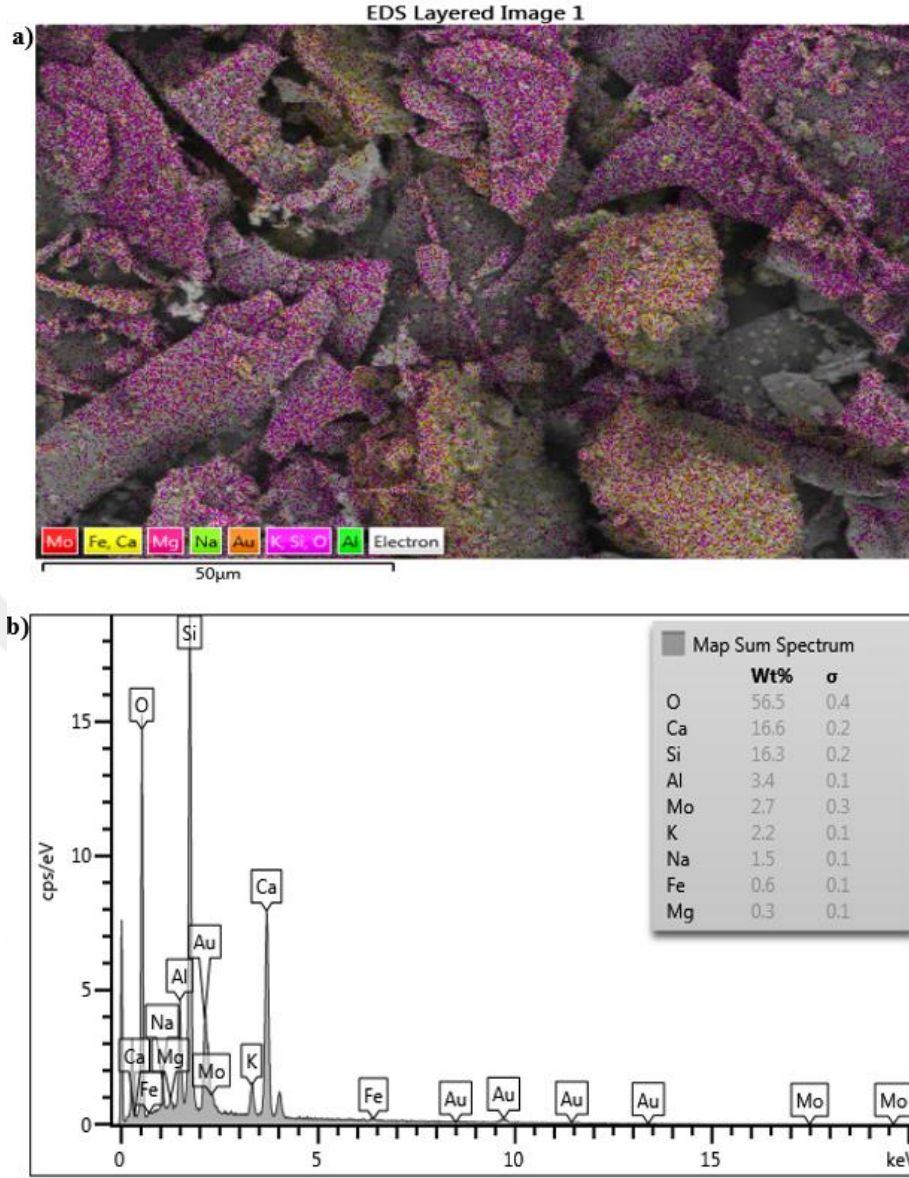
| Özellik          | Değer                                     |
|------------------|-------------------------------------------|
| $\rho$           | $950 \pm 50 \text{ kg/m}^3$               |
| k-değeri         | $0.13 \text{ W/mK}$                       |
| Basınç dayanımı  | $CSII 2.448 \text{ N/mm}^2$               |
| Yapışma dayanımı | $0.50 \text{ N/mm}^2$                     |
| Su emilimi       | $W2 0.188 \text{ kg/m}^2 \cdot \sqrt{dk}$ |
| Yangın dayanımı  | <i>A1 sınıfı</i>                          |
| Ses yutuculuğu   | $15 \text{ dB}$                           |

Şekil 6’da, YYS’nin hidratasyon öncesi bileşenlerinden oluşan yapısı görülmektedir. Bu yapı, genleştirilmiş perlit, düşük oranda bor minerali, polimer lifler ve bağlayıcıdan oluşmaktadır. Mikroskopik görüntülerde, levha formunda genişlemiş perlit tabakaları ve bu tabakalar üzerinde tomurcuklanma şeklinde genişleyen ürünler gözlemlenmektedir. Yapı içerisinde çok sayıda boşluk (gözenek) ve amorf formlar yer almakta olup, boşluklarda polimer lifler bulunmaktadır.



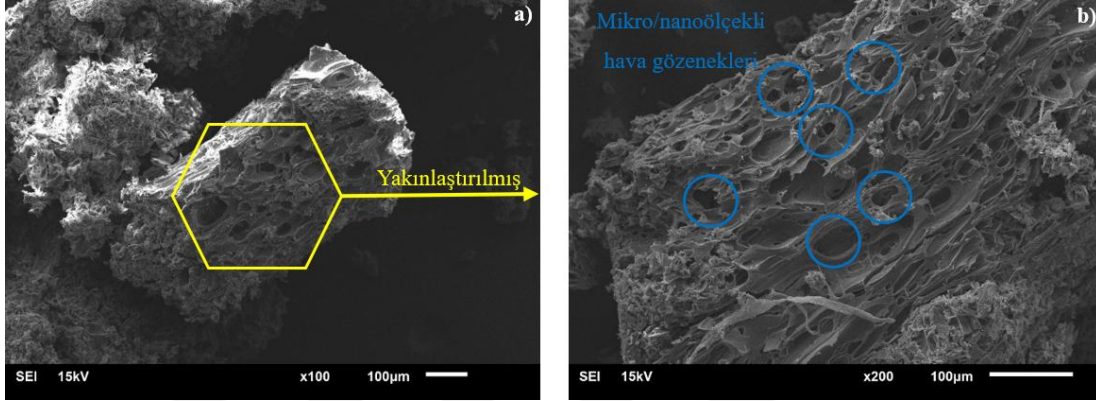
**Şekil 6.** YYS'nin hidratasyon öncesi görüntüsü

Şekil 7a'da YYS'nin EDS (Enerji Dağılımlı Spektroskopi) görüntüsü, Şekil 7b'de ise spektroskopik analizle elde edilen element dağılımı sunulmaktadır. YYS'nin kimyasal bileşiminde büyük oranda  $\text{SiO}_2$  (silisyum dioksit) bulunduğu gözlemlenmiştir. Bunun yanında  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (alüminyum oksit),  $\text{CaO}$  (kalsiyum oksit) ve  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (demir oksit) de belirlenmiştir. YYS içerisinde bor minerali bulunmasına rağmen, çok düşük miktarda olması nedeniyle spektral analizde doğrudan tespit edilememektedir.



Şekil 7. a) YYS malzemesine ait EDS katmanlı görüntüsü, b) YYS'nin spektral analiz sonucu ile elementel bileşim dağılımı

Deneylerde kullanılan YYS'nin iç yapısı incelendiğinde, Şekil 8a'da görüldüğü üzere çok sayıda genişleştirilmiş perlit taneciğine rastlanmaktadır. Bu perlit yapısı yakından incelendiğinde, Şekil 8b'de görülen ve "ölü hava boşlukları" olarak adlandırılan gözenekli yapılar dikkati çekmektedir. Bu boşlukların varlığı, sıvanın yüksek ısı yalıtım performansına katkı sağladığı şeklinde değerlendirilmektedir.



**Şekil 8. a) YYS'nin 100x'te SEM görüntüsü, b) Mikro-nano hava gözeneklerinin temsili**

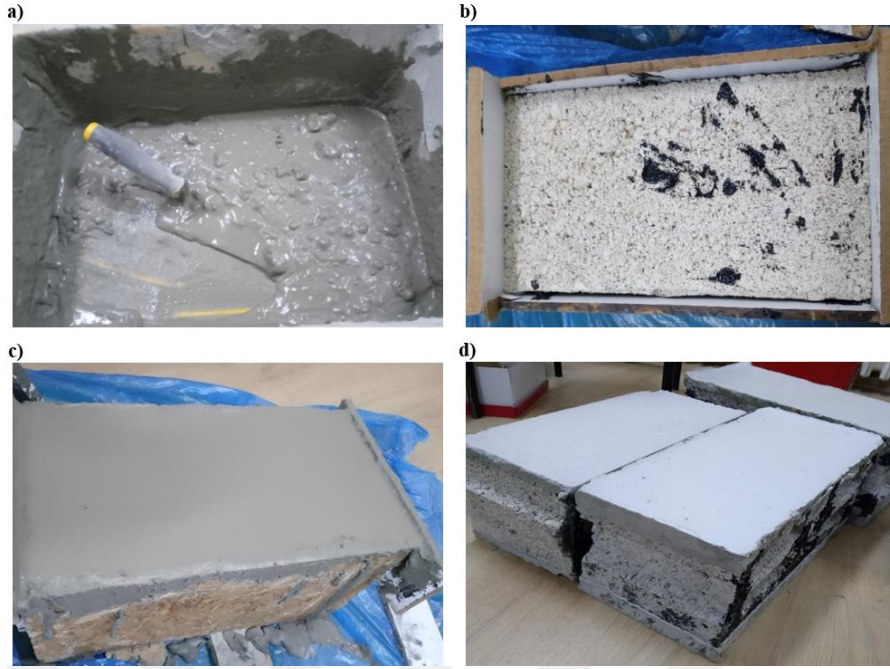
### 2.1.2. Test Numunesi Hazırlanışı

Kum, çakıl, çimento ve su karışımından üretilen ve genellikle yapı ile betonarme duvar malzemesi olarak kullanılan yuvarlak şekilli bloklar, literatürde "briket" olarak adlandırılmaktadır. Türkiye'nin özellikle Anadolu coğrafyasında yaygın olarak kullanılan bu yapı elemanları, yüksek U-değerine sahip olmaları nedeniyle yalın hâllerile önemli miktarda ısı kaybına neden olmaktadır. Briketin bu olumsuz termal performansı, içerisinde kullanılan agrega malzemelerin yüksek k-değerinden kaynaklanmaktadır. Bu durum, ısıtma ve soğutma süreçlerinde daha fazla enerji tüketimi ve dolayısıyla daha yüksek maliyetler anlamına gelmektedir. Anadolu yapı stokunun büyük bir bölümünde briketin hâlen aktif olarak kullanılıyor olması, bu malzemenin iyi bir yalıtım özelliğine sahip olduğu anlamına gelmemektedir. Bu nedenle mevcut briketlerin, çevre dostu, toksik olmayan ve sürdürülebilir bir yalıtım yöntemiyle desteklenmesi gerekmektedir. Bu bağlamda, düşük yoğunluklu, nefes alabilen, yangına dayanıklı ve yüksek yalıtım performansına sahip olan YYS ile kaplanması hem ısı kayıplarını azaltacak hem de estetik açıdan daha homojen bir yüzey görünümü kazandıracaktır. Ayrıca bu tür bir kaplama işlemi, sadece konut ve

geleneksel bina uygulamalarıyla sınırlı kalmayıp; geçici yapılar, afet barınakları, konteyner mimarisi, hafif prefabrik yapılar, tarımsal depolar, enerji verimliliği odaklı yenileme projeleri gibi pek çok farklı alanda da kullanılabilirlik potansiyeli sunmaktadır. Hafifliği, doğal yapısı ve yangın dayanımı sayesinde okul, hastane ve kamu binaları gibi kullanıcı güvenliğinin ön planda olduğu yapılarda da tercih edilebilecek niteliktedir. Ayrıca, mevcut briket duvarlara sonradan uygulanabilir olması hem yeni yapılarda hem de mevcut yapı stokunun iyileştirilmesinde önemli bir avantaj sağlamaktadır.

Uygulama süreci, 20 kg ağırlığındaki YYS malzemesine 20 L su ilave edilerek başlatılmıştır. Karışım, homojen bir kıvam elde edilene kadar yaklaşık 5 dakika boyunca mekanik karıştırıcı yardımıyla orta devirde karıştırılmıştır. Harç kıvamına gelen sıva, uygulamaya hazır hâle geldiğinde yüzeye tatbik edilmeden önce kısa bir süre dinlendirilerek kıvam kararlılığı gözlemlenmiştir. Hazırlanan harç yüzeye uygulandıktan sonra, yalıtım performansını olumsuz etkileyebilecek herhangi bir bozulma, çatlama, kabarma, ayrışma veya boşluk oluşumu olup olmadığı dikkatlice kontrol edilmiştir. Bu kontrol süreci, hem görsel inceleme (makro düzeyde yüzey sürekliliği ve homojenlik kontrolü) hem de yüzeyin parmakla hafifçe bastırılması gibi basit mekanik testler ile gerçekleştirilmiştir. Ayrıca yüzeyin kuruma sürecinde meydana gelebilecek rötire çatlakları açısından ilk 24 saat boyunca düzenli gözlem yapılmıştır. Gözlemler sırasında herhangi bir ayrışma, liflerin yüzeyde topaklanması, suyun yüzeye çıkması ya da kıvam dengesizliği gibi olumsuzlukların oluşmadığı doğrulanmıştır. Böylece, numunenin deneysel aşamalara geçişi öncesinde yüzey kalitesi güvence altına alınmıştır. Daha sonra, hazırlanan sıva; briketlerin hem iç hem de dış yüzeylerine, kalıplar yardımıyla sırasıyla 10-10, 20-10 ve 20-20 mm kalınlıklarında olacak şekilde uygulanmıştır. Uygulamada, sıvanın yüzeye eşit şekilde yayılması sağlanmış, köşe ve kenar birleşim bölgelerinde sıva bütünlüğünün korunmasına özen gösterilmiştir. Numuneler, uygulama sonrasında doğrudan güneş ışığı ve rüzgâr etkisinden korunacak şekilde iç ortam koşullarında kurumaya bırakılmıştır. Bu aşamalar Şekil 9’te sırasıyla görsel olarak sunulmuştur.





**Şekil 9. a)** Harç hazırlama aşamasının görüntüsü, **b)** Kalıba yerleştirilen deney numunesinin görüntüsü, **c)** Deney numunesinin YYS ile kaplanması aşamasının görüntüsü, **d)** Deney numunelerinin yeterli süre beklendikten sonraki son görüntüsü

## **2.2. Yalıtım Sıvalarının Yangın Dayanımı ve Sıcaklık Maruziyeti Altındaki Davranışı**

Bu çalışmada, C30/37 sınıfı 100 mm'lik beton numunelerinin yüzeyleri, sırasıyla 10 mm, 20 mm ve 30 mm kalınlığında pürüzlü sıva ve YYS ile kaplanmıştır. Ayrıca, kaplama işlemi yapılmayan yeterli sayıda beton numune de deneylerde kullanılmıştır. Literatürde, betonun yüksek sıcaklıklara karşı dayanımını test etmek için genellikle 900°C'ye kadar ısıtma ve 2-3 saatlik bir bekleme süresi uygulandığı görülmektedir. Ancak bu çalışmada, her bir numune, belirlenen kaplama işlemi tamamlandıktan sonra 60 dakika, 90 dakika ve 120 dakika süreyle sırasıyla 300°C, 450°C ve 600°C sıcaklıklara maruz bırakılmıştır. Numuneler, ısıtma işlemi sonrasında fırından çıkarılmış ve üzerlerindeki kaplamalar dikkatlice sıyrılmıştır. Ardından, numuneler, basma dayanımı testine tabi tutulmuş ve elde edilen sonuçlar detaylı bir şekilde incelenmiştir. Yapılan deneysel prosedürlerin her aşaması, Şekil 10'da adım adım gösterilmiştir.





**Şekil 10. a)** Hazırlanmış harcın kalıba dökülmesiyle beton numunelerinin oluşturulması, **b)** Numunelerin belirlenen kalınlıkta pürüzlü sıva ile kaplanma aşaması, **c)** Numunelerin fırına yerleştirilerek, belirli sıcaklıklara maruz bırakılması, **d)** Fırınlamadan sonra, numunelerin basma dayanımı testine tabi tutulması

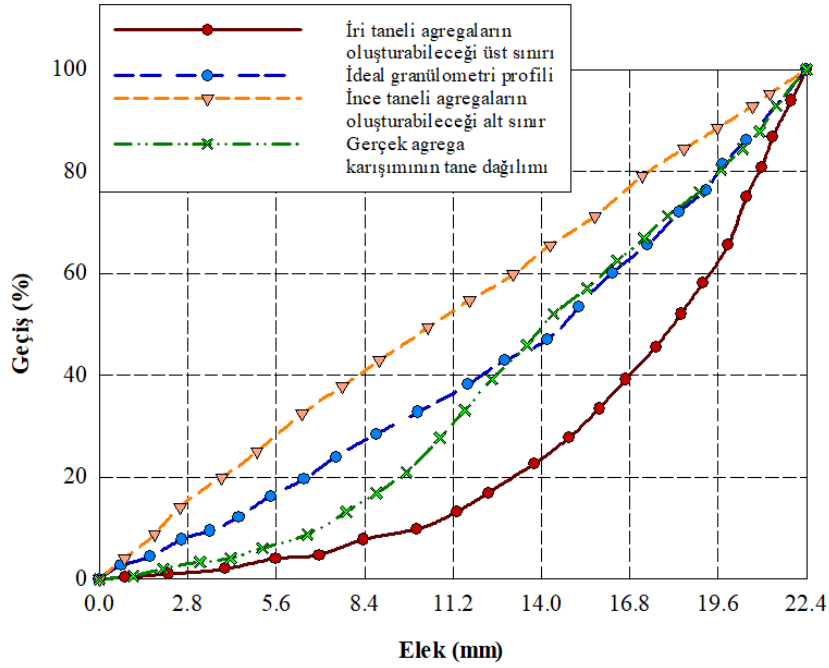
İlk adımda, 100 mm'lik beton numuneler hazırlanarak deneysel sürece başlanmıştır. Ardından bu numuneler, belirlenen kalınlıklarla RP ve 2.1.1.'de detaylıca açıklanan YYS ile kaplanmış ve ısıtma işlemleri için hazırlanmıştır. Isı iletkenliği ve toplam ısı transfer katsayısı ölçümleri, sıcak kutu yöntemi kullanılarak, bir YYS örneği üzerinde yapılmıştır. Bu ölçümler sonrasında, her bir numune basma dayanımı testine tabi tutulmuş ve elde edilen değerler kaydedilmiştir. Deneysel sürecin sonunda, numunelerin iç yapıları mikroskobik analizlerle incelenmiş ve bu analizler, sıcaklık iletkenliği ve dayanım üzerindeki etkilerini gözler önüne sermiştir. Son olarak, doğrulama amacıyla sayısal akış dinamiği analizleri ve regresyon modellemeleri yapılmıştır.

Bu çalışmanın temel amacı, beton numunelerinin termal ve mekanik davranışlarını derinlemesine incelemektir. Isı iletkenliği ve mekanik dayanım

arasındaki ilişkiyi anlamak, kaplama malzemelerinin betonun yüksek sıcaklık dayanımına etkilerini daha iyi kavrayabilmek için kritik öneme sahiptir. Ayrıca, mikroskopik incelemelerle numunelerin iç yapısındaki değişiklikler, kaplama malzemelerinin betonun termal ve mekanik özellikleri üzerindeki etkisini daha net bir şekilde gözler önüne serdiği gibi, sayısal akış dinamiği analizi ve regresyon modellemeleri de deneysel bulguların doğruluğunu test etmek için önemli bir araç olmuştur. Bu bağlamda, yapılan bu araştırma, betonun yüksek sıcaklık altındaki davranışlarını anlamada önemli bir katkı sağlayacak olup, farklı kaplama malzemelerinin betona olan etkilerini karşılaştırmalı bir biçimde ele almayı amaçlamaktadır.

### **2.2.1. Agregat Granülometrisi Ve Beton Numune Hazırlığı**

Şekil 11’de yer alan granülometri eğrileri, TS 802:1985 standardı esas alınarak oluşturulmuş olup, beton karışımında kullanılabilecek agregaların tane boyutu dağılımına ilişkin sınırları göstermektedir. Bu eğrilerden biri ince taneli agregaların oluşturabileceği alt sınırı (turuncu), bir diğeri ideal granülometri profilini (mavi) ve bir diğeri de iri taneli agregaların oluşturabileceği üst sınırı (kahverengi) temsil etmektedir. Bu sınırlar, agregaların optimum oranda karıştırılmasıyla betonun hem taze halindeki işlenebilirliğini hem de sertleşmiş halindeki mekanik dayanımını ve dayanıklılığını artırmak amacıyla belirlenmiştir. Aynı şekilde, Şekil 11’de yer alan ve yeşil renkle gösterilen eğri ise çalışmada kullanılan gerçek agregat karışımının tane dağılım eğrisini göstermektedir. Bu karışım, üç farklı agregat türünün belirli oranlarda bir araya getirilmesiyle elde edilmiştir. Kullanılan agregat bileşimi; %20 oranında 0-4 mm tane boyutundaki doğal nehir kumu, %35 oranında aynı fraksiyonda kırma kum ve %45 oranında 4-32 mm fraksiyonundaki kırma iri agregadan oluşmaktadır. Bu oranlar, elde edilen karışımın granülometri eğrisinin, TS 802 standardında yer alan ideal eğriye mümkün olduğunca yakın olmasını sağlamak amacıyla belirlenmiştir.



**Şekil 11.** Betonda kullanılan agrega granülometri eğrisi

Çalışmada kullanılan beton karışımı, C30/37 dayanım sınıfına sahiptir ve 180 mm'lik çökme değeri ile orta-işlenebilir kıvamda bir taze beton karakteri göstermektedir. Bu kıvam, betonun kalıba kolay yerleşmesini ve homojenliğini koruyarak segregasyon riskinin azaltılmasını mümkün kılmaktadır. Beton karışımının içeriği ile ilgili nicel bilgiler ise Tablo 6'da sunulmuştur. Söz konusu tabloda, 1 m<sup>3</sup> beton üretimi için kullanılan çimento, su ve çeşitli agrega türlerinin miktarları açıkça verilmiştir. Ayrıca, her bir agreganın birim hacim ağırlıkları ile su emme oranları da tabloda yer almakta olup, bu veriler karışım tasarımının dayanıklılık ve dayanım açısından optimize edilmesi amacıyla değerlendirilmiştir.

**Tablo 6.** Beton karışımında kullanılan malzeme miktarları

| Malzeme                      | Miktar (kg) | Özgül ağırlık | Su emme oranı (%) |
|------------------------------|-------------|---------------|-------------------|
| Doğal nehir kumu<br>(0-4 mm) | 517         | 2.53          | 3.42              |
| Kırma kum (0-4 mm)           | 505         | 2.47          | 5.68              |

**Tablo 6 (Devam).** Beton karışımında kullanılan malzeme miktarları

| Malzeme                       | Miktar (kg) | Özgöl ağırlık | Su emme oranı (%) |
|-------------------------------|-------------|---------------|-------------------|
| Kırma iri agrega<br>(4-32 mm) | 757         | 2.78          | 2.06              |
| Çimento                       | 396         | 3.10          | -                 |
| Su                            | 178         | 1.00          | -                 |
| Kimyasal katkı<br>maddesi     | 3.96        | 1.12          | -                 |

### 2.3. Bambu Lifleri İçeren Briketlerin Termal Performansının Değerlendirilmesi

Bu bölümde, çalışmanın prosedürel yönleri farklı alt başlıklar altında okuyucuya sunulacaktır. İlk olarak, bambu bitkisinin termofiziksel özellikleri ve yalıtım özellikleri üzerinde durulacaktır. Ardından, briket dökümünde kullanılan yöntem ve ölçüm teknikleri açıklığa kavuşturulacaktır. Son olarak, çalışmada ana yöntem olarak kullanılan coheating testinin benimsenme süreci ve uygulamaları detaylandırılacaktır.

#### 2.3.1. Bambu Malzemesi

Bambu ile ilgili literatür incelendiğinde, mekanik özelliklere dair oldukça fazla çalışma bulunmasına karşın, termal özelliklere yönelik araştırmaların oldukça sınırlı olduğu görülmektedir. Bu durum, bambunun termofiziksel açıdan incelenmesi gerektiğini ortaya koymaktadır. Ancak, konuya dair mevcut çalışmaların kısa bir özeti şu şekilde sunulabilir. Bambu, uyum sağlayabilen lif yapısı sayesinde ısı yalıtımı ve korunumu konusunda oldukça etkileyici özellikler sergilemektedir. Bu özellikleri sayesinde bambunun termal iletkenliği 0.30 W/mK gibi düşük bir değere ulaşabilmektedir (Bhagat vd., 2021). Bartlett vd. (2018), bambu örnekleri üzerinde yaptıkları deneylerde, lamine bambunun, tipik olarak 0.14 W/mK termal iletkenliğe sahip olan doğal ahşaba kıyasla neredeyse iki kat daha yüksek k-değeri gösterdiğini belirtmişlerdir. Ayrıca, bambu, yüksek sıcaklıklara karşı da dayanıklıdır ve 400°C'ye kadar 20-30 dakika süreyle dayanabileceği gözlemlenmiştir. Düşük enerji tüketimi

özellikleri ise bambuyu, termal stabilitesi sayesinde, çeşitli yapı malzemelerinin yerine kullanılabilir kılmaktadır. Bu özellikler, bambuyu endüstriyel olarak üretilen diğer yapı malzemelerinin yerine geçebilecek potansiyele sahip bir alternatif olarak öne çıkarmaktadır. Şekil 12, deneyde kullanılan ve ön öğütme işlemine tabi tutulan bambu örneğinin temsilci bir görüntüsünü göstermektedir.



**Şekil 12.** Deneyde kullanılacak bambu tasviri

### 2.3.2. Briket Dökümü

Briket döküm işlemine başlamadan önce, çalışmanın temel amacı, bambuya uyumlu briketlerin farklı ağırlık yüzdelerine göre hazırlanabilmesi için gerekli malzemelerin ağırlıklarının belirlenmesidir. Bu aşamada, briket yapımında kullanılacak malzemelerin temini de aynı anda başlatılmaktadır. Bu malzemeler arasında çimento, ince agrega ve kaba agregalar yer almaktadır. Önemli bir adım, agregaların uygun kalınlıkta olmasını sağlamak için eleme işlemidir ve bu işlem, 8 mm'lik bir kalınlık standardına dayalı bir tarama süreci ile gerçekleştirilir. Sonrasında, önceden belirlenen malzeme miktarları, hassas teraziler kullanılarak gram bazında dikkatlice ölçülür ve bambu lifleri ile birlikte uygun kaplara aktarılır. Bu aşamanın ardından, malzemelerin karışımının yapılacağı harç makinesinde, bambu lifi oranına göre malzemeler sırasıyla eklenerek homojen bir karışım elde edilmesi sağlanır. Bu süreç, briketin şekillendirilmeden önce malzemelerin eşit bir şekilde karışmasını garanti altına alır. Karıştırma işlemi sırasında, belirlenen su miktarı yavaşça karışımına eklenir, bu sayede agrega, çimento ve suyun birleşmesi sağlanır ve bağlayıcı özellik kazanılır. Karıştırma işlemi tamamlandıktan sonra, briket kalıbının iç yüzeyi,



belirlenen standartlara uygun olarak düzgün bir şekilde yağlanır. Bu, kürleme işlemi sırasında yapışma sorunlarını önlemek amacıyla yapılır. Kalıp daha sonra bir titreşim makinesine yerleştirilir ve homojen karışım, kalıba dökülür. Titreşim makinesi, harcın optimum şekilde bağlanmasını sağlamak açısından kritik bir rol oynamaktadır. Bu aşama tamamlandıktan sonra, kalıp oda sıcaklığında kontrollü bir ortamda tutulur ve periyodik olarak sulama yapılır, bu da briketin çatlamasını engellemeye yardımcı olur. Yeterli kürleme süresi tamamlandıktan sonra, briket kalıptan çıkarılır ve test için hazır hale gelir. Bu süreç, bambu lifi oranları farklı olacak şekilde tekrarlanır ve her bir oran için dört farklı örnek elde edilir. Bunlardan biri, bambu lifi yerine tamamen normal malzemelerle yapılır. Kalıp, 150 mm derinlik, 150 mm yükseklik ve 330 mm uzunluğunda briketler üretmek üzere tasarlanmıştır. Briket örneğinin şekillendirilmesi ve test için hazır hale geldiğinde nasıl görüldüğü Şekil 13a ve 13b’de görselleştirilmiştir.



**Şekil 13. a)** Numunenin deneye hazırlanma aşamasındaki durumu, **b)** Numunenin deneye hazır olduğu anki durumu

Bu çalışmada kullanılan malzeme ağırlıkları, bambu lifi oranlarına bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. Söz konusu oranlara göre belirlenen ağırlık değerleri aşağıda Tablo 7’de sunulmuştur.

**Tablo 7.** Bambu elyaf oranlarına göre malzeme ağırlıkları

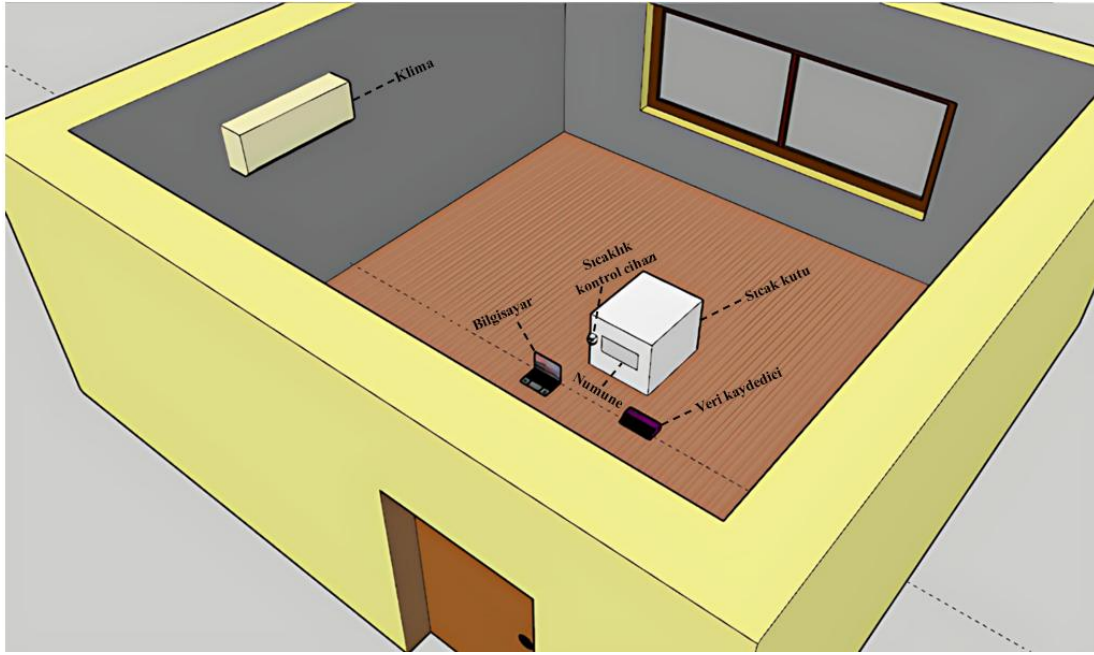
| Lif içeriği (%)  | 2      | 4      | 6      |
|------------------|--------|--------|--------|
| Çimento (gr)     | 1190   | 1150   | 1150   |
| Bambu (gr)       | 225.23 | 438.38 | 641.85 |
| İnce agrega (gr) | 2544   | 2416   | 2288   |
| Kaba agrega (gr) | 6392.5 | 6258.5 | 6124.5 |
| Su (ml)          | 1135   | 1135   | 1135   |

#### 2.4. Coheating Testi Uygulaması

Coheating testi, bir yapının toplam ısı kaybını W/K birimiyle ölçmek için kullanılan güvenilir bir yöntemdir (Johnston vd., 2013). Yöntem, yapı kabuğu (duvarlar, pencereler) ve arka plan havalandırması dahil olmak üzere tüm bileşenlerin ısı performansını değerlendirir. 1970'lerden bu yana farklı ülkelerde uygulansa da günümüzde hâlâ uluslararası bir standarda tam olarak kavuşturulamamıştır (Farmer vd., 2016; Kalagasidis vd., 2016). Bu yöntem, ilk olarak 2010 yılında Leeds Beckett Üniversitesi tarafından sistematik bir yapıya kavuşturulmuş ve hem gerçek yapı uygulamalarında hem de kontrollü laboratuvar ortamlarında yaygın biçimde kullanılmaya başlanmıştır (Jack vd., 2018). Testin uygulanmasında, iç ortam sıcaklığının yaklaşık 25°C'de sabit tutulması ve dış ortamla en az 10°C sıcaklık farkının sağlanması esastır (Johnston vd., 2010). Bu sıcaklık farkı, kış aylarında dış ortam sıcaklığının doğal olarak düşük olması sayesinde genellikle ek bir soğutma sistemine gerek kalmadan elde edilebilir. Ancak laboratuvar ortamlarında bu fark, dış ortam sıcaklığını düşürmek amacıyla klima veya benzeri soğutma sistemleri kullanılarak yapay olarak sağlanır. İç sıcaklığın kontrolü için elektrikli ısıtıcılar kullanılırken, fan yardımıyla iç mekânda homojen sıcaklık dağılımı sağlanır. Bu test, özellikle dış duvarlarda ısı kaybının belirlenmesinde kullanılsa da; pencerelerin ısı performansı ve yapıların hava sızdırmazlık düzeyinin analizinde de etkilidir (Cuce vd., 2016a; Cuce, 2017). Coheating testinin doğruluğu, ısı akısı ölçümleri ve termal kamera görüntülemeleri gibi tamamlayıcı yöntemlerle artırılabilir. Özellikle bina güçlendirmesi sonrası, yapı elemanlarının birleşim noktalarında (örneğin kolon-kiriş kesişimleri) meydana gelebilecek soğuk veya sıcak noktalar bu yöntemle kolaylıkla

tespit edilebilir. Böylece hem güçlendirme uygulamalarının etkinliği gözlemlenebilir hem de olası yalıtım eksiklikleri belirlenebilir.

Bu çalışmada, yaklaşık 1 m<sup>3</sup> hacminde özel olarak tasarlanmış bir sıcak kutu sistemi laboratuvar ortamında uygulanmıştır. Her yüzeyi 40 mm kalınlığında XPS yalıtım malzemesi ile kaplanmış ve hava sızdırmazlığı sağlanmış bu yapı, Şekil 14’te şematik olarak gösterilmektedir.

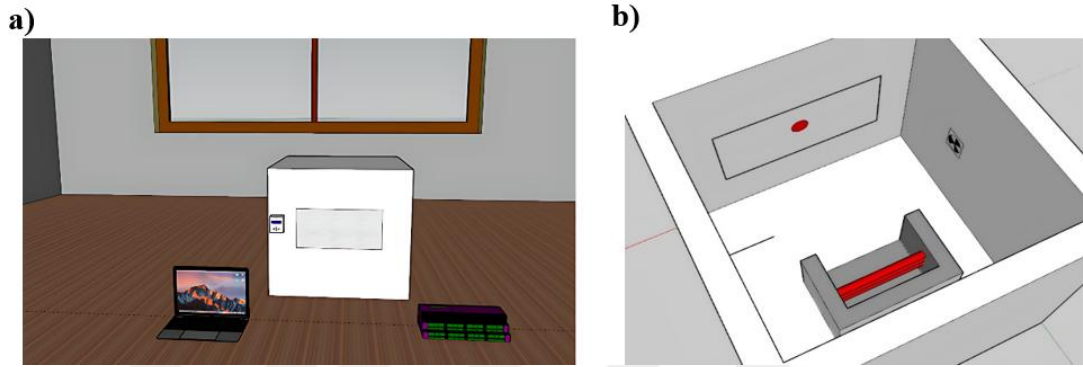


**Şekil 14.** Deneysel sıcak kutu düzeniğinin laboratuvar ortamında modellenmiş görünümü

İç ortamda istenen sıcaklık farkını oluşturmak amacıyla kutu içine bir elektrikli ısıtıcı yerleştirilmiş; sıcaklık kontrol birimi yardımıyla iç sıcaklık istenen düzeyde sabitlenmiştir. Deney numunesi, briket boyutlarına uygun olarak ayrılmış bölgeye yerleştirilmiş; iç yüzeyine yüksek hassasiyetli bir ısı akısı sensörü ile T tipi termokupllar monte edilmiştir. Üst kapak kapatılarak iç ortam tamamıyla izole edilmiş, ardından numunenin dış yüzeyine de termokupllar yerleştirilmiştir. Dış ortam sıcaklığı ise, iç ortamla istenen farkı sağlayacak şekilde klima sistemi ile ayarlanmıştır. Tüm ölçüm cihazlarının çıkışları veri kaydedicilere (data logger) bağlanarak verilerin sürekli olarak toplanması sağlanmıştır. Sistemin çalıştırılması öncesinde, termal görüntüleme yöntemi ile hava sızdırmazlık testi gerçekleştirilmiş; elde edilen



bulgulara göre kutuda tam yalıtım sağlandığı tespit edilmiştir. Bilgisayar ortamında gerekli kontroller tamamlandıktan sonra ortam fiziksel etkileşime kapatılmış ve veri toplama süreci başlatılmıştır. Her bir numune için deney yaklaşık üç gün sürmüş ve ölçüm verileri belirli aralıklarla veri kaydedicilerden alınarak analiz edilmiştir. Şekil 15a ve 15b'de test sürecinde kullanılan tüm cihazlar ayrıntılı şekilde gösterilmektedir.



**Şekil 15. a)** Deney düzeneğinde kullanılan ölçüm cihazlarının detaylı görünümü, **b)** Sıcak kutu sistemi içerisindeki iç ortamın şematik temsili

## 2.5. Belirsizlik Analizi

Sistemin termal performansına ilişkin ölçüm sonuçlarının belirsizliği, karekök toplam yöntemi kullanılarak hesaplanmıştır. Bu yöntem Denklem (2) ile ifade edilmektedir (Coleman ve Steele, 2018):

$$u_Q = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left( \frac{\partial Q}{\partial X_i} \cdot u_{X_i} \right)^2} \quad (2)$$

Burada;

$u_Q$ : toplam birleşik belirsizlik,

$X_i$ : Q'yu etkileyen her bir giriş parametresi,

$u_{X_i}$ : her bir giriş parametresinin standart belirsizliği,

$\frac{\partial Q}{\partial X_i}$ : Q'nun ilgili parametreye göre duyarlılığıdır.

Bu çalışmada, ısı geçiş hızı ve buna karşılık gelen ısı kaybı katsayısı  $H_{kayıp}$ , başlıca ısı akısı ve sıcaklık farkı parametrelerine bağlıdır. Bu analizde dikkate alınan deneysel parametreler şu şekildedir:

Termokuplların ölçüm belirsizliği:  $\pm 0.15^\circ\text{C}$

İç ortam sıcaklığı: 25°C

Dış ortam sıcaklığı: 14.5°C

Sıcaklık farkı: 10.5°C

Isı akısı sensörünün belirsizliği:  $\pm 0.02$

Isı geçiş miktarı Denklem (3) ile hesaplanmıştır:

$$Q = U \cdot A \cdot \Delta T \approx 190W \quad (3)$$

Bu doğrultuda ısı kaybı katsayısı aşağıdaki şekilde belirlenmiştir:

$$H = \frac{Q}{\Delta T} = \frac{190}{10.5} = 18.1 W/K \quad (4)$$

ifadesine göre, H'nin Q ve  $\Delta T$ 'ye göre duyarlılığı şu şekilde hesaplanır:

$$\frac{\partial H}{\partial Q} = \frac{1}{\Delta T} = \frac{1}{10.5} = 0.095 \quad (5)$$

$$\frac{\partial H}{\partial \Delta T} = -\frac{Q}{\Delta T^2} = -\frac{190}{10.5^2} = -1.723 \quad (6)$$

Bu değişkenlere göre belirsizlik analizi uygulanarak:

$$u_H = \sqrt{(0.095 \times 0.02)^2 + (1.723 \times 0.212)^2} \quad (7)$$

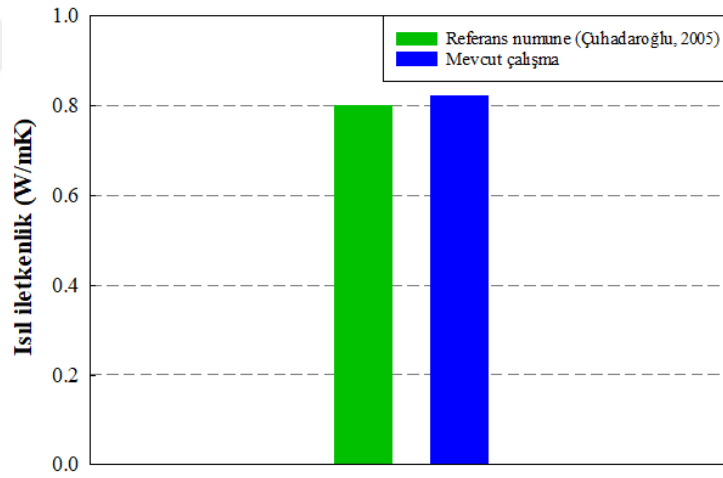
ve bağıl belirsizlik şu şekilde bulunmuştur:

$$\frac{u_H}{H} \times 100 \approx \%1.42 \quad (8)$$

### 3. BULGULAR VE TARTIŞMA

#### 3.1. Yenilikçi Yalıtım Sıvasının Termal Performansı

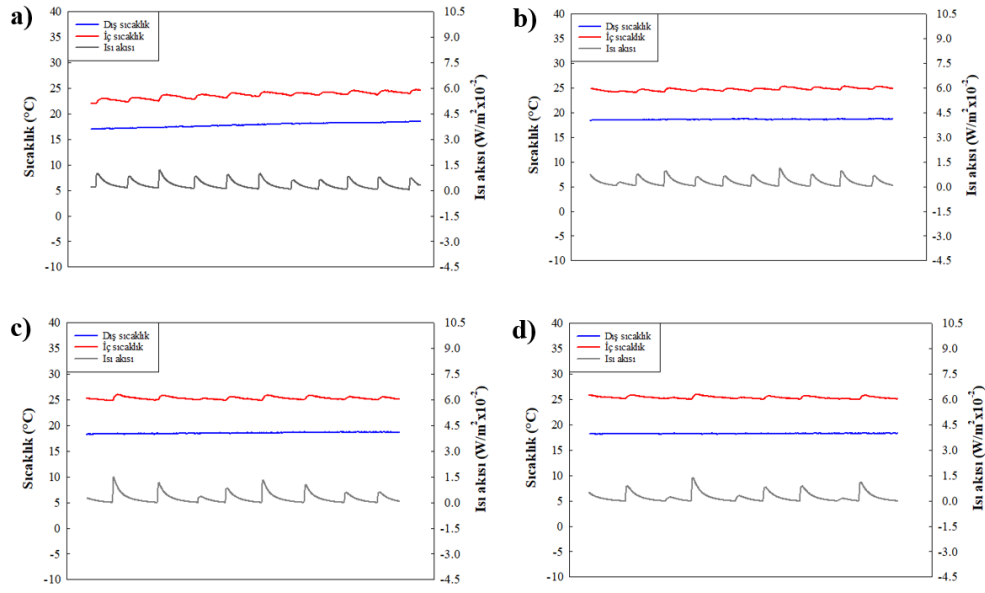
Yapılan literatür taraması ve deneysel çalışmalar neticesinde, geleneksel briketlerin ortalama  $k$ -değeri  $0.8 \text{ W/mK}$  olarak belirlenmiştir (Çuhadaroglu, 2005). Bu referans değeri temel alınarak yürütülen deneysel testlerde ise, kullanılan numunelere ait  $k$ -değeri  $0.82 \text{ W/mK}$  olarak ölçülmüştür. Elde edilen bu iki değer arasında gözlemlenen küçük farkın, kullanılan briket örneklerinin fiziksel özelliklerinden, özellikle yoğunluk ve birim hacim ağırlıklarındaki farklılıklardan kaynaklandığı değerlendirilmektedir. Bu durum, yapı malzemelerinde ısı performansının yalnızca malzeme türüne değil, aynı zamanda üretim parametrelerine ve iç yapısal homojenliğe de bağlı olduğunu göstermektedir. Referans veriler ile deneysel bulguların karşılaştırmalı analizi, Şekil 16’da grafiksel olarak sunulmuş ve iki veri seti arasındaki uyum görsel olarak ortaya konulmuştur.



**Şekil 16.** Konvansiyonel briketin ısı iletkenliği üzerinden test sonucunun doğrulanması

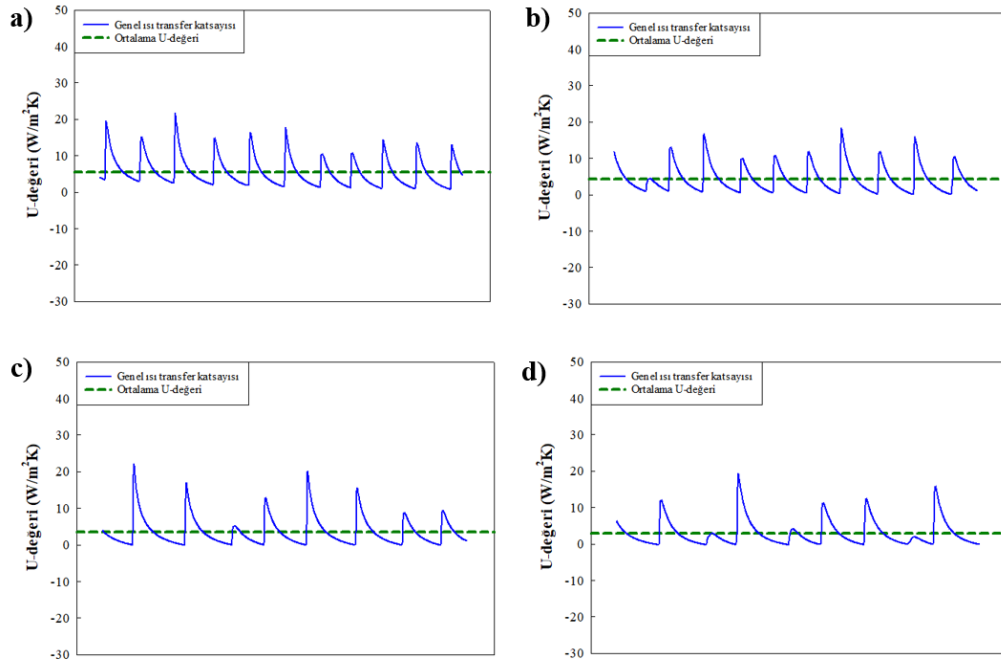
Yapılan deneysel analiz sonuçlarına göre, 0-0 numaralı örneğe ait iç ortam sıcaklıklarının  $21.95^{\circ}\text{C}$  ile  $24.72^{\circ}\text{C}$  arasında, dış ortam sıcaklıklarının ise  $16.94^{\circ}\text{C}$  ile  $18.58^{\circ}\text{C}$  arasında değiştiği gözlemlenmiştir. 10-10 numaralı yapı elemanında ise iç sıcaklıklar  $24.04^{\circ}\text{C}$  ile  $25.40^{\circ}\text{C}$  arasında, dış sıcaklıklar ise  $18.40^{\circ}\text{C}$  ile  $18.83^{\circ}\text{C}$  arasında ölçülmüştür. Diğer taraftan, 20-10 örneğine ait giriş ve çıkış sıcaklıklarının

sırasıyla 24.77°C ile 26.10°C ve 18.23°C ile 18.79°C arasında değiştiği tespit edilmiştir. 20-20 numaralı örnek için ise iç sıcaklıkların 24.92°C ile 26.04°C, dış sıcaklıkların ise 18.04°C ile 18.39°C arasında değiştiği belirlenmiştir. Bu veriler doğrultusunda, 20-20 numaralı briket örneğinin en yüksek iç sıcaklık değerine sahip olduğu anlaşılmaktadır. Bu durum, söz konusu yapı elemanında ısı transferinin diğer örneklerle kıyasla daha düşük olduğunu, dolayısıyla YYS kalınlığının ısı iletimini önemli ölçüde sınırlandırıldığını göstermektedir. Ayrıca, iç ve dış ortam sıcaklıkları arasındaki en yüksek sıcaklık farkı da yine 20-20 numaralı örnekte elde edilmiştir. Isı akısı değerlerine bakıldığında, 0-0 numaralı örnekte  $0.04 W/m^2 \times 10^{-2}$  ile  $1.19 W/m^2 \times 10^{-2}$  arasında; 10-10 için  $0.0024 W/m^2 \times 10^{-2}$  ile  $1.13 W/m^2 \times 10^{-2}$  arasında; 20-10 için  $0.00764 W/m^2 \times 10^{-2}$  ile  $1.49 W/m^2 \times 10^{-2}$  arasında ve 20-20 numaralı yapı elemanında ise  $0.019 W/m^2 \times 10^{-2}$  ile  $1.38 W/m^2 \times 10^{-2}$  arasında değişen değerler elde edilmiştir. Buna ek olarak, ortalama ısı akısı değerleri sırasıyla 0-0 için  $0.32 W/m^2 \times 10^{-2}$ , 10-10 için  $0.26 W/m^2 \times 10^{-2}$ , 20-10 için  $0.24 W/m^2 \times 10^{-2}$  ve 20-20 için  $0.21 W/m^2 \times 10^{-2}$  olarak kaydedilmiştir. Elde edilen bu sonuçlara göre, ısı akısı bakımından en yüksek değer 0-0 numaralı örnekte gerçekleştiği, bunun da daha fazla ısı transferine olanak tanıyan yapısal özelliklerden kaynaklandığı anlaşılmaktadır. Bu bulgular, ısı transferi mekanizmaları ve malzeme performansı açısından önemli karşılaştırmalar sunmaktadır. Tüm bu değerlere ilişkin grafiksel gösterimler Şekil 17’de detaylı biçimde sunulmuştur.



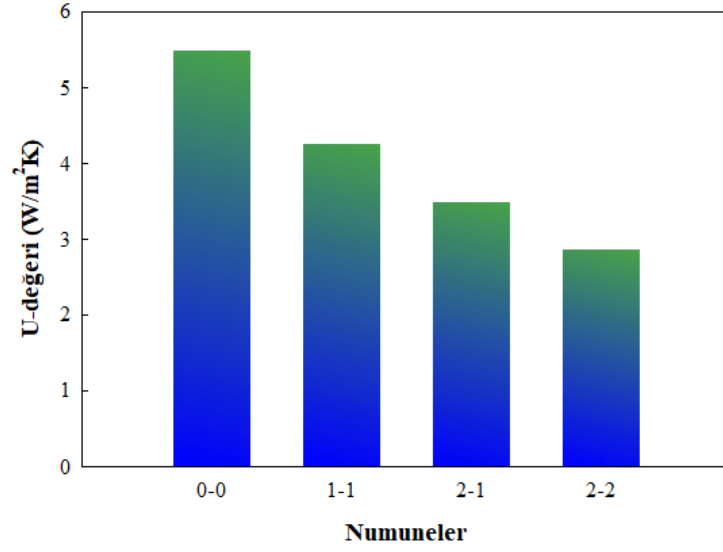
**Şekil 17. a) Briketin iç sıcaklığı, dış sıcaklığı ve ısı akısı değerleri 0-0, b) Briket 10-10, c) Briket 20-10, d) Briket 20-20**

Yapılan deneyler sonucunda, U-değeri 0-0 kalınlıklı numune için  $0.75 \text{ W/m}^2\text{K}$  ile  $21.71 \text{ W/m}^2\text{K}$ , 10-10 için  $0.04 \text{ W/m}^2\text{K}$  ile  $18.42 \text{ W/m}^2\text{K}$ , 20-10 için  $0.12 \text{ W/m}^2\text{K}$  ile  $22.24 \text{ W/m}^2\text{K}$  ve 20-20 için  $0.28 \text{ W/m}^2\text{K}$  ile  $19.35 \text{ W/m}^2\text{K}$  aralığında değişmektedir. Deneysel bulgulara göre, ortalama toplam ısı geçiş katsayısı değerleri sırasıyla 0-0 numunesi için  $5.49 \text{ W/m}^2\text{K}$ , 10-10 için  $4.26 \text{ W/m}^2\text{K}$ , 20-10 için  $3.50 \text{ W/m}^2\text{K}$  ve 20-20 için  $2.86 \text{ W/m}^2\text{K}$  olarak hesaplanmıştır. Geleneksel briket ile YYS malzemesinin harç yöntemiyle 20-20 mm kalınlığına getirilmesi sonucunda, 20-20 numaralı örneğin toplam ısı geçiş katsayısının, geleneksel brikete kıyasla neredeyse iki kat daha düşük olduğu gözlemlenmiştir. Bu durum, kullanılan yalıtım yapısının ısı iletimini önemli ölçüde sınırladığını ve enerji verimliliğine olumlu katkı sağladığını göstermektedir. Söz konusu U-değeri verileri, yüksek hassasiyetli ısı akısı sensörlerinden elde edilmiştir. Isı akısı sensörü, briketin iç yüzeyine yerleştirilmiş ve veri kaydediciye bağlanarak, sıcaklık ve ısı akısı verileri bilgisayara aktarılmıştır. Böylece deneysel süreç boyunca gerçek zamanlı ve doğru ölçümler yapılması sağlanmıştır. Test edilen her bir numunenin bireysel U-değeri dağılımları Şekil 18’de grafiksel olarak sunulmuştur.



**Şekil 18. a) Briketin U-değeri 0-0, b) Briket 10-10, c) Briket 20-10, d) Briket 20-20**

Aşağıda verilen Şekil 19 incelendiğinde ise test numunelerine ait ortalama ısı geçiş katsayısı değerlerinin, sütun grafik üzerinde YYS kalınlığına bağlı olarak orantılı bir şekilde azaldığı açıkça görülmektedir. Elde edilen bu sonuçlara göre, 0-0 ile 10-10 kalınlıklı örnekler arasında yaklaşık %22.53 oranında bir azalma tespit edilmiştir. Benzer şekilde, 20-10 ile 20-20 kalınlıklı numuneler arasında yaklaşık %18.14 oranında bir düşüş gözlenirken, 10-10 ile 20-10 kalınlıklı numuneler arasındaki azalma oranı ise %17.85 olarak hesaplanmıştır. Öte yandan, en dikkat çekici düşüş oranı 0-0 ile 20-20 örnekleri arasında gözlemlenmiş olup, bu oran yaklaşık %47.9'dur. Bu çarpıcı azalma oranı sayesinde, bina sakinlerinin ısıtma ve soğutma maliyetlerinde belirgin bir düşüş yaşanması beklenmektedir. Aynı zamanda, düşük maliyeti, çevre dostu yapısı ve yüksek enerji verimliliği gibi avantajlara sahip olan YYS malzemesinin, ticari gelişim göstermesi halinde yapı sektöründe dikkat çekici bir alternatif haline geleceği öngörülmektedir.



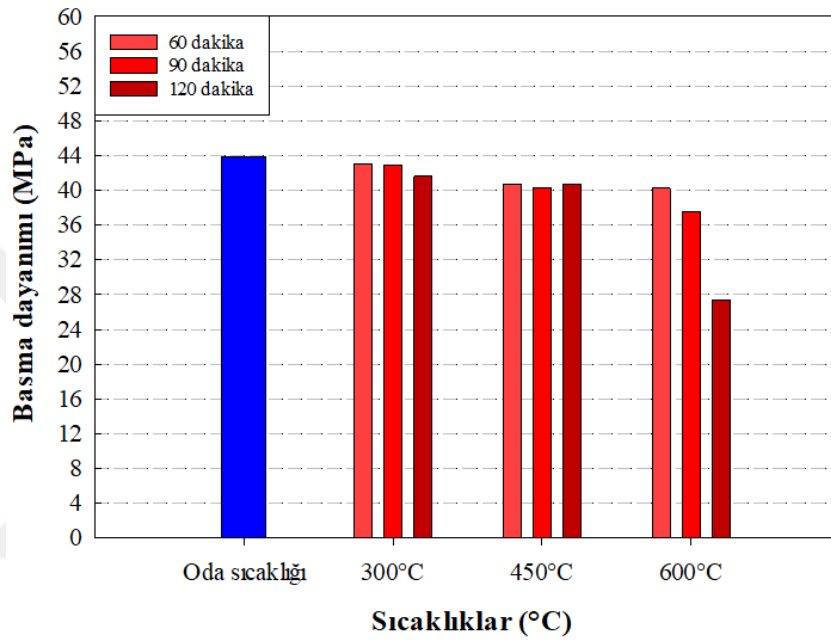
Şekil 19. Briketlerin YYS ile ısı yalıtım özelliklerinde iyileştirmeler

### 3.2. Yalıtım Sıvalarının Yangın Dayanımı ve Sıcaklık Maruziyeti Altındaki Davranışı

Bu deneysel çalışmada, C30/37 sınıfındaki 100 mm kenar uzunluğundaki beton küp numunelerin her yüzeyine RP ve YYS uygulanmıştır. Sıva kaplama kalınlıkları 0 mm (UNP), 10 mm, 20 mm ve 30 mm olacak şekilde değişmektedir. Literatürde betonun yüksek sıcaklık koşullarında mekanik performansını inceleyen çalışmalar çoğunlukla, numunelerin 900°C'ye kadar ısıtılması ve 2-3 saat bu sıcaklıkta tutulması esasına dayanmaktadır. Ancak bu çalışmada farklı bir yaklaşım benimsenmiş; sıva kaplama işleminin ardından numunelere belirli sıcaklıklarda ve sürelerde ısı uygulanmıştır. Bu kapsamda, numuneler 300°C, 450°C ve 600°C sıcaklıklara maruz bırakılmış ve her sıcaklık düzeyi için 60, 90 ve 120 dakikalık bekletme süreleri uygulanmıştır. Isıl işlem tamamlandıktan sonra fırından çıkarılan numunelerin üzerindeki sıva tabakaları dikkatlice sökülüş ve ardından bu numuneler üzerinde basma dayanımı testleri gerçekleştirilmiştir.

Şekil 20'de sunulan test sonuçlarına göre, C30/37 sınıfı betonun oda sıcaklığındaki basma dayanımı yaklaşık 43.9 MPa olarak ölçülmüştür. Yüksek sıcaklığa maruz bırakılan numunelerin basma dayanımı incelendiğinde, en büyük dayanım kaybının 600°C'de gerçekleştiği belirlenmiştir. Özellikle UNP numunelerde, 600°C sıcaklık altında 60, 90 ve 120 dakikalık bekletme süreleri sonunda elde edilen basma dayanımı değerleri sırasıyla 40.23 MPa, 37.555 MPa ve 27.435 MPa'dır. Bu

değerler, oda sıcaklığındaki referans değerle karşılaştırıldığında sırasıyla %8.4, %14.5 ve %37.5 oranında azalma göstermektedir. Özellikle dikkat çeken bir diğer bulgu ise, sıcaklık maruziyet süresi iki katına çıkarıldığında, basma dayanımındaki azalmanın dört katından fazla olmasıdır. Bu durum, yalnızca sıcaklık seviyesinin değil, aynı zamanda maruziyet süresinin de betonun yüksek sıcaklık altındaki dayanımı üzerinde belirleyici bir rol oynadığını açıkça ortaya koymaktadır.

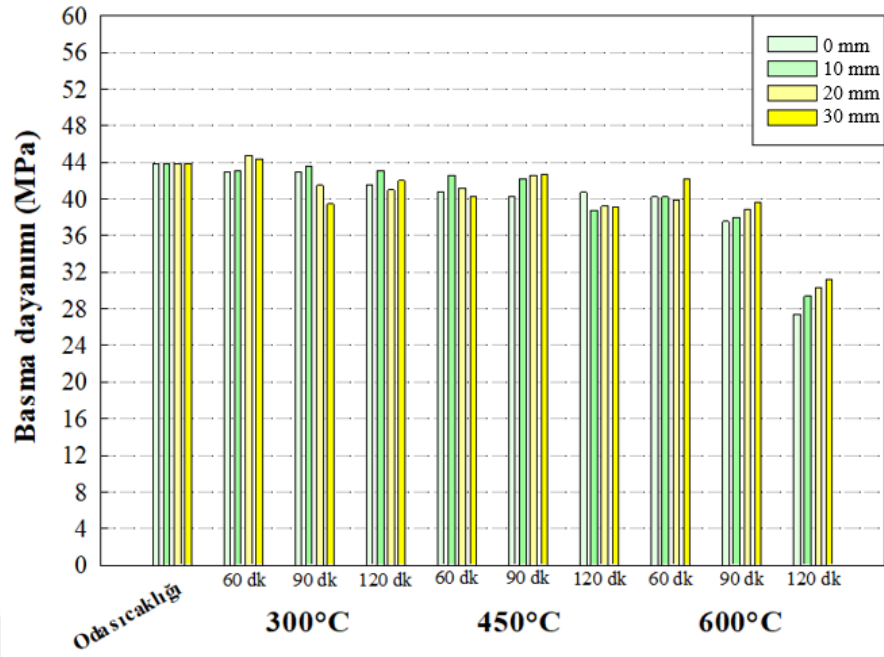


**Şekil 20.** UNP olan beton numunelerinden alınan verilerin grafiksel gösterimi

Şekil 21, sıva kalınlıkları 0, 10, 20 ve 30 mm olan numunelere ait basma dayanımı verilerini göstermektedir. Bu veriler, numunelerin oda sıcaklığı ve 300°C, 450°C ve 600°C sıcaklıklarında sırasıyla 60, 90 ve 120 dakika süreyle maruz bırakılmasının ardından elde edilmiştir. Grafikte yer alan her bir sütun grubu, ilgili sıva kalınlığına karşılık gelen basma dayanımı değerlerini göstermekte olup, y ekseninde değerler MPa cinsinden sunulmaktadır. Grafikte, oda sıcaklığına ait ilk sütun grubu dışında kalan her üçlü sütun bloğu aynı sıcaklık seviyesini temsil etmektedir. Bu doğrultuda, her sıcaklık seviyesindeki ilk sütun 60 dakikalık maruziyeti, ikinci sütun 90 dakikayı ve üçüncü sütun 120 dakikalık maruziyeti ifade etmektedir. Ayrıca, RP'li ve YYS'li numunelerin basma dayanımı ölçümleri yapılmadan önce, yüksek sıcaklığa maruz bırakılan numunelerin üzerindeki sıva tabakaları aynı gün içerisinde



sökülmüştür. Bu işlem, sıva kaplamalarının ısı etkilerinden sonra yapıyı nasıl koruduğunu değerlendirmek amacıyla yapılmıştır. Şekil 21'deki veriler, farklı sıcaklık ve süre koşulları altında sıva kalınlığının basma dayanımı üzerindeki etkilerini göstermektedir. Örneğin, 300°C sıcaklığa maruz bırakılan ve 0, 10, 20 ve 30 mm sıva kalınlığına sahip numunelerde elde edilen basma dayanımı değerleri, sıva kalınlığı ile lineer bir ilişki göstermemektedir. Bu nedenle bu sıcaklıkta elde edilen veriler, sıva kalınlığının etkisine dair kesin bir yorum yapılmasına olanak tanımamaktadır. Ancak 450°C sıcaklıkta 90 ve 120 dakikalık maruziyet sürelerine bakıldığında, YYS'nin beton basma dayanımındaki düşüşü önemli ölçüde sınırladığı görülmektedir. Özellikle 30 mm kalınlığında YYS uygulanan numunede, 450°C'de UNP betonla karşılaştırıldığında yaklaşık %7 oranında daha düşük bir dayanım kaybı meydana gelmiştir. Daha çarpıcı bir örnek, 600°C sıcaklıkta 120 dakika süreyle ısıya maruz bırakılan numunelerde gözlemlenmiştir. Bu koşullarda, UNP beton numunesinin basma dayanımı 27.44 MPa iken, 30 mm kalınlığında YYS'na sahip numunenin dayanımı 31.19 MPa olarak ölçülmüştür. Bu durum, aynı koşullarda yaklaşık %14 oranında bir iyileşmeye karşılık gelmektedir. Bu bulgu, yüksek sıcaklık altında uzun süre maruz kalan durumlarda YYS'nin betonun mekanik dayanımını korumada etkili olduğunu ortaya koymaktadır.



**Şekil 21.** Hem oda sıcaklığında hem de 300, 450 ve 600°C'lik yüksek sıcaklıklarda kaydedilen 0, 10, 20 ve 30 mm kalınlıktaki YYS'li numuneler için basma dayanım verilerinin gösterimi

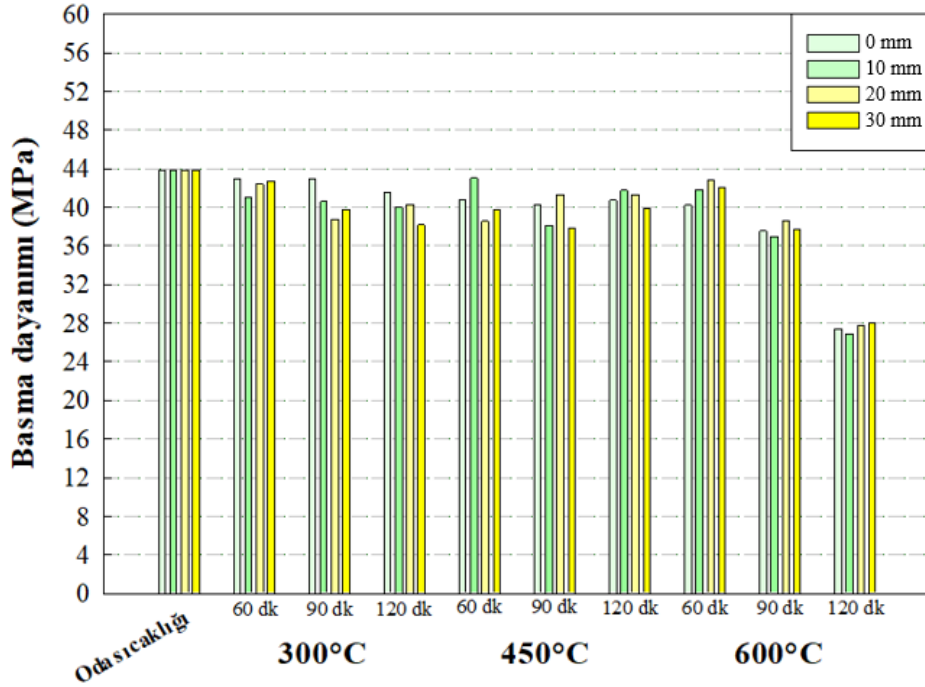
Şekil 22'de ise, UNP ve sıva uygulanmış beton numunelerin 450°C sıcaklıkta 60 dakika süreyle maruz bırakılması sonrasında oluşan fiziksel değişimler görsel olarak sunulmaktadır. Bu sıcaklıkta maruz bırakılan numunelerde renk değişimi açıkça gözlenmekte olup, sıva uygulanmış yüzeylerde ise hafif yüzey dökülmeleri meydana gelmiştir. Ancak dikkat çeken bir bulgu, RP ya da YYS uygulanmış numunelerde beklenen seviyede yüzey dökülmesi oluşmamış olmasıdır. Bu durum, özellikle yangın gibi beklenmedik yüksek sıcaklık durumlarında YYS'nin beton yüzeyini kapsamlı şekilde koruyabildiğini açıkça ortaya koymaktadır.



**Şekil 22.** 450°C sıcaklıkta 60 dakika boyunca test edilen sıvalı ve UNP numune grupları

Şekil 23, RP'li beton numunelere ait basma dayanımı değerlerini, 0, 10, 20 ve 30 mm sıva kalınlıklarında ve farklı sıcaklık koşullarında (oda sıcaklığı, 300°C, 450°C ve 600°C; 60, 90 ve 120 dakika sürelerle) sunmaktadır. Aynı zamanda, karşılaştırma amacıyla oda sıcaklığında muhafaza edilen beton numunelere ait ortalama basma dayanımı değerleri de grafikte yer almaktadır. Şekil 23 incelendiğinde, beton numunelerinin yüksek sıcaklıklara maruz kalması durumunda basma dayanımı değerlerinde belirgin bir düşüş eğilimi olduğu görülmektedir. Örneğin, oda sıcaklığında ölçülen ortalama basma dayanımı 43.895 MPa iken, 600°C sıcaklıkta 120 dakika süreyle maruz bırakılan numunenin dayanımı yaklaşık 28.045 MPa'ya düşmektedir. Aynı sıcaklıkta 60 ve 90 dakikalık maruziyet süreleri sonrasında ölçülen basma dayanımı değerleri ise sırasıyla 41.985 MPa ve 37.670 MPa olarak kaydedilmiştir. Oda sıcaklığındaki referans değere kıyasla bu değerler sırasıyla %4.35, %14.2 ve %36.1 oranında azalma göstermektedir. Bu verilerden yola çıkıldığında, özellikle 120 dakikalık maruziyet süresiyle birlikte sıcaklık etkisinin RP'li beton numunelerde yaklaşık sekiz kat daha belirgin olduğu söylenebilir. Şekil 23'te ayrıca, yüksek sıcaklıklara maruz bırakılan betonların basma dayanımı değerlerinin, oda sıcaklığındaki karşılıklarına oranları sunulmuştur. Bu oranlar, betonun yüksek sıcaklık altındaki dayanım kaybının görsel ve sayısal olarak değerlendirilmesine olanak sağlamaktadır. RP, beton yüzeyinin yüksek sıcaklığa doğrudan maruz kalmasını engelleyen bir koruyucu katman işlevi görmekte ve bu sayede betonun zarar görmesini azaltmaktadır. Özellikle 600°C sıcaklıkta 120 dakika süreyle maruz bırakılan beton numunelerde, RP'nin yaklaşık %2.2 oranında bir koruyucu etkisi olduğu

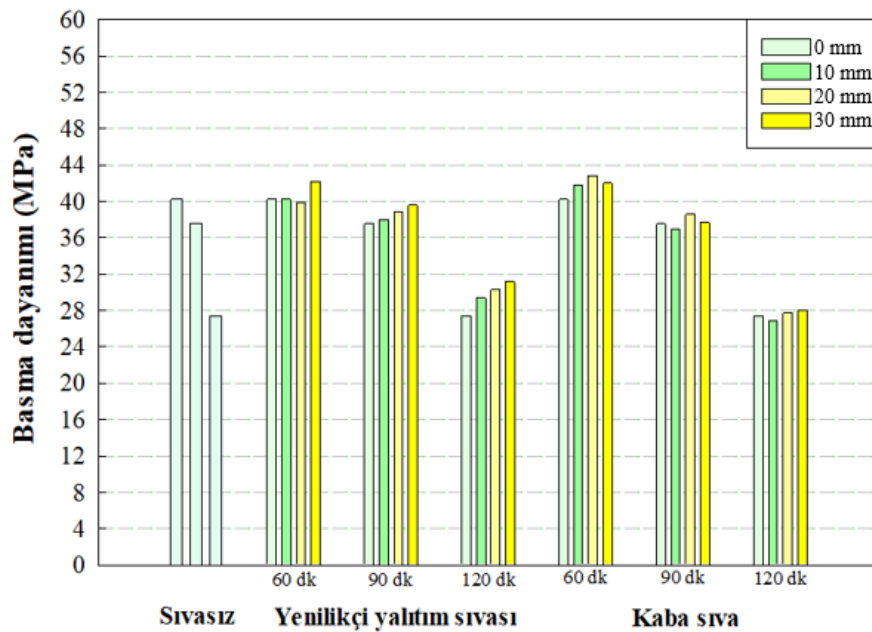
belirlenmiştir. Bu bulgu, RP'nin yüksek sıcaklık koşullarında betonun yapısal bütünlüğünü korumada kısmen etkili olduğunu ortaya koymaktadır.



**Şekil 23.** Oda sıcaklığında ve 300°C, 450°C ve 600°C'de UNP, 10, 20 ve 30 mm kalınlığındaki RP'li betonun basma dayanım verileri

Şekil 24, UNP beton numuneler ile RP ve YYS uygulanmış beton numunelere ait basma dayanımı sonuçlarını göstermektedir. Bu numuneler, deneysel çalışmada kullanılan en yüksek sıcaklık olan 600°C'ye sırasıyla 60, 90 ve 120 dakika süreyle maruz bırakılmıştır. Grafik, bu sıcaklık koşullarında elde edilen basma dayanımı değerlerini görsel olarak karşılaştırmalı biçimde sunarak, uygulanan sıva türlerinin koruyuculuğunu değerlendirme amacı taşımaktadır. Sıvalı numunelerde 10, 20 ve 30 mm kalınlıklar tercih edilmiş ve her kalınlık için birden fazla numune hazırlanmıştır. Grafik üzerinde sunulan değerler, her bir grup için elde edilen ölçümlerin ortalamasını temsil etmektedir. Grafikte görüldüğü üzere, yüksek sıcaklıklara maruziyet sonucunda beton iç yapısında meydana gelen bozulmalar, basma dayanımında belirgin bir azalmaya yol açmaktadır. Bu azalma hem sıcaklık seviyesine hem de maruziyet süresine doğrudan bağlı olarak artmaktadır. Bununla birlikte, grafikte sıva kalınlığının artırılmasıyla dayanım kayıplarının azaltılabildiği görülmektedir. Özellikle YYS

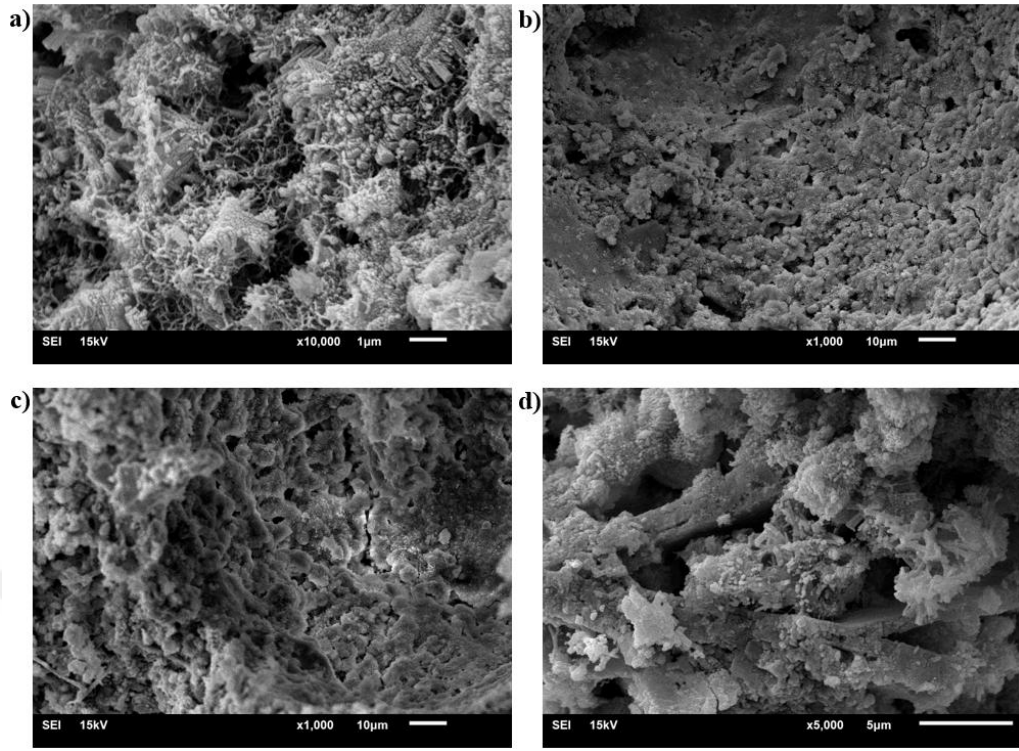
uygulamas, diğr sva türlerine kıyasla daha yüksek bir koruma etkisi sergilemektedir. Farklı sva türlerinin yüksek sıcaklık koşullarında beton dayanımı üzerindeki görece etkisini değrlendirmeye olanak tanımaktadır. Veriler, sva uygulanmış numunelerde, UNP numunelere göre daha az dayanım kaybı yaşandığını açıkça ortaya koymaktadır. Bu da yapı elemanlarına sva uygulamanın ani yüksek sıcaklık koşullarına karşı koruyucu bir önlem işlevi gördüğünü göstermektedir. Özellikle 120 dakika süreyle 600°C'ye maruz bırakılan numunelerde bu koruyucu etki daha belirgin hâle gelmiştir. RP'li beton numunelerin UNP numunelere kıyasla basma dayanımı oranlarında %2'nin üzerinde bir iyileşme sağladığı gözlemlenmiştir. Aynı koşullarda YYS'li numunelerde bu oran %6'ya ulaşırken, sva kalınlığının 30 mm'ye çıkarıldığı durumlarda bu oran %14'ün üzerine çıkmaktadır. Ayrıca, YYS'li beton numunelerin basma dayanımı kaybı, UNP modellere kıyasla %7 daha düşük gerçekleşmiş olup, bu durum RP'li beton numunelere göre %5'lik ek bir avantaj sağlamaktadır. Bu sonuçlar, YYS'nin yüksek sıcaklıklara karşı betonun mekanik dayanımını korumada etkili bir çözüm sunduğunu ve sva kalınlığının artırılmasının bu koruyucu etkiyi daha da güçlendirdiğini göstermektedir.



**Şekil 24.** UNP, YYS'li ve RP'li numunelerinin farklı süreler boyunca 600°C'ye maruz bırakılmasıyla oluşan basma dayanım verilerinin grafiğı

### 3.2.1. SEM Analizi

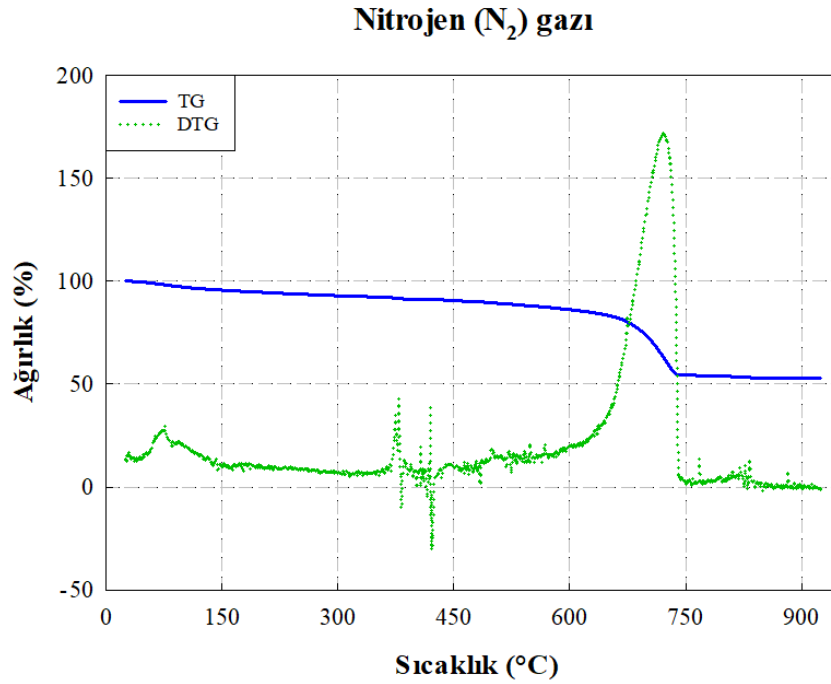
Şekil 25a'da yer alan mikroskobik görüntü, örneğin iç yapısını 10.000 kat büyütülmüş hâliyle göstermektedir. Bu görüntü, perlit ve su etkileşimi sonucunda meydana gelen ürünün, özellikle kireç reaksiyonu ile oluşan yapıların iç düzenini yansıtmaktadır. Görüntüde iğne benzeri yapılar dikkat çekmekte olup, bu yapıların iç düzenleri farklı açılardan görsel olarak sunulmuştur. Bu mikroyapısal gözlem ile söz konusu yapıların bütünlüğü görsel olarak kanıtlanmak istenmiştir. Şekil 25b'de 300°C'ye maruz bırakılan numuneye ait mikroskobik görüntü yer almakta olup, genleşmiş perlitin belirli bölgelerinde küçük çatlakların oluşmaya başladığı gözlemlenmektedir. Şekil 25c'de ise sıcaklık 450°C'ye yükseldiğinde, söz konusu çatlakların belirgin şekilde genişlediği ve daha belirgin hâle geldiği görülmektedir. Şekil 25d, 600°C'ye maruz bırakılan örneğin iç yapısını, Şekil 25c'ye göre beş kat daha yakından göstermektedir. Bu yüksek büyütmede, reaksiyon sonucu oluşmuş bağların büyük ölçüde bozulduğu ve yapının iç kısımlarında çok sayıda çatlağın olduğu açıkça görülmektedir. Daha da yakından incelendiğinde, bu çatlaklara gövde yapısında küçük ölçekli kırıkların eşlik ettiği kolaylıkla fark edilmektedir. Ayrıca, 600°C sıcaklıkta gözlemlenen çatlaklardaki artışın, yapıda gerçekleşen CO<sub>2</sub> salınımından kaynaklandığı ve bunun sonucunda iç yapıdaki bağların koparak bütünlüğün bozulduğu yorumlanabilir. Bu durum, iç yapıdaki bağların zayıflamasıyla birlikte hem mikroskobik düzeyde mekanik çatlakların oluşmasına hem de makroskobik düzeyde malzemenin dayanım ve yapısal hassasiyetinde azalmaya yol açmaktadır.



**Şekil 25. a)** Numunenin normal oda sıcaklığındaki mikroskop SEM görüntüsü, **b)** 300°C, **c)** 450°C, **d)** 600°C

### 3.2.2. Termogravimetrik Analiz

Deneysel çalışma kapsamında, numuneden alınan bir parça Termogravimetrik Analiz (TGA) işlemine tabi tutulmuştur. Bu analiz sonucunda elde edilen veriler Şekil 26'da sunulmaktadır. Analiz sonuçları, sıcaklık 100°C'ye ulaştığında numune içerisindeki nemin buharlaşmaya başladığını göstermektedir. Bu ilk kütle kaybı, serbest suyun uzaklaşmasından kaynaklanmaktadır. Sıcaklığın artmasıyla birlikte numunede bulunan polimer lifin kademeli olarak ayrışmaya başladığı ve bu sürecin yaklaşık 650°C'ye kadar devam ettiği gözlemlenmiştir. Bu durum, organik liflerin sıcaklık karşısındaki termal kararsızlığını ortaya koymaktadır. 680-740°C sıcaklık aralığında ise, numune içerisinde yer alan kalsit ( $\text{CaCO}_3$ ) yapısından karbondioksit ( $\text{CO}_2$ ) salınımı gerçekleşmektedir. Bu süreçte, kalsitin bozunmasıyla birlikte  $\text{CaCO}_3$  yapısı çözülerek kireç ( $\text{CaO}$ ) formuna dönüşmektedir. Bu kimyasal dönüşüm hem kütle kaybı hem de numunenin yapısal özelliklerinde önemli değişimlere yol açmaktadır. Bu sıcaklık aralıkları ve ilgili yorumlar, Şekil 26'da sunulan termal analiz verilerine dayalı olarak değerlendirilmiştir.



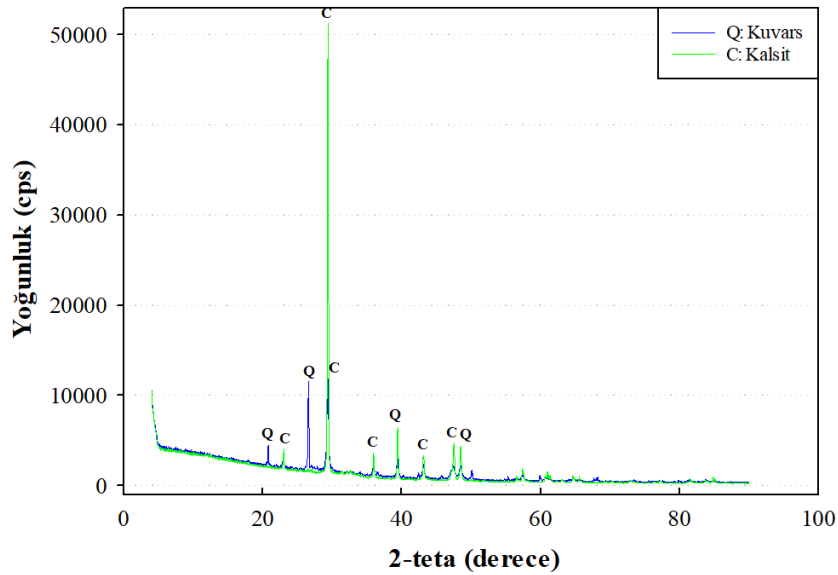
**Şekil 26.** Deneyde kullanılan numunenin TGA

### 3.2.3. X-ışını Kırınımı Testi

Bu çalışmada, sıva harçlarının sıcaklık etkisi altındaki mineralojik değişimini incelemek amacıyla X-ışını kırınım (XRD) analizi yöntemi kullanılmıştır. Analiz hem ısı uygulamasından önce hem de sonrasında elde edilen toz numuneler üzerinde gerçekleştirilmiştir. Ölçümler, Cu-K $\beta$  dalga boyuna sahip PW1830 model cihaz ile 4°-90° (2 $\theta$ ) tarama aralığında gerçekleştirilmiştir. Elde edilen XRD desenleri Şekil 27’de sunulmakta olup, elde edilen kırınım verilerinin yorumlanmasında QualX programı kullanılarak mineralojik faz tanımlamaları yapılmıştır. Analizlerde, ısı uygulanmadan önce elde edilen toz sıva harcı numuneleri "1" olarak, yüksek sıcaklığa maruz bırakıldıktan sonra elde edilen numuneler ise "2" olarak adlandırılmıştır. Isı öncesi numunelerin baskın kristal fazlarının, özellikle belirgin pik değerleriyle tanımlanan Kuvars (40.23°, 45.73°, 50.08°, 54.80°, 63.96°, 73.40°) ve Kalsit (31.43°, 39.40°, 47.11°, 57.39°, 65.61°, 83.76°) mineralleri olduğu belirlenmiştir. Bu fazlar, yapının yüksek kristalin karaktere sahip olduğunu ve amorf içeriğin oldukça düşük düzeyde kaldığını göstermektedir. Isıl işleme tabi tutulmuş numunelere ait XRD sonuçları incelendiğinde, Kuvars piklerinin kaybolduğu, Kalsit’e ait bazı pik değerlerinde ise yer değişimi ve zayıflama olduğu gözlemlenmiştir (örneğin 29.35°, 35.89°, 47.13°,



57.49°, 61.36°). Bu değişimler, yapının kristalin düzeninin bozulduğunu ve daha düzensiz, amorf bir yapıya dönüştüğünü göstermektedir. Kristalin yapıdaki bu çözülme, sıva harçlarının içyapısında oluşan termal bozulmanın bir göstergesi olup, aynı zamanda malzemenin mekanik dayanımı üzerinde de olumsuz etkiler yaratmaktadır. Sıcaklık etkisiyle birlikte, özellikle jel faz oluşumuna katılan minerallerin yapısında meydana gelen düzensizlikler, bağ yapılarının zayıflamasına ve iç yapıda mikro çatlakların gelişmesine neden olmaktadır. Ayrıca, ısıtılma işlem sonrası elde edilen XRD desenlerinde pik derinliklerinin ve genişliklerinin azalması, kristalin yapıdan amorf yapıya geçişin daha net bir göstergesi olarak yorumlanabilir. Bu dönüşüm, sıva harcının termal kararlılığına ve uzun süreli dayanım performansına ilişkin önemli ipuçları sunmaktadır.



**Şekil 27.** Kuvars ve kalsitten oluşan bir numunenin X-ışını kırınımı (XRD) analizinden elde edilen grafiksel gösterimi

#### 3.2.4. Regresyon Analizi

Bu çalışmada, elde mevcut deneysel veriler üzerinden yapılan uygulamalı deneylerin ardından regresyon analizi uygulanmış ve bu sayede doğrudan incelenmeyen ancak aşırı koşullar altında sistemin veya malzemenin davranışına dair tahminlerde bulunulmuştur. Bu tahminler, çalışmanın başlangıç aşamasında tanımlanan ve analiz edilen değişkenler kullanılarak yapılmıştır. Regresyon analizinde

SigmaPlot 15.0 yazılımı kullanılmış olup, özellikle yangına karşı dayanım değerlendirmelerinde 20 mm kalınlığındaki YYS'nin yeterli olabileceği öngörülmektedir. Regresyon analizinin ilk adımı, elde edilen veri grafiğine en uygun eğriyi temsil eden ve en yüksek doğrulukla tahmin yapabilen matematiksel denklemin belirlenmesidir. Bu çalışmada, Logaritmik - 2. dereceden (Log-2. Derece) denklem tipi en uygun eğri olarak belirlenmiştir. Uygunluk derecesi, genellikle determinasyon katsayısı ( $R^2$ ) ile değerlendirilir.  $R^2$  değeri 0 ile 1 arasında değişmekte olup, 1'e yaklaştıkça eğri, veriye o ölçüde daha iyi uymaktadır. Bu analizde elde edilen  $R^2 = 0.996$  değeri, modelin veri setine neredeyse kusursuz bir şekilde uyum sağladığını göstermektedir.

Çalışmanın birinci hedefi, 20 mm kalınlığında YYS ile kaplanmış beton numunenin, 120 dakika boyunca maruz kaldığı sıcaklık koşullarında basma dayanımının 10 MPa'ya düştüğü sıcaklık değerini tahmin etmektir. SigmaPlot'ta yapılan eğri uydurma işlemi sonucunda elde edilen denklemler aşağıdaki gibidir.

Denklem 9 (genel yapı):

$$F_{BD} = y_0 + a \times \ln T + b \times (\ln T)^2 \quad (9)$$

Sabitler:

$$y_0 = -1280.7273, a = 452.1129, b = -38.6388 \quad (10)$$

Denklem sadeleştirildikten sonra şu hale gelir:

$$F_{BD} = -1280.7273 + 452.1129 \times \ln T - 38.6388 \times (\ln T)^2 \quad (11)$$

Bu denklemde,  $F_{BD} = 10$  olarak alındığında yapılan ara hesaplamalar sonucunda tahmini sıcaklık değeri yaklaşık 861°C olarak belirlenmiştir.

Çalışmanın ikinci hedefi, 600°C sıcaklıktaki bir ortamda, basma dayanımının 10 MPa'ya düşmesi için gereken sürenin hesaplanmasıdır. Aynı denklem yapısı kullanılarak yeni sabitler elde edilmiştir.

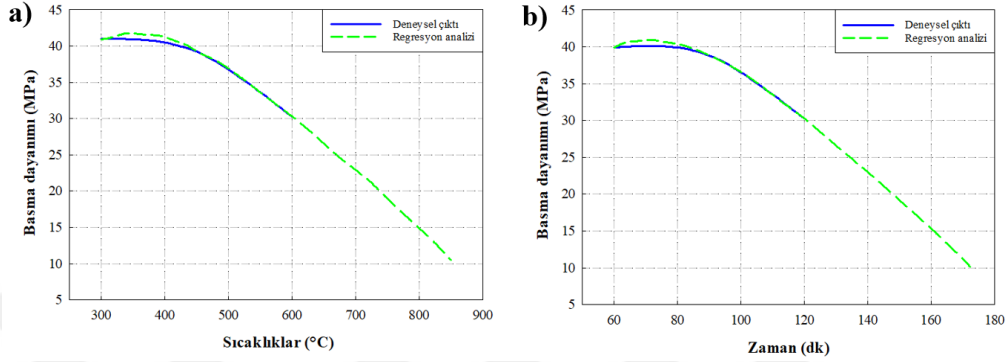
Sabitler:

$$y_0 = -673.3159, a = 335.0395, b = -39.2845 \quad (12)$$

$$F_{BD} = -673.3159 + 335.0395 \times \ln t_{tah} - 39.2845 \times (\ln t_{tah})^2 \quad (13)$$

Bu denklemde  $F_{BD} = 10$  olarak alınıp çözüldüğünde, beton numunesinin dayanımının 10 MPa'ya düşmesi için geçen sürenin yaklaşık 173 dakika olduğu

öngörülmektedir. Bu tahminlere ait grafiksel gösterimler, Şekil 28a ve Şekil 28b’de sunulmakta olup; sırasıyla sıcaklığa bağlı dayanım düşüşü ve zamana bağlı dayanım kaybı eğrilerini yansıtmaktadır. Bu grafikler sayesinde, belirli bir basma dayanım seviyesinin ne zaman ve hangi sıcaklıkta oluşacağı öngörülebilir hale gelmiştir.

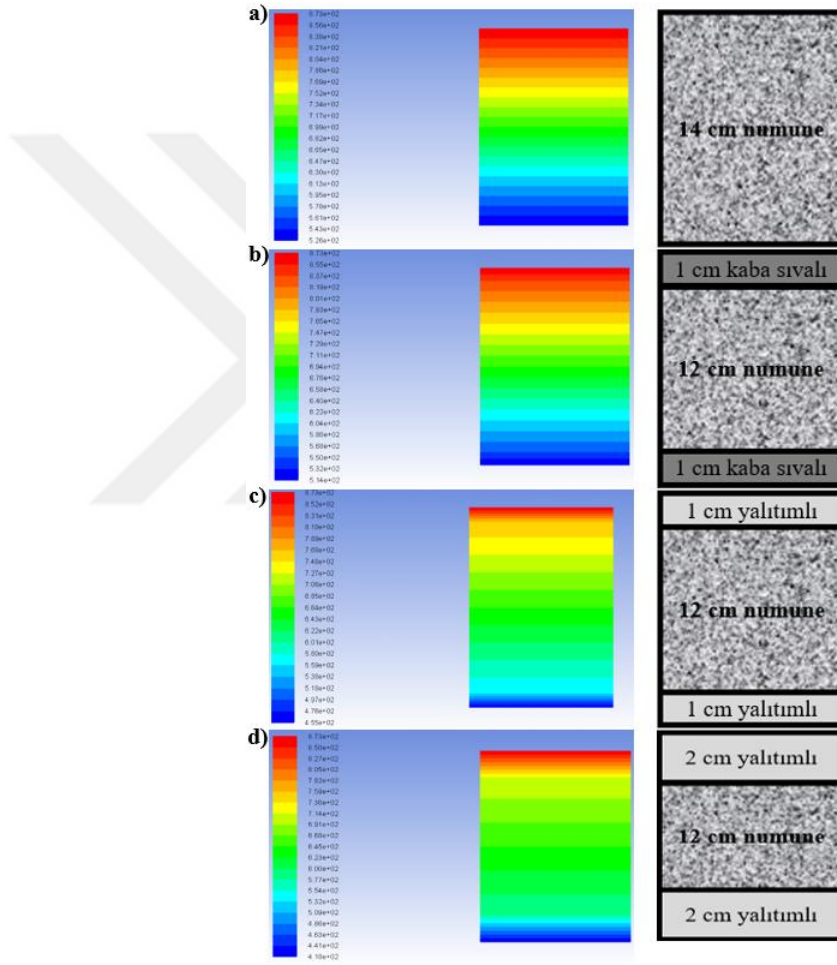


**Şekil 28.** a) Deneysel test verileri ve regresyon analizi sonuçlarına dayalı olarak sıcaklık ile basma dayanımı arasındaki ilişkiyi gösteren grafik, b) Deneysel test verileri ve regresyon analizi sonuçlarına dayalı olarak zaman ile basma dayanımı arasındaki ilişkiyi gösteren grafik

### 3.2.5. Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği Analizi

Bu çalışmada, deneysel bulguların daha iyi anlaşılabilmesi ve uygulanan YYS’nin performansının görsel ve sayısal olarak desteklenebilmesi amacıyla hesaplamalı akışkanlar dinamiği temelli bir analiz gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda ilk aşamada, deneysel çalışmalarda kullanılan örnek boyutları esas alınarak, UNP beton, RP’li beton (10 mm kalınlıkta), YYS’li beton (10 mm kalınlıkta) ve çift kat YYS’li beton (20 mm kalınlıkta) olmak üzere dört farklı yapı elemanı için üç boyutlu geometrik modeller oluşturulmuştur. Her bir yapı elemanı için oluşturulan modellerde varsayılan ağ yapısı kullanılmış ve tüm kenar yüzeyler, üst ve alt yüzeyler dahil olmak üzere, tamamen yalıtılmış olarak tanımlanmıştır. Üst yüzey sıcak yüzey, alt yüzey ise soğuk yüzey olarak belirlenmiş ve ısı geçişi yalnızca düşey yönde olacak şekilde sınır koşulları uygulanmıştır. Isıl yükleme ve akışkan tanımları tamamlandıktan sonra, analiz çalışması gerçekleştirilmiştir. Analiz sonuçlarına göre, YYS uygulanan modellerde, sıcak yüzey bölgesinde ısının belirli bir alanda toplandığı ve iç bölgelere doğru ilerlemesinin sınırlı olduğu görülmüştür. Bu durum, söz konusu sıvanın ısıya karşı önemli bir direnç oluşturduğunu göstermektedir. Şekil 29’da sunulan analiz

görselleri incelendiğinde hem UNP hem de RP'li örneklerle karşılaştırıldığında, YYS'nin uygulandığı örneklerde sıcaklık dağılımının daha sınırlı olduğu ve iç bölgelere daha az yayıldığı açıkça görülmektedir. Özellikle 20 mm kalınlıkta YYS uygulanan modelde, sıcaklığın yapı elemanı içerisine ilerleme derinliği belirgin şekilde azaltılmıştır. Bu bulgu, yenilikçi sıva malzemesinin yüksek sıcaklık altında yapı elemanlarını koruma potansiyelini ortaya koymakta; yangın gibi aşırı ısıya maruz kalma durumlarında yapı güvenliğini artırabileceğini göstermektedir.

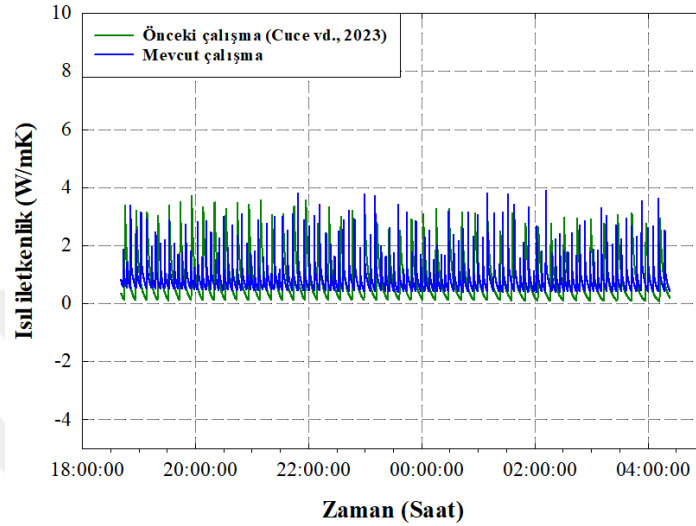


**Şekil 29.** a) Yüksek sıcaklıklarda UNP, b) 10-10 RP'li, c) 10-10 YYS'li, d) 20-20 YYS'li briketlerin ısııl performansının değerlendirilmesi

### 3.3. Bambu Lifleri İçeren Briketlerin Termal Performansı

Deney, çalışmanın temel odak noktalarından biri olan döküm yöntemi ile birlikte coheating test yönteminin doğruluğunu kanıtlamak amacıyla, bambu lifi ikamesi yapılmamış geleneksel briketler kullanılarak başlatılmıştır. Elde edilen

verilere göre, önceki çalışmamızda (Cuce vd., 2023) elde edilen klasik briketlerin k-değeri ile oldukça yakın bir sonuç elde edilmiştir. Bu doğrultuda, döküm yöntemiyle üretilen numunenin üretim sürecinin doğru şekilde uygulandığı sonucuna varılmıştır. İlgili verileri gösteren grafik Şekil 30'da açık bir biçimde sunulmuştur.



**Şekil 30.** Önceki ve mevcut çalışmalara ait k-değerinin karşılaştırılması

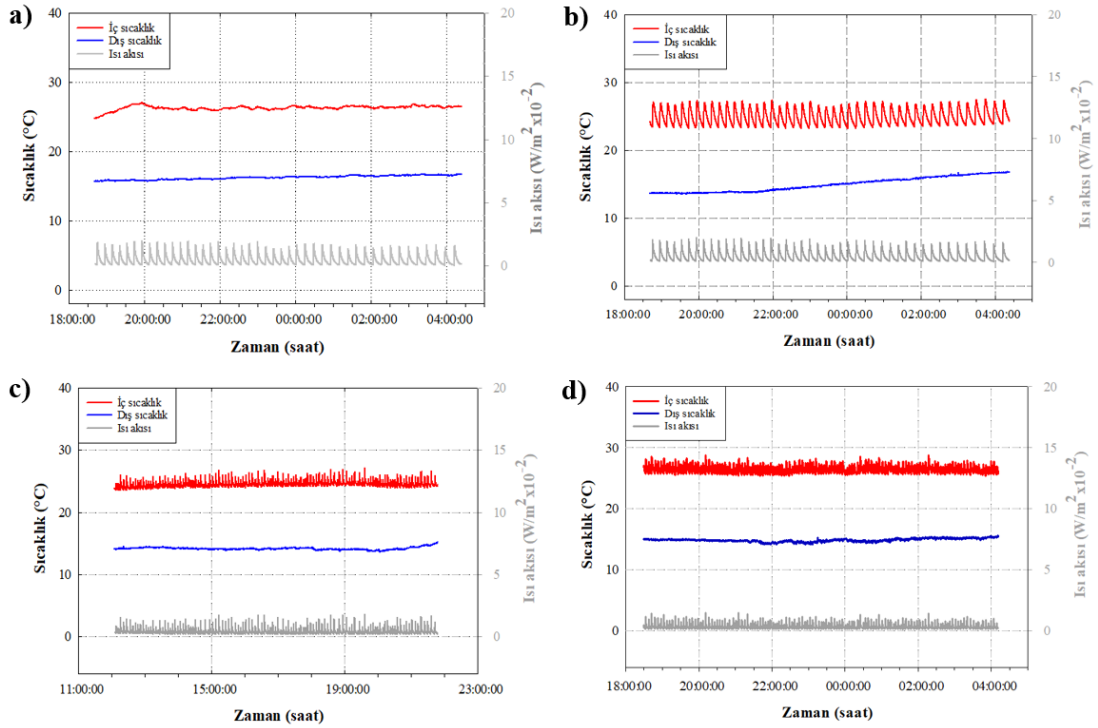
Bu çalışmada benimsenen coheating test yöntemi doğrultusunda hesaplanan veriler, sırasıyla dört farklı numune için geleneksel briket, %2 bambu takviyeli briket, %4 bambu ikame edilmiş briket ve son olarak %6 oranında bambu katkılı briket örneği için en düşükten en yüksek değere doğru sunulacaktır. Bu sıralamayı takiben, her bir örnek için ortalama değerler verilecek ve ardından grafiksel olarak ifade edilecektir. Değerlendirme kapsamında üç temel parametre dikkate alınacaktır: iç ortam sıcaklığı, dış ortam sıcaklığı ve ısı akısı. Bu üç parametre temel alınarak toplam U-değeri belirlenecek ve böylece yüksek k-değerine sahip bambu katkılı briketlerin ısıl performansı ortaya konulacaktır.

İlk olarak, geleneksel briketlerden elde edilen verilere göre, iç ortam sıcaklığı en düşük 25.701°C ile en yüksek 27.507°C arasında değişmekte olup ortalama değer 26.28864°C olarak hesaplanmıştır. Dış ortam sıcaklığı ise minimum 15.657°C, maksimum 16.685°C arasında değişmekte ve ortalama sıcaklık değeri 16.22224°C olarak kaydedilmiştir. Bu değerler, temel kıyaslama noktası olması açısından önemlidir ve bambu katkısının etkilerini analiz etmeden önce referans teşkil

etmektedir. Çalışmanın doğruluğu ve test yönteminin güvenilirliği teyit edildikten sonra, ısı yalıtım performansını artırmaya yönelik olarak bambu lifi ikamesi yapılan briketler üzerinde ek testler gerçekleştirilmiştir. Buna göre, %2 oranında bambu lifi içeren briketlerde iç ortam sıcaklığı 23.197164°C ile 27.533738°C arasında değişmekte olup ortalama sıcaklık 24.93186°C'dir. Dış ortam sıcaklığı ise minimum 13.65911°C ile maksimum 16.76755°C arasında değişmekte ve ortalama 14.92728°C olarak ölçülmüştür. Bu durum, bambu lifi ilavesinin iç sıcaklık seviyelerinde bir miktar düşüşe neden olduğunu, dış koşulların etkisine karşı ısı dengeinin değiştiğini göstermektedir. Sıcaklık değerlerinin ötesinde, ısı akısı değerleri de analiz edilmiştir. Ölçülen minimum ve maksimum ısı akısı değerleri sırasıyla 0.0323066507 ve 2.02252074  $W/m^2 \times 10^{-2}$  olarak belirlenmiş olup, ortalama ısı akısı 0.469965677  $W/m^2 \times 10^{-2}$  olarak hesaplanmıştır. Bu artış, bambu lifi ilavesinin malzemenin ısı transfer davranışını belirgin şekilde etkilediğini göstermektedir.

Bu test sonuçlarının ardından, benzer bir metodolojiyle %4 bambu lifi takviyesi yapılmış başka bir test numunesinin ısı performansını değerlendirmek üzere gerekli parametreler bilgisayar ortamına işlenmiştir. Buna göre, iç ortam sıcaklığı 23.52354°C ile 27.14302°C arasında değişmekte olup ortalama sıcaklık 23.98069°C'dir. Dış ortam sıcaklıkları ise minimum 14.17605°C, maksimum 15.17617°C arasında seyretmekte ve ortalama 14.18594°C olarak ölçülmüştür. Ayrıca, bu örneğe ait ısı akısı değerleri; en düşük 0.181135927  $W/m^2 \times 10^{-2}$ , en yüksek 1.82234727  $W/m^2 \times 10^{-2}$  olup ortalama 0.385538769  $W/m^2 \times 10^{-2}$  olarak hesaplanmıştır. Bu durumda, %4 oranında bambu katkısının, %2 katkıya kıyasla daha düşük ısı akısı değerleri sergilediği ve bu nedenle daha olumlu bir yalıtım performansı sunduğu gözlemlenmiştir. Son olarak, %6 oranında bambu ikamesi yapılan briket numunesinden elde edilen test sonuçlarına göre; iç ortam sıcaklığı 25.37536°C ile 28.77421°C arasında değişmekte olup ortalama 26.4726°C olarak belirlenmiştir. Buna karşılık dış ortam sıcaklığı 14.15306°C ile 15.62938°C arasında değişmekte olup ortalama değer 14.88522°C'dir. En önemlisi, bu örnekten elde edilen ısı akısı değerleri 0.141029997  $W/m^2 \times 10^{-2}$  ile 1.50724169  $W/m^2 \times 10^{-2}$  arasında değişmekte olup ortalama 0.321250928  $W/m^2 \times 10^{-2}$  olarak hesaplanmıştır. Bu sonuçlar, %6 bambu katkısının ısı akısını daha da azaltarak en yüksek yalıtım performansını sunduğunu göstermektedir. Ancak iç ortam sıcaklık değerlerinin tekrar yükselmesi,

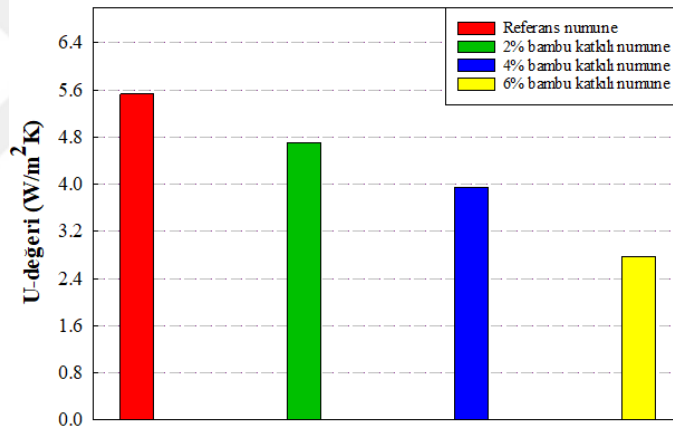
katkı oranının belli bir düzeyin üzerine çıkmasının farklı etkiler yaratabileceğine işaret etmektedir. Genel olarak, bu bulgular Şekil 31’de kapsamlı bir grafiksel sunum ile detaylandırılmıştır. Grafikler üzerinden hem sıcaklık dağılımları hem de ısı akısı değişimleri görsel olarak izlenebilir hale getirilmiş, böylece elde edilen verilerin karşılaştırmalı analizi kolaylaştırılmıştır.



**Şekil 31. a) Geleneksel, b) %2, c) %4 ve d) %6 oranında bambu katkılı briketlere ait iç-dış sıcaklıklar ve ısı akısı verilerinin karşılaştırılması**

Bambunun U-değeri gibi teknik ayrıntılarına girilmeksizin dahi, sahip olduğu ısı yalıtım özellikleri kolaylıkla fark edilebilmektedir. Örneğin, %6 oranında bambu katkısı ile üretilen briketlerde, ısı direncin kayda değer şekilde arttığı yapılan analizlerle ortaya konmuştur. Özellikle, %4 oranında bambu katkısı yapılan numunelerle karşılaştırıldığında %6 katkılı örnekte yaklaşık %17 oranında bir direnç artışı gözlemlenmiştir. Aynı şekilde, %2 bambu katkısı yapılan numuneye göre bu artış yaklaşık %33 düzeyine ulaşmaktadır. Bu veriler, bambu oranının artışıyla birlikte ısı performansın anlamlı şekilde iyileştiğini ve katkı oranının briketin yalıtım kapasitesine doğrudan etki ettiğini açıkça göstermektedir. U-değeri hesaplaması, coheating test yöntemi kapsamında planlandığı şekilde, elde edilen verilerin bütüncül

değerlendirilmesi ile gerçekleştirilmiştir. Buna göre, hesaplama yöntemi oldukça basittir: ısı akısının, iç ve dış ortam sıcaklık farkına bölünmesiyle U-değeri elde edilir. Bu hesaplama ile hem çalışmanın temel hedefi gerçekleştirilmiş hem de kullanılan coheating test yönteminin geçerliliği sağlanmıştır. Yukarıda tanımlanan sıraya göre geleneksel briketin U-değeri maksimum 13.75 W/m<sup>2</sup>K, minimum 1.17 W/m<sup>2</sup>K ve ortalama 5.53 W/m<sup>2</sup>K olarak belirlenmiştir. %2 bambu katkılı brikette bu değerler sırasıyla 31.456313 W/m<sup>2</sup>K, 0.232847 W/m<sup>2</sup>K ve 4.698 W/m<sup>2</sup>K; %4 bambu katkılı brikette 19.495579 W/m<sup>2</sup>K, 1.5136478 W/m<sup>2</sup>K ve 3.94 W/m<sup>2</sup>K; %6 katkılı brikette ise 10.308637 W/m<sup>2</sup>K, 1.4470587 W/m<sup>2</sup>K ve 2.77 W/m<sup>2</sup>K olarak hesaplanmıştır. Bu örneklerle ait ortalama değerler Şekil 32’de grafiksel olarak da sunulmuştur. Söz konusu grafik, bambu kullanımının gelecekteki sürdürülebilir ve düşük/karbon nötr bina uygulamaları için potansiyelini kanıtlayıcı niteliktedir.



**Şekil 32.** Bambu lifi kullanımıyla briketlerin ısı yalıtım performansında sağlanan gelişmeler

U-değerinde gözlemlenen gelişmeler hem önceki veriler ışığında hem de Şekil 32’de detaylı biçimde incelendiğinde, bu çalışma önemli bir sonucu ortaya koymaktadır: bambu, sürdürülebilir doğal kaynakların önde gelen bir örneği olarak, genellikle sınırlı yalıtım özelliğine sahip olan briketlerin ısı direncini anlamlı ölçüde artırmaktadır. Gözle görülür iyileşme, katkı oranı arttıkça belirginleşmektedir. Elde edilen ampirik verilere göre, %6 oranında bambu katkılı briketlerde, %2 katkılı örneklerle kıyasla yaklaşık %41 oranında direnç artışı gözlenmiştir. Katkı oranının %4’e çıkarılması ile birlikte %6 katkılı örnek arasında ise %30’luk bir fark oluşmuştur.



Bu durum, katkı oranındaki görece küçük artışların dahi ısı performansına önemli katkılar sağlayabileceğini ortaya koymaktadır. Ayrıca, geleneksel briket ile %6 bambu katkılı briket arasındaki karşılaştırmada %49.9 gibi oldukça yüksek bir artış oranı kaydedilmiştir. Bu sonuç, sürdürülebilir yalıtım uygulamalarında bambu katkısının devrim niteliğinde bir dönüşüm potansiyeline sahip olduğunu göstermektedir. Dahası, önceki çalışmada (Cuce vd., 2023) incelenen YYS'nin  $2.86 \text{ W/m}^2\text{K}$ 'lik U-değeri ile karşılaştırıldığında %6 bambu katkılı briketin  $2.77 \text{ W/m}^2\text{K}$  değerine sahip olması, yaklaşık %3 oranında bir iyileşmeye işaret etmektedir. Bu fark küçük gibi görünse de doğal bir malzemeden elde edilmiş olması, çevresel sürdürülebilirlik açısından önemli bir kazanımdır. Buna ek olarak, Charai vd. (2021) tarafından yapılan bir çalışmada %6 oranında kenevir lifi kullanılarak yaklaşık %31 oranında bir ısı performans artışı sağlandığı bildirilmiştir. Bu da benzer oranlarda doğal lif katkısının etkinliğini desteklemekte ve bu çalışmanın bulgularını doğrular niteliktedir. Ayrıca, U-değeri tayininde kullanılan coheating test yönteminin etkinliği de bu çalışmayla bir kez daha kanıtlanmıştır. Bu yöntem daha önce çeşitli çalışmalarda pencere sistemlerine (Cuce, 2017; Cuce, 2018; Cuce vd., 2016b; Cuce ve Riffat, 2015a; Cuce ve Riffat, 2015b; Moretti vd., 2017) dış duvar uygulamalarına (Cuce ve Cuce, 2016; Cuce vd., 2014a) başarıyla uygulanmış ve üretici performans raporları ile gerçek zamanlı izleme verileriyle yüksek uyum göstermiştir. Ancak, coheating test yöntemine ilişkin en önemli kısıt, kullanılan sensör sayısı ve ölçüm sisteminin genel hassasiyetidir. Bu bağlamda, mevcut çalışmada, yüksek hassasiyetli Hukseflux firmasına ait HFP01 ısı akı plakaları ile standart T-tip termokupllar kullanılarak bambu katkılı briketlerin U-değeri analizi gerçekleştirilmiştir. Bu cihaz kombinasyonu, ölçümlerin doğruluğunu artırmış ve güvenilirliğini desteklemiştir.

## 4. SONUÇLAR

Bu tez çalışması kapsamında gerçekleştirilen altı özgün araştırma ile sürdürülebilir dış cephe teknolojilerine dair çok yönlü değerlendirmeler yapılmış; yapı kabuğunun enerji verimliliği, yangın dayanımı, çevresel sürdürülebilirliği ve mekanik direnci açısından önemli bulgular elde edilmiştir. Aşağıda, bu bulgular tematik başlıklar altında özetlenmektedir.

### 4.1. TSYM'nin Uygulama Potansiyeli

Tezin bu çalışması kapsamında, aerojeller ve VIP gibi TSYM'lerinin iç ve dış cephe yalıtımındaki avantajları ve sınırlılıkları değerlendirilmiştir. Özellikle bu malzemelerin yüksek ısı direnç değerleri ve ince kesitli kullanıma imkân tanımları sayesinde yapı kabuğunda önemli enerji tasarrufu sağladıkları görülmüştür. Ancak, bu sistemlerin bilinçli kullanımı gerekmekte olup; ısı köprüsü oluşumu ve yüksek maliyet gibi bazı yapısal sınırlamalar dikkate alınmalıdır. Elde edilen temel bulgular aşağıda özetlenmiştir:

- Aerojel esaslı battaniyeler, yüksek termal performansları ve ince kesitli uygulanabilirlikleri sayesinde iç cephe uygulamaları için uygun bir seçenek oluşturmaktadır.
- İç cephe yalıtım uygulamaları, iç mekân alanında daralma yarattığı için kullanım açısından sınırlı kalmakta; buna karşın dış cephe yalıtımı bu sorunu ortadan kaldırmaktadır.
- Aerojel malzemesi, yapılardaki ısı köprülerinin azaltılmasında etkili bir çözüm sunmaktadır.
- VIP'ler ile genişletilmiş polistiren esaslı malzemelerin birlikte kullanımı, dış duvarlardaki ısı köprülerinin oluşumunu engellemeye katkı sağlamaktadır.
- Sadece 20 mm kalınlığında AB kullanımı, dış duvarlardan olan ısı kaybını %90'a kadar azaltabilmektedir.
- 2022 yılı itibarıyla, silika aerogel temelli ürünlerin yıllık pazar hacmi yaklaşık 1,04 milyar USD seviyesinde olup, VIP teknolojisinin 2027

yılı itibarıyla 10 milyar USD’i aşması beklenmektedir (Ahmad vd., 2023; Simoes vd., 2021).

#### 4.2. BIM ve Enerji Verimliliği İlişkisi

Sayısallaşmanın yapı sektöründe enerji verimliliğine katkısı, özellikle güçlendirme projelerde BIM temelli uygulamalarla incelenmiştir:

- BIM araçları, enerji tasarrufu sağlamanın yanı sıra karbon salımını azaltma, iç mekân kalitesini artırma ve sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşma açısından fayda sağlamaktadır.
- Güçlendirme uygulamalarında veri formatı standardizasyonu ve yazılım uyumluluğu gibi konular, BIM’in etkin kullanımı için kritik görülmektedir.
- BIM’in potansiyelinden tam olarak yararlanılabilmesi için yöntemlerin optimize edilmesi ve yenilenebilir enerji sistemleriyle entegrasyonu önerilmektedir.

#### 4.3. YYS’nin Isıl Performansı

Bu çalışma kapsamında, farklı kalınlıklarda uygulanan YYS’nin, briket yapı elemanlarının ısı performansı üzerindeki etkisi deneysel olarak değerlendirilmiştir. Çalışmada, sıcaklık farkı esas alınarak yapılan ölçümler sonucunda, söz konusu sıva malzemesinin ısı iletimine karşı sunduğu direnç analiz edilmiştir. Elde edilen başlıca bulgular aşağıda özetlenmiştir:

- Sıva içeriğinde yer alan genişletilmiş perlit malzemesinin yapısal boşluklarında ölü hava gözeneklerinin bulunduğu gözlemlenmiş; bu gözeneklerin, sıvaya ek ısı direnç sağladığı anlaşılmıştır.
- Dört farklı kalınlık kombinasyonu arasında, en düşük sıcaklık farkı 5.82°C ile 0-0 mm kalınlığında ölçülmüş; buna karşın en yüksek sıcaklık farkı, 20-20 mm kalınlık kombinasyonunda 7.1°C olarak belirlenmiştir.
- Briket yapı elemanlarında en düşük ısı geçiş katsayısı, 20-20 mm kalınlıkta uygulanan yalıtım sıvası ile 2.86 W/m<sup>2</sup>K olarak ölçülmüştür.

- Bu değer, geleneksel briket yapı elemanlarına kıyasla yaklaşık %49 oranında iyileşme sağlamaktadır.
- Gelecek çalışmalarda, bu malzemenin farklı yapı elemanlarıyla birlikte kullanılması durumunda; ısı verimlilik, akustik davranış ve radyasyon etkileri üzerine hem teorik hem de deneysel düzeyde daha kapsamlı değerlendirmeler yapılması önerilmektedir.

#### 4.4. Yangın Dayanımı

Bu çalışma, farklı sıva türlerinin yüksek sıcaklık koşullarında gösterdiği yapısal performansı incelemiş; özellikle kompozit yalıtım sıvası ile alçı esaslı sıva karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Sıvalar 10 mm, 20 mm ve 30 mm kalınlıklarda uygulanmış ve örnekler 300°C, 450°C ve 600°C sıcaklıklarda 60, 90 ve 120 dakika boyunca ısıya maruz bırakılmıştır. Ardından sıvalar kaldırılarak basınç dayanımı testleri gerçekleştirilmiştir. Çalışmadan elde edilen öne çıkan sonuçlar şu şekilde özetlenebilir:

- 600°C sıcaklıkta 120 dakika maruz bırakılan örneklerde, UNP numunenin basınç dayanımı %37.5 oranında azalarak 27.435 MPa seviyesine düşmüştür.
- Aynı koşullarda 30 mm kalınlığındaki YYS ile kaplanmış numune 31.19 MPa değeriyle 30 MPa sınırının üzerinde kalmış ve yaklaşık %29 oranında kayıp göstermiştir.
- RP'li örnekte ise aynı sıcaklık ve süre sonunda dayanım 28.045 MPa seviyesine düşmüş; kompozit sıvanın bu sıvaya göre yaklaşık %13.4 oranında daha iyi performans sergilediği tespit edilmiştir.
- Gerçekleştirilen regresyon analizine göre, 20 mm kalınlığındaki YYS ile kaplanmış numunenin 120 dakikalık maruziyet süresinde 10 MPa değerine ulaştığı sıcaklık 861°C olarak belirlenmiştir. Aynı özelliklerdeki başka bir numunenin 600°C sıcaklık altında 10 MPa seviyesine düşmesi yaklaşık 173 dakika sürmektedir.

#### 4.5. Bambu Lifi Katkılı Yapı Elemanının Isıl Performansı

Bu çalışmada, düşük ısı direnç gösteren geleneksel briketlerin enerji tüketimine olan olumsuz etkisine karşı, bambu lifi katkısıyla geliştirilen alternatif yapı bileşenlerinin termal performansı incelenmiştir. Bu amaçla, %2, %4 ve %6 oranlarında bambu lifi içeren briket numuneleri hazırlanmış ve konvansiyonel briketlerle karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Literatürde bambu lifinin termal yalıtım açısından yeterince araştırılmamış olması, bu çalışmanın öncü niteliğini daha da önemli hâle getirmiştir. Elde edilen temel sonuçlar şu şekilde özetlenebilir:

- Geleneksel briketin ısı geçiş katsayısı  $5.53 \text{ W/m}^2\text{K}$  iken, %2 bambu katkısı ile bu değer  $4.698 \text{ W/m}^2\text{K}$ 'ye düşmüştür.
- %4 bambu katkısı ile  $3.94 \text{ W/m}^2\text{K}$ , %6 katkı ile ise  $2.77 \text{ W/m}^2\text{K}$  değerine ulaşılmıştır.
- %6 bambu katkılı numune, konvansiyonel briketle kıyasla yaklaşık %49.9 oranında iyileşme göstermiştir. Ayrıca, %6 katkılı numune, %2 katkılıya göre %41; %4 katkılıya göre ise %30 oranında daha iyi termal performans sergilemiştir.

## KAYNAKÇA

- Abbas, M. S., Gourdon, E., Glé, P., McGregor, F., Ferroukhi, M. Y., & Fabbri, A. (2021). Relationship between hygrothermal and acoustical behavior of hemp and sunflower composites. *Building and Environment*, 188, 107462.
- Abdellah, M. Y., Sadek, M. G., Alharthi, H., & Abdel-Jaber, G. T. (2024). Mechanical, thermal, and acoustic properties of natural fibre-reinforced polyester. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering*, 238(3), 1436-1448.
- Abdullah, A. A., & Ibrahim, M. A. (2022). The Effectiveness of a Simulation Model of Thermal Insulation in Building Materials Using Cellulose Extracted from Agricultural Waste in Baghdad. *Journal of Engineering (17264073)*, 28(12).
- Ahmad, M., Hu, J. L., Ahmad, F., Tang, X. W., Amjad, M., Iqbal, M. J., ... & Farooq, A. (2021a). Supervised learning methods for modeling concrete compressive strength prediction at high temperature. *Materials*, 14(8), 1983.
- Ahmad, A., Ostrowski, K. A., Maślak, M., Farooq, F., Mehmood, I., & Nafees, A. (2021b). Comparative study of supervised machine learning algorithms for predicting the compressive strength of concrete at high temperature. *Materials*, 14(15), 4222.
- Ahmad, S., Ahmad, S., & Sheikh, J. N. (2023). Silica centered aerogels as advanced functional material and their applications: a review. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 611, 122322.
- Alabid, J., Bennadji, A., & Seddiki, M. (2022). A review on the energy retrofit policies and improvements of the UK existing buildings, challenges and benefits. *Renewable and sustainable energy reviews*, 159, 112161.
- Alaskar, A., Alfalah, G., Althoey, F., Abuhussain, M. A., Javed, M. F., Deifalla, A. F., & Ghamry, N. A. (2023). Comparative study of genetic programming-based algorithms for predicting the compressive strength of concrete at elevated temperature. *Case Studies in Construction Materials*, 18, e02199.
- Almasaeid, H. H., Suleiman, A., & Alawneh, R. (2022). Assessment of high-temperature damaged concrete using non-destructive tests and artificial neural network modelling. *Case studies in construction materials*, 16, e01080.
- Alothman, A., Ashour, S., & Krishnaraj, L. (2021). Energy performance analysis of building for sustainable design using BIM: A case study on institute building. *Int. J. Renew. Energy Res*, 11(2), 556-565.
- Al-Shaalan, A. M., Alohal, A. H. A., & Ko, W. (2017, July). Design strategies for a big mosque to reduce electricity consumption in the Kingdom of Saudi Arabia.

In The 21st World Multi-Conference on Systemics, Cybernetics and Information, Wmsci (pp. 313-317).

Alves, Z., Carvalheiras, J., Senff, L., Lacasta, A. M., Cantalapiedra, I. R., Labrincha, J. A., & Novais, R. M. (2024). A comparison between the use of cork and synthetic aggregates in the production of geopolymer composites. *Construction and Building Materials*, 438, 137147.

Alvur, E., Anaç, M., Cuce, P. M., & Cuce, E. (2024). The Potential and Challenges of Bim in Enhancing Energy Efficiency in Existing Buildings: A Comprehensive Review. *Sustainable and Clean Buildings*, 42-65.

Alyousef, R., Rehman, M. F., Khan, M., Fawad, M., Khan, A. U., Hassan, A. M., & Ghamry, N. A. (2023). Machine learning-driven predictive models for compressive strength of steel fiber reinforced concrete subjected to high temperatures. *Case Studies in Construction Materials*, 19, e02418.

Anaç, M., Cuce, P. M., & Cuce, E. (2024). Passive sustainability strategies in traditional Gaziantep residences: a critical report on historical development. *International Journal of Low-Carbon Technologies*, 19, 245-256.

Anbouhi, M. H., Farahza, N., & Ayatollahi, S. M. H. (2016). Analysis of thermal behavior of materials in the building envelope using building information modeling (BIM)—A case study approach. *Open Journal of Energy Efficiency*, 5(3), 88-106.

Anh, L. D. H., & Zoltán, P. (2022). Experimental Investigation of Thermal Conductivity Values and Density Dependence of Insulation Materials from Coir Fiber. *International Journal of Materials Science and Engineering*, 10(4), 71-79.

Armutlu, S. G., & Gülten, A. (2019). The lifecycle cost and CO2 emission analysis with the building information modeling applications. *International Journal of Innovative Engineering Applications*, 3(2), 48-60.

Asamatdinov, M., Zhukov, A., Medvedev, A., & Mukhametzyanov, V. (2020). Fire protection systems using clay-gypsum plaster in agriculture. In *E3S Web of conferences* (Vol. 175, p. 11008). EDP Sciences.

Atmaca, A., & Atmaca, N. (2022). Carbon footprint assessment of residential buildings, a review and a case study in Turkey. *Journal of Cleaner Production*, 340, 130691.

Aydın, S. (2008). Development of a high-temperature-resistant mortar by using slag and pumice. *Fire safety journal*, 43(8), 610-617.

Aydın, S., & Baradan, B. (2007). Effect of pumice and fly ash incorporation on high temperature resistance of cement based mortars. *Cement and concrete research*, 37(6), 988-995.

- B a, P., P Shetty, B., & Singh Yadav, S. P. (2022). Physical and mechanical properties, morphological behaviour of pineapple leaf fibre reinforced polyester resin composites. *Advances in Materials and Processing Technologies*, 8(1), 1147-1159.
- Bataw, A., Burrows, M., & Kirkham, R. (2014). 'The challenges of adopting Building Information Modelling (BIM) principles within Small to Medium sized Enterprises (SMEs)'. *Proceedings of the 14th International Conference on Construction Applications of Virtual Reality (CONVR2014)*, 16-18 November 2014, Sharjah, UAE, 318-324.
- Bauer, E., Piazzarollo, C. B., de Souza, J. S., & dos Santos, D. G. (2020). Relative importance of pathologies in the severity of facade degradation. *Journal of Building Pathology and Rehabilitation*, 5(1), 7.
- Beheshti, M. H., Firoozi, A., Jafarizaveh, M., & Tabrizi, A. (2023). Acoustical and thermal characterization of insulating materials made from wool and sugarcane bagasse. *Journal of Natural Fibers*, 20(2), 2237675.
- Benmicia, N. (2023). The energy efficiency diagnosis of residential buildings in Algeria. In *E3S Web of Conferences* (Vol. 436, p. 01009). EDP Sciences.
- Bhagat, D., Bhalla, S., & West, R. P. (2021). Fabrication and structural evaluation of fibre reinforced bamboo composite beams as green structural elements. *Composites Part C: Open Access*, 5, 100150.
- Bianco, L., Serra, V., Fantucci, S., Dutto, M., & Massolino, M. (2015). Thermal insulating plaster as a solution for refurbishing historic building envelopes: First experimental results. *Energy and Buildings*, 95, 86-91.
- Bilow, D. N., & Kamara, M. E. (2008). Fire and concrete structures. In *Structures Congress 2008: Crossing Borders* (pp. 1-10).
- Binici, H., Aksogan, O., Dincer, A., Luga, E., Eken, M., & Isikaltun, O. (2020). The possibility of vermiculite, sunflower stalk and wheat stalk using for thermal insulation material production. *Thermal Science and Engineering Progress*, 18, 100567.
- Biswas, K., Patel, T., Shrestha, S., Smith, D., & Desjarlais, A. (2019). Whole building retrofit using vacuum insulation panels and energy performance analysis. *Energy and buildings*, 203, 109430.
- Bodansky, D., Brunnée, J., & Rajamani, L. (2021). Paris agreement. *Audiovisual Library of International Law*, 1-9.
- Bovo, M., Giani, N., Barbaresi, A., Mazzocchetti, L., Barbaresi, L., Giorgini, L., ... & Tassinari, P. (2022). Contribution to thermal and acoustic characterization of corn cob for bio-based building insulation applications. *Energy and Buildings*, 262, 111994.



- Bungau, C. C., Bungau, T., Prada, I. F., & Prada, M. F. (2022). Green buildings as a necessity for sustainable environment development: dilemmas and challenges. *Sustainability*, 14(20), 13121.
- Camarasa, C., Mata, É., Navarro, J. P. J., Reyna, J., Bezerra, P., Angelkorte, G. B., ... & Yaramenka, K. (2022). A global comparison of building decarbonization scenarios by 2050 towards 1.5–2 °C targets. *Nature Communications*, 13(1), 3077.
- Carlos Javier, R. H., Karin, R. N., & Juan Pablo, C. R. (2023). Valorization of wheat crop waste in araucanía, Chile: development of prototype of thermal insulation material for blowing technique and geographical analysis. *Buildings*, 13(5), 1152.
- Charai, M., Sghiouri, H., Mezrhab, 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.
- Christopher, S., Vikram, M. P., Bakli, C., Thakur, A. K., Ma, Y., Ma, Z., ... & Singh, P. (2023). Renewable energy potential towards attainment of net-zero energy buildings status—a critical review. *Journal of Cleaner Production*, 405, 136942.
- Costin, A., Adibfar, A., Hu, H., & Chen, S. S. (2018). Building Information Modeling (BIM) for transportation infrastructure—Literature review, applications, challenges, and recommendations. *Automation in construction*, 94, 257-281.
- Cuce, E., Cuce, P. M., Wood, C. J., & Riffat, S. B. (2014a). Optimizing insulation thickness and analysing environmental impacts of aerogel-based thermal superinsulation in buildings. *Energy and Buildings*, 77, 28-39.
- Cuce, E., Cuce, P. M., Wood, C. J., & Riffat, S. B. (2014b). Toward aerogel based thermal superinsulation in buildings: A comprehensive review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 34, 273-299.
- Cuce, E., & Riffat, S. B. (2015a). Vacuum tube window technology for highly insulating building fabric: An experimental and numerical investigation. *Vacuum*, 111, 83-91.
- Cuce, E., & Riffat, S. B. (2015b). Aerogel-assisted support pillars for thermal performance enhancement of vacuum glazing: a CFD research for a commercial product. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 40, 2233-2238.
- Cuce, E., Cuce, P. M., & Riffat, S. (2016a). Novel glazing technologies to mitigate energy consumption in low-carbon buildings: a comparative experimental investigation. *International Journal of Energy Research*, 40(4), 537-549.
- Cuce, E., Cuce, P. M., & Young, C. H. (2016b). Energy saving potential of heat insulation solar glass: Key results from laboratory and in-situ testing. *Energy*, 97, 369-380.

- Cuce, E., & Cuce, P. M. (2016). The impact of internal aerogel retrofitting on the thermal bridges of residential buildings: An experimental and statistical research. *Energy and Buildings*, 116, 449-454.
- Cuce, E. (2017). Role of airtightness in energy loss from windows: Experimental results from in-situ tests. *Energy and Buildings*, 139, 449-455.
- Cuce, E. (2018). Accurate and reliable U-value assessment of argon-filled double glazed windows: A numerical and experimental investigation. *Energy and Buildings*, 171, 100-106.
- Cuce, E., Cuce, P. M., Alvur, E., Yilmaz, Y. N., Saboor, S., Ustabas, I., ... & Asif, M. (2023). Experimental performance assessment of a novel insulation plaster as an energy-efficient retrofit solution for external walls: A key building material towards low/zero carbon buildings. *Case Studies in Thermal Engineering*, 49, 103350.
- Cuce, E., Cuce, P. M., Wood, C., Gillott, M., & Riffat, S. (2024a). Experimental investigation of internal aerogel insulation towards low/zero carbon buildings: A comprehensive thermal analysis for a UK building. *Sustainable and Clean Buildings*, 1-22.
- Cuce, P. M., Cuce, E., & Alvur, E. (2024b). Internal or external thermal superinsulation towards low/zero carbon buildings? A critical report. *Gazi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 9(3), 435-442.
- Cuce, P. M., Alvur, E., Cuce, E., Alshahrani, S., Prakash, C., Tan, H., & Ustabas, I. (2024c). Unlocking energy efficiency: Experimental investigation of bamboo fibre reinforced briquettes as sustainable solution with enhanced thermal resistance. *Case Studies in Thermal Engineering*, 60, 104680.
- Cuce, E., Cuce, P. M., & Alvur, E. (2024d). Thermal resistance analysis of bamboo fibre added briquettes: An experimental research. *ISARC International Science and Art Research, Batman, Turkey*, 292-300.
- Çuhadaroglu, B. (2005). Thermal conductivity analysis of a briquette with additive hazelnut shells. *Building and environment*, 40(7), 942-948.
- Do, N. H., Tran, V. T., Tran, Q. B., Le, K. A., Thai, Q. B., Nguyen, P. T., ... & Le, P. K. (2021). Recycling of pineapple leaf and cotton waste fibers into heat-insulating and flexible cellulose aerogel composites. *Journal of Polymers and the Environment*, 29, 1112-1121.
- El-Darwish, I., & Gomaa, M. (2017). Retrofitting strategy for building envelopes to achieve energy efficiency. *Alexandria engineering journal*, 56(4), 579-589.
- Elkhayat, Y. O., Elmozy, S. A., & El-Darwish, I. I. (2023). Selecting the Optimal Thermal Insulation Material for a Residential Building Envelope in Cairo in Consideration of The Thermal Comfort and Energy Consumption. *Journal of Sustainable Architecture and Civil Engineering*, 33(2), 122-132.

- El-Lawindy, A. E. R., Abdelkader, H. H., ABDULLAH, A. A., Khalil, M., & Abobakr, S. M. (2024). The Role of Agriculture Waste in Achieving High Efficacy in Residential Sustainable Buildings in Egypt. *International Journal of Industry and Sustainable Development*, 5(2), 83-94.
- Ezzedine El Dandachy, M., Hassoun, L., El-Mir, A., & Khatib, J. M. (2024). Effect of elevated temperatures on compressive strength, ultrasonic pulse velocity, and transfer properties of metakaolin-based geopolymer mortars. *Buildings*, 14(7), 2126.
- Farmer, D., Johnston, D., & Miles-Shenton, D. (2016). Obtaining the heat loss coefficient of a dwelling using its heating system (integrated coheating). *Energy and Buildings*, 117, 1-10.
- Fenoglio, E., Fantucci, S., Serra, V., Carbonaro, C., & Pollo, R. (2018). Hygrothermal and environmental performance of a perlite-based insulating plaster for the energy retrofit of buildings. *Energy and Buildings*, 179, 26-38.
- Gao, D., Zhang, W., Tang, J., & Zhu, Z. (2024). Effect of steel fiber on the compressive performance and microstructure of ultra-high performance concrete at elevated temperatures. *Construction and Building Materials*, 435, 136830.
- Gu, X., & Ling, Y. (2024). Research progress of aerogel materials in the field of construction. *Alexandria Engineering Journal*, 91, 620-631.
- Guo, S. J., & Wei, T. (2016). Cost-effective energy saving measures based on BIM technology: Case study at National Taiwan University. *Energy and Buildings*, 127, 433-441.
- Hao, J. L., Cheng, B., Lu, W., Xu, J., Wang, J., Bu, W., & Guo, Z. (2020). Carbon emission reduction in prefabrication construction during materialization stage: A BIM-based life-cycle assessment approach. *Science of the Total Environment*, 723, 137870.
- Heydari, M., & Heravi, G. (2023). A BIM-based framework for optimization and assessment of buildings' cost and carbon emissions. *Journal of Building Engineering*, 79, 107762.
- Ingrao, C., Messineo, A., Beltramo, R., Yigitcanlar, T., & Ioppolo, G. (2018). How can life cycle thinking support sustainability of buildings? Investigating life cycle assessment applications for energy efficiency and environmental performance. *Journal of cleaner production*, 201, 556-569.
- Jack, R., Loveday, D., Allinson, D., & Lomas, K. (2018). First evidence for the reliability of building co-heating tests. *Building Research & Information*, 46(4), 383-401.
- Javed, M. F., Khan, M., Nehdi, M. L., & Abuhussain, M. (2024). Application of metaheuristic algorithms for compressive strength prediction of steel fiber

- reinforced concrete exposed to high temperatures. *Materials Today Communications*, 39, 108832.
- Jayalath, A., Vaz-Serra, P., Hui, F. K. P., & Aye, L. (2024). Thermally comfortable energy efficient affordable houses: A review. *Building and Environment*, 111495.
- Johansson, P., Geving, S., Hagentoft, C. E., Jelle, B. P., Rognvik, E., Kalagasidis, A. S., & Time, B. (2014a). Interior insulation retrofit of a historical brick wall using vacuum insulation panels: Hygrothermal numerical simulations and laboratory investigations. *Building and Environment*, 79, 31-45.
- Johansson, P., Hagentoft, C. E., & Kalagasidis, A. S. (2014b). Retrofitting of a listed brick and wood building using vacuum insulation panels on the exterior of the facade: Measurements and simulations. *Energy and Buildings*, 73, 92-104.
- Johnston, D., Wingfield, J., & Miles-Shenton, D. (2010, September). Measuring the fabric performance of UK dwellings. In *Proceedings of the Association of Researchers in Construction Management (ARCOM) Twenty-Sixth Annual Conference* (Vol. 2, pp. 1371-1380).
- Johnston, D., Miles-Shenton, D., Farmer, D., & Wingfield, J. (2013). Whole house heat loss test method (Coheating). Leeds Metropolitan University: Leeds, UK.
- Kalagasidis, A. S., Brycke, E., Nilssen, J., & Johansson, P. (2016). Evaluation of a modified co-heating test for in-situ measurements of thermal transmittance of single-family houses. *Thermal Performance of the Exterior Envelopes of Whole Buildings*, 2016, 598-608.
- Kim, M., Kim, T., Yeo, I. H., Lee, D., Cho, H., & Kang, K. I. (2021). Improvement of standards on fire safety performance of externally insulated high-rise buildings: Focusing on the case in Korea. *Journal of Building Engineering*, 35, 101990.
- Kim, S., Seo, J., Jeong, H., & Kim, J. (2022). In situ measurement of the heat loss coefficient of thermal bridges in a building envelope. *Energy and Buildings*, 256, 111627.
- Kiran, T., Yadav, S. K., Mathews, M. E., Andrushia, D., & Kodur, V. (2022). Performance evaluation of lightweight insulating plaster for enhancing the fire endurance of high strength structural concrete. *Journal of Building Engineering*, 57, 104902.
- Kiran, T., N, A., Andrushia, A. D., Kodur, V., Mathews, M. E., & Arulraj, G. P. (2023). Performance of clay masonry prisms with light weight plaster exposed to standard fire exposure. *Fire and Materials*, 47(1), 99-119.
- Koksal, F., Coşar, K., Dener, M., Benli, A., & Gencel, O. (2023). Insulating and fire-resistance performance of calcium aluminate cement based lightweight mortars. *Construction and Building Materials*, 362, 129759.

- Krstić, H., & Domazetović, M. (2020). Co-heating test as a tool for reduction of energy performance gap in buildings. *International journal of energy production and management*, 5(4), 328-341.
- Kumar, G. V., & Kumar, B. N. (2020). Influence of Nano-Silica and Nano-Alumina on Properties of Concrete. *Int. J. Eng. Res. Curr. Trends*, 2(3), 2582-5488.
- Lamrani, M., Laaroussi, N., Khabbazi, A., Khalfaoui, M., Garoum, M., & Feiz, A. (2017). Experimental study of thermal properties of a new ecological building material based on peanut shells and plaster. *Case studies in construction materials*, 7, 294-304.
- Latif, E. (2024). Experimental analysis of moisture-dependent thermal conductivity, and hygric properties of novel hemp–shive insulations with numerical assessment of their in-built hygrothermal and energy performance. *Materials*, 17(2), 486.
- Lee, J. H., Sohn, Y. S., & Lee, S. H. (2012). Fire resistance of hybrid fibre-reinforced, ultra-high-strength concrete columns with compressive strength from 120 to 200 MPa. *Magazine of Concrete Research*, 64(6), 539-550.
- Li, M., Qian, C., & Sun, W. (2004). Mechanical properties of high-strength concrete after fire. *Cement and concrete research*, 34(6), 1001-1005.
- Li, Q., Yao, J., & Liang, T. (2023). Experimental study on the effect of fireproof coating and cooling methods on the mechanical properties of concrete exposed to high temperature. *Construction and Building Materials*, 376, 131045.
- Li, S., & Liew, J. R. (2022). Experimental and Data-Driven analysis on compressive strength of steel fibre reinforced high strength concrete and mortar at elevated temperature. *Construction and Building Materials*, 341, 127845.
- Li, X. J., Lai, J. Y., Ma, C. Y., & Wang, C. (2021). Using BIM to research carbon footprint during the materialization phase of prefabricated concrete buildings: A China study. *Journal of Cleaner Production*, 279, 123454.
- Li, Y., Yao, J., Li, R., Zhang, Z., & Zhang, J. (2017). Thermal and energy performance of a steel-bamboo composite wall structure. *Energy and Buildings*, 156, 225-237.
- Liu, Q., & Wang, Z. (2022). Green BIM-based study on the green performance of university buildings in northern China. *Energy, sustainability and society*, 12(1), 12.
- Lubwama, M., Yiga, V. A., Muhairwe, F., & Kihedu, J. (2020). Physical and combustion properties of agricultural residue bio-char bio-composite briquettes as sustainable domestic energy sources. *Renewable energy*, 148, 1002-1016.

- Lucchi, E., Baiani, S., & Altamura, P. (2023). Design criteria for the integration of active solar technologies in the historic built environment: Taxonomy of international recommendations. *Energy and Buildings*, 278, 112651.
- Luhar, S., Nicolaides, D., & Luhar, I. (2021). Fire resistance behaviour of geopolymer concrete: An overview. *Buildings*, 11(3), 82.
- Ma, H., Du, N., Yu, S., Lu, W., Zhang, Z., Deng, N., & Li, C. (2017). Analysis of typical public building energy consumption in northern China. *Energy and Buildings*, 136, 139-150.
- Ma, G., Jia, K., Xie, P., Wang, L., Ding, X., & Ju, D. (2023). Physical, mineralogical, thermal, and mechanical properties of aerogel-incorporated concrete exposed to elevated temperatures. *Cement and Concrete Composites*, 140, 105089.
- Mahmood, R. A. (2020). Assessment of a sustainable building using eco-friendly insulation materials. *International Journal of Advances in Mechanical and Civil Engineering (IJAMCE)*, 7(2), 16-20.
- Martínez-García, C., González-Fontebao, B., Carro-López, D., & Pérez-Ordóñez, J. L. (2020). Mussel shells: A canning industry by-product converted into a bio-based insulation material. *Journal of Cleaner Production*, 269, 122343.
- Meharu, K. (2019). Briquette from coffee husk. *Journal of Waste Management and Disposal*, 2(1), 1.
- Messahel, B., Onyenokporo, N., Beizae, A., & Oyinlola, M. (2022). Thermal characterisation of composite walls made from waste materials.
- Molay, T. G. G., Leroy, M. N. L., Fidele, T., Franck, H. G., & Bienvenu, N. J. M. (2019). Mechanical and physical performances of concretes made from crushed sands of different geological nature subjected to high temperatures. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 22(4), 1116-1124.
- Moretti, E., Merli, F., Cuce, E., & Buratti, C. (2017). Thermal and acoustic properties of aerogels: preliminary investigation of the influence of granule size. *Energy Procedia*, 111, 472-480.
- Mundhada, A. R., & Pofale, A. D. (2015). Effect of high temperature on compressive strength of concrete. *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering*, 12(1), 66-70.
- Mytafides, C. K., Dimoudi, A., & Zoras, S. (2017). Transformation of a university building into a zero energy building in Mediterranean climate. *Energy and Buildings*, 155, 98-114.
- Najjar, M., Figueiredo, K., Hammad, A. W., & Haddad, A. (2019). Integrated optimization with building information modeling and life cycle assessment for generating energy efficient buildings. *Applied Energy*, 250, 1366-1382.

- Nanda, B. P., & Satapathy, A. (2020). Thermal, acoustic, and dielectric behavior of epoxy-based hybrid composites using short hair fiber. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 42(6), 306.
- Nasr, Y., El Zakhem, H., Hamami, A. E. A., El Bachawati, M., & Belarbi, R. (2023). Comprehensive review of innovative materials for sustainable buildings' energy performance. *Energies*, 16(21), 7440.
- Nowakowski-Pałka, J., & Roman, K. (2023). Evaluation of the Hemp Shive (*Cannabis sativa* L.) Energy Requirements Associated with the Biocomposite Compaction Process. *Energies*, 16(18), 6591.
- OECD. (2024, 7 Kasım). Progress in national climate policy efforts remains insufficient to achieve 2030 targets. [https://www.oecd.org/en/about/news/press-releases/2024/11/progress-in-national-climate-policy-efforts-remains-insufficient-to-achieve-2030-targets.html?utm\\_source](https://www.oecd.org/en/about/news/press-releases/2024/11/progress-in-national-climate-policy-efforts-remains-insufficient-to-achieve-2030-targets.html?utm_source) (Erişim Tarihi: 30.07.2025)
- Olanrewaju, O. I., Kineber, A. F., Chileshe, N., & Edwards, D. J. (2022). Modelling the relationship between Building Information Modelling (BIM) implementation barriers, usage and awareness on building project lifecycle. *Building and Environment*, 207, 108556.
- Pachideh, G., Gholhaki, M., Aljenabi, A., & Rezaifar, O. (2024). Compressive strength ratios of concretes containing pozzolans under elevated temperatures. *Heliyon*, 10(5).
- Parlato, M. C., & Porto, S. M. (2020). Organized framework of main possible applications of sheep wool fibers in building components. *Sustainability*, 12(3), 761.
- Pavlík, Z., Vyšvařil, M., Pavlíková, M., Bayer, P., Pivák, A., Rovnaníková, P., & Záleská, M. (2023). Lightweight pumice mortars for repair of historic buildings—Assessment of physical parameters, engineering properties and durability. *Construction and Building Materials*, 404, 133275.
- Pawłosik, D., Cebrat, K., & Brzezicki, M. (2025). Exploring Advancements in Bio-Based Composites for Thermal Insulation: A Systematic Review. *Sustainability*, 17(3), 1-43.
- Poon, C. S., & Azhar, S. (2003). Deterioration and recovery of metakaolin blended concrete subjected to high temperature. *Fire technology*, 39, 35-45.
- Porubská, M., Koóšová, K., & Braniša, J. (2024). The Application of Sheep Wool in the Building Industry and in the Removal of Pollutants from the Environment. *Processes*, 12(5), 963.
- Pradhan, P., Nanda, B. P., & Satapathy, A. (2020). Polyester composites filled with walnut shell powder: Preparation and thermal characterization. *Polymer Composites*, 41(8), 3294-3308.

- Qin, L., Gao, X., & Chen, T. (2018). Recycling of raw rice husk to manufacture magnesium oxysulfate cement based lightweight building materials. *Journal of Cleaner Production*, 191, 220-232.
- Qin, D., Gao, P., Aslam, F., Sufian, M., & Alabduljabbar, H. (2022). A comprehensive review on fire damage assessment of reinforced concrete structures. *Case Studies in Construction Materials*, 16, e00843.
- Quan, W., Huang, W., An, Y., Miao, X., & Chen, Z. (2023). The effect of natural bamboo fiber and basalt fiber on the properties of autoclaved aerated concrete. *Construction and Building Materials*, 377, 131153.
- Ramlee, N. A., Naveen, J., & Jawaid, M. (2021). Potential of oil palm empty fruit bunch (OPEFB) and sugarcane bagasse fibers for thermal insulation application—A review. *Construction and Building Materials*, 271, 121519.
- Rashad, A. M. (2017). Possibility of using metakaolin as thermal insulation material. *International Journal of Thermophysics*, 38, 1-11.
- Rashad, A. M. (2022). Possibility of producing thermal insulation materials from cementitious materials without foaming agent or lightweight aggregate. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(3), 3784-3793.
- Reddy, D. H., & Ramaswamy, A. (2017). Influence of mineral admixtures and aggregates on properties of different concretes under high temperature conditions I: Experimental study. *Journal of Building Engineering*, 14, 103-114.
- Sancak, E., Sari, Y. D., & Simsek, O. (2008). Effects of elevated temperature on compressive strength and weight loss of the light-weight concrete with silica fume and superplasticizer. *Cement and Concrete Composites*, 30(8), 715-721.
- Sarihi, S., Saradj, F. M., & Faizi, M. (2021). A critical review of façade retrofit measures for minimizing heating and cooling demand in existing buildings. *Sustainable Cities and Society*, 64, 102525.
- Savchenko, S., & Antoniuk, N. (2021, June). Assessment of the impact of modifier and filler on the physical and mechanical and operational properties of plastering mortars. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 1164, No. 1, p. 012004). IOP Publishing.
- Schuss, M., Pont, U., & Mahdavi, A. (2017). Long-term experimental performance evaluation of aerogel insulation plaster. *Energy Procedia*, 132, 508-513.
- Scrucca, F., Ingrao, C., Barberio, G., Matarazzo, A., & Lagioia, G. (2023). On the role of sustainable buildings in achieving the 2030 UN sustainable development goals. *Environmental Impact Assessment Review*, 100, 107069.
- Selvaranjan, K., Navaratnam, S., Gamage, J. C. P. H., Thamboo, J., Siddique, R., Zhang, J., & Zhang, G. (2021). Thermal and environmental impact analysis of



- rice husk ash-based mortar as insulating wall plaster. *Construction and Building Materials*, 283, 122744.
- Shafighfard, T., Bagherzadeh, F., Rizi, R. A., & Yoo, D. Y. (2022). Data-driven compressive strength prediction of steel fiber reinforced concrete (SFRC) subjected to elevated temperatures using stacked machine learning algorithms. *Journal of materials research and technology*, 21, 3777-3794.
- Shen, J., & Xu, Q. (2019). Effect of elevated temperatures on compressive strength of concrete. *Construction and Building Materials*, 229, 116846.
- Shobha, R., Vinod, B. R., Vedant, V., & Pawan, B. (2020). Banana Fibre as Alternative Thermal Insulation and Comparison with Conventional Thermal Insulation in Buildings.
- Simoes, N., Gonçalves, M., Serra, C., & Resalati, S. (2021). Can vacuum insulation panels be cost-effective when applied in building façades?. *Building and Environment*, 191, 107602.
- Tan, J., Peng, S., & Liu, E. (2024). Spatio-temporal distribution and peak prediction of energy consumption and carbon emissions of residential buildings in China. *Applied Energy*, 376, 124330.
- Tlajji, G., Biwole, P., Ouldboukhite, S., & Pennec, F. (2023). Effective thermal conductivity model of straw bales based on microstructure and hygrothermal characterization. *Construction and Building Materials*, 387, 131601.
- Topçu, İ. B., & Işıkdag, B. (2007). Manufacture of high heat conductivity resistant clay bricks containing perlite. *Building and Environment*, 42(10), 3540-3546.
- Tsapko, Y. V., Tsapko, A. Y., & Bondarenko, O. P. (2020, August). Modeling of thermal conductivity of reed products. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 907, No. 1, p. 012057). IOP Publishing.
- UN Climate Change. (2023, 14 Kasım). New Analysis of National Climate Plans: Insufficient Progress Made, COP28 Must Set Stage for Immediate Action. [https://unfccc.int/news/new-analysis-of-national-climate-plans-insufficient-progress-made-cop28-must-set-stage-for-immediate?utm\\_source](https://unfccc.int/news/new-analysis-of-national-climate-plans-insufficient-progress-made-cop28-must-set-stage-for-immediate?utm_source) (Erişim Tarihi: 30.07.2025)
- Uriarte, A., Garai, I., Ferdinando, A., Erkoreka, A., Nicolas, O., & Barreiro, E. (2019). Vacuum insulation panels in construction solutions for energy efficient retrofitting of buildings. Two case studies in Spain and Sweden. *Energy and Buildings*, 197, 131-139.
- Ustabas, I., & Cuce, E. (2023). Thermal insulation and mechanical properties of a specially improved insulation plaster under freezing–thawing and high-temperature conditions. *International Journal of Low-Carbon Technologies*, 18, 682-688.

- Ustabas, I., Cuce, P. M., Alvur, E., Kesepara, D., Yilmaz, Y. N., Cuce, E., & Alshahrani, S. (2024). Fire retardation, compressive strength and durability analysis of concrete reinforced with novel plasters: An experimental, computational and statistical research. *Case Studies in Thermal Engineering*, 55, 104156.
- Van de Putte, S., Himpe, E., Nonneman, J., Steeman, M., & Janssens, A. (2021, November). Assessment of the heat loss coefficient of a renovated historical dwelling using a co-heating test. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 2069, No. 1, p. 012085). IOP Publishing.
- Vijayan, D. S., Sivasuriyan, A., Patchamuthu, P., & Jayaseelan, R. (2022). Thermal performance of energy-efficient buildings for sustainable development. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(34), 51130-51142.
- Wang, H., Chiang, P. C., Cai, Y., Li, C., Wang, X., Chen, T. L., ... & Huang, Q. (2018). Application of wall and insulation materials on green building: A review. *Sustainability*, 10(9), 3331.
- Weerasuriya, A. U., Zhang, X., Gan, V. J., & Tan, Y. (2019). A holistic framework to utilize natural ventilation to optimize energy performance of residential high-rise buildings. *Building and Environment*, 153, 218-232.
- Wi, S., Yang, S., Kim, Y. U., Kang, Y., & Kim, S. (2022). Toxicity characteristics and fire retardant performance of commercially manufactured organic insulation materials for building applications. *Construction and Building Materials*, 341, 127898.
- Wiatros-Motyka, M., Fulghum, N., & Jones, D. (2024). Global electricity review 2024.
- Wilton, O. (2024). Cork. In *Materials* (pp. 92-99). RIBA Publishing.
- Xu, J., Wang, H., Wu, W., Lin, L., & Yu, Y. (2025). Predicting compressive strength of concrete at elevated temperatures and optimizing its mixture proportions. *Case Studies in Construction Materials*, 22, e04480.
- Yang, H., Li, H., & Jiang, J. (2025). Predictive modeling of compressive strength of geopolymers before and after high temperature applying machine learning algorithms. *Structural Concrete*, 26(2), 1699-1732.
- Yao, X., Han, Y., Shen, L., & Zhu, D. (2024). Experimental study on the effect of polypropylene fiber on compressive strength and fracture properties of high-strength concrete after elevated temperatures. *Journal of Building Engineering*, 86, 108860.
- Zeyad, A. M., Mahmoud, A. A., El-Sayed, A. A., Aboraya, A. M., Fathy, I. N., Zygouris, N., ... & Agwa, I. S. (2024). Compressive strength of nano concrete materials under elevated temperatures using machine learning. *Scientific Reports*, 14(1), 24246.

Zulkifeli, M. F. H. B. M., & Saman@ Hj Mohamed, H. B. M. (2017, August). Compressive and flexural strength of expanded perlite aggregate mortar subjected to high temperatures. In AIP Conference Proceedings (Vol. 1875, No. 1, p. 030006). AIP Publishing LLC.

