

T.C.  
BİLECİK ŞEYH EDEBALI ÜNİVERSİTESİ  
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ  
ENERJİ SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI  
ENERJİ SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ DOKTORA PROGRAMI

**UÇUCU KÜL, TABAN KÜLÜ VE DİYATOMİT KULLANILARAK POLİMER  
ESASLI AEROJEL KOMPOZİTLERİN GELİŞTİRİLMESİ VE ISI YALITIM  
ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

DOKTORA TEZİ

MERVE PAKSOY BALCI

TEZ DANIŞMANI

PROF. DR. CENK KARAKURT

İKİNCİ TEZ DANIŞMANI

PROF. DR. FATİH ŞEN

BİLECİK, 2026

10806750

## BEYAN

Uçucu Kül, Taban Külü ve Diyatomit Kullanılarak Polimer Esaslı Aerojel Kompozitlerin Geliştirilmesi ve Isı Yalıtım Özelliklerinin İncelenmesi başlıklı doktora tezinin hazırlık ve yazım aşamasında bilimsel araştırma ve etik kurallarına uyduğumu, [Yükseköğretim Kurumları Bilimsel Araştırma ve Yayın Faaliyetlerinde Üretken Yapay Zekâ Kullanımına Dair Etik Rehberine](#) uygun olarak tez/dönem projemi hazırladığımı, başkalarının eserlerinden yararlandığım bölümlerde bilimsel etik kurallarına uygun olarak atıfta bulunduğumu, kullandığım verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı, çalışmamın herhangi bir kısmının başka bir tez/dönem projesi olarak sunulmadığını, aksinin tespit edilmesi durumunda doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi ve vermiş olduğum bilgilerin doğru olduğunu beyan ederim.

Bu çalışma Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP) Koordinatörlüğü tarafından TEZ-D-2024-522 nolu proje ile desteklenmiştir.

**Merve PAKSOY BALCI**

.././2026

İmza:

## ÖN SÖZ

Bu tez çalışması; farklı silika kaynakları kullanılarak elde edilen polimer katkılı aerojellerin binalarda enerji verimliliğine katkı sağlayacak yalıtım ürünlerine dönüştürülmesi amacıyla gerçekleştirilmiştir. Elde edilen bulguların hem akademik çalışmalara hem de ısı yalıtımı ve enerji sektöründeki çeşitli uygulamalara faydalı olmasını temenni ederim.

Öncelikle, tezimin her aşamasında bilgi birikimi, tecrübesi ve akademik disipliniyle bana yol gösteren değerli danışmanım Prof. Dr. Cenk KARAKURT'a en içten teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmamın analiz ve uygulama aşamalarında laboratuvarını açan ve araştırmalarımın ivme kazanmasını sağlayan eş danışmanım Prof. Dr. Fatih ŞEN'e teşekkürü bir borç bilirim.

Tez İzleme Komitesinde yer alarak, yapıcı eleştiri ve önerileriyle çalışmamın gelişimini ve niteliğini artıran hocalarım Prof. Dr. Mehmet Uğur TOPRAK ve Dr. Öğr. Üyesi Hasan BOZKURT'a katkılarından ötürü minnettarım.

Bu çalışma, TEZ-D-2024-522 numaralı doktora tez projesi ile desteklenmiştir. Sağladıkları maddi destek için Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP) Koordinatörlüğü'ne teşekkür ederim.

Özellikle laboratuvar çalışmalarında desteğini her an yanımda hissettiğim, sabırla ve içtenlikle daima yardımına koşan Dr. Ramazan BAYAT'a teşekkür ederim.

Bu uzun ve meşakkatli yolculukta, üzerimdeki emekleri hiçbir maddi karşılıkla ölçülemeyecek olan, duaları ve güzel dilekleriyle yolumu aydınlatan kıymetli annem Habibe PAKSOY ve canım babam Zeki PAKSOY'a yürekten teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca hayatımın her anında varlıklarına şükrettiğim kardeşlerim Muhammet PAKSOY ve Kübra PAKSOY'a verdikleri karşılıksız destek için teşekkür ederim. Varlığınız en büyük zenginliğimdir...

Son olarak, akademik çalışmaların getirdiği yoğun ve stresli dönemlerimde bana her zaman huzurlu bir liman olan, yolu benim için yürünür kılan hayat arkadaşım Furkan BALCI'ya her türlü fedakarlığı için minnettarım.

**Merve PAKSOY BALCI**

**2026**

## ÖZET

Binalarda enerji verimliliğinin artırılması ve sürdürülebilir ısı yalıtım çözümlerinin geliştirilmesi, günümüz yapı sektörünün stratejik önceliklerinden biri haline gelmiştir. Bu çalışmada; uçucu kül ve taban külü gibi endüstriyel atıklar ve diatomit gibi kolay ulaşılabilir, zararsız ve ekonomik bir doğal silika kaynağı olan diatomit kullanılarak; hafif, yüksek gözenekliliğe ve düşük ısı iletkenliğe sahip aerojeller sentezlenmiştir. Aerojellerin sentez sürecinde sol-jel yöntemi, kurutma aşamasında ise dondurarak kurutma tekniği tercih edilmiştir. Sentez sırasında bağlayıcı olarak polivinil alkol ve karboksimetil selüloz kullanılırken, çözücü olarak yalnızca saf su kullanılmıştır. Sentezlenen aerjel numuneler alçıpan üzerine entegre edilerek binalarda enerji verimliliği sağlamada kullanılacak ısı yalıtım kompozitleri elde edilmiştir.

Aerjel numunelerin karakterizasyonu amacıyla SEM-EDX, FT-IR ve XRD analizleri ile ısı iletkenlik testleri gerçekleştirilmiştir. Ek olarak, numunelerin yangın karşısındaki davranışları ve basınç dayanımları belirlenmiş, termal kamera görüntüleri ile yalıtım performansları gözlemlenmiştir. SEM görüntüleri, numunelerin ısı ve ses yalıtımında etkin rol oynayan üç boyutlu gözenek yapısını doğrulamıştır. Karakterizasyon sonuçlarına göre; sentezlenen aerjellerin yığın yoğunlukları  $0,099 \text{ g/cm}^3$  ile  $0,142 \text{ g/cm}^3$ , gözeneklilik değerleri %89,60 ile %92,71 ve ısı iletkenlik katsayıları  $0,031 \text{ W/(m.K)}$  ile  $0,041 \text{ W/(m.K)}$  arasında değişkenlik göstermiştir.

Sonuç olarak; elde edilen bulgular, geliştirilen aerjel-alçıpan kompozitlerinin binalarda enerji tasarrufu sağlamadaki yüksek potansiyelini doğrulamaktadır. Ortaya konulan bu çıktılar; geleneksel ısı yalıtım malzemelerine kıyasla yenilikçi, sürdürülebilir ve maliyet etkin bir ticari ürün potansiyeli sunmaktadır.

**Anahtar Kelimeler:** Aerjel, enerji verimliliği, ısı yalıtımı, nanoteknoloji.

## ABSTRACT

Improving energy efficiency in buildings and developing sustainable thermal insulation solutions have become one of the strategic priorities of today's construction industry. In this study, aerogels with low density, high porosity, and low thermal conductivity were synthesized using industrial waste materials such as fly ash and bottom ash, as well as diatomite—an easily accessible, harmless, and economical natural source of silica. The sol-gel method was employed for the synthesis of the aerogels, and freeze-drying was used for the drying stage. During synthesis, polyvinyl alcohol and carboxymethyl cellulose were used as binders, while only pure water was used as the solvent. The synthesized aerogel samples were integrated onto gypsum board to produce thermal insulation composites that can be used to improve energy efficiency in buildings.

To characterize the aerogel samples, SEM-EDX, FT-IR, and XRD analyses were performed, along with thermal conductivity tests. Additionally, the samples' fire behavior and compressive strengths were determined, and their insulation performance was observed using thermal camera images. SEM images confirmed the three-dimensional pore structure of the samples, which plays an effective role in thermal and acoustic insulation. According to the characterization results; the bulk densities of the synthesized aerogels ranged from 0.099 g/cm<sup>3</sup> to 0.142 g/cm<sup>3</sup>, their porosity values ranged from 89.60% to 92.71%, and their thermal conductivity coefficients ranged from 0.031 W/(m·K) to 0.041 W/(m·K).

In conclusion, the findings confirm the high potential of the developed aerogel-gypsum board composites for energy savings in buildings. These results demonstrate the potential for an innovative, sustainable, and cost-effective commercial product compared to traditional thermal insulation materials.

**Keywords:** Aerogel, energy efficiency, thermal insulation, nanotechnology.

# İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖN SÖZ.....	i
ÖZET.....	ii
ABSTRACT.....	iii
İÇİNDEKİLER .....	iv
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	viii
TABLolar LİSTESİ.....	xiii
KISALTMALAR VE SİMGELER LİSTESİ.....	xiv
1. GİRİŞ .....	1
1.1. Tez çalışmasının amacı.....	3
1.2. Tez çalışmasının kapsamı .....	4
2. KURAMSAL VE KAVRAMSAL TEMELLER.....	4
2.1. Isı yalıtımının temelleri ve yalıtım malzemeleri.....	5
2.2. Isı yalıtım uygulamalarının enerji verimliliğindeki rolü .....	7
2.3. Enerji etkin yapı tasarımının önemi ve ilkeleri .....	9
2.3.1. Türkiye yapı sektöründe enerji verimliliği ve mevcut durum .....	12
2.3.2. Türkiye’de enerji verimliliği politikaları ve mevzuat .....	13
2.3.3. Türkiye’de teşvik uygulamaları ve destek mekanizmaları.....	17
2.3.4. Uluslararası örneklerin Türkiye’de uygulanma potansiyeli .....	18
2.3.5. Konutlarda ısı yalıtımının sağlayacağı faydalar.....	19
2.4. Isı yalıtım malzemelerinin tarihsel gelişimi .....	21
2.5. Isı yalıtımının mekanizması.....	22
2.5.1. Isı iletimi (kondüksiyon) .....	24
2.5.2. Isı taşınımı (konveksiyon) .....	26
2.5.3. Işınım (radyasyon).....	27
2.6. Isı yalıtımında kullanılan malzemeler .....	28
2.6.1. Taş yünü .....	30
2.6.2. Cam yünü .....	31
2.6.3. Genleştirilmiş perlit (GP).....	31

2.6.4. Gazbeton.....	32
2.6.5. Bims (pomza taşı).....	32
2.6.6. Geleneksel tuğla .....	33
2.6.7. Genleştirilmiş polistiren (EPS).....	33
2.6.8. Ekstrüde polistiren köpük (XPS).....	34
2.6.9. Poliüretan köpük (PUR) ve poliizosiyanürat (PIR).....	35
2.6.10. Polivinilklorür köpük (PVC) .....	36
2.6.11. Fenol köpüğü (PF) .....	36
2.6.12. Aerojel yalıtım malzemeleri .....	37
2.6.13. Vakum yalıtım panelleri (VIP) .....	38
2.6.14. Faz değişim malzemeleri (PCM).....	39
2.6.15. Genleştirilmiş mantar levhalar (ECB).....	40
2.6.16. Biyokütle esaslı yalıtım malzemeleri .....	41
2.7. Isı yalıtım malzemelerinin teknik özellikleri.....	43
2.7.1. Isıl iletkenlik katsayısı ( $\lambda$ ) .....	44
2.7.2. Isıl direnç (R-değeri) .....	46
2.7.3. Isıl geçirgenlik katsayısı (U-değeri).....	48
2.7.4. Termal kütle .....	49
2.7.5. Özgül ısı (ısı kapasitesi).....	50
2.7.6. Buhar difüzyon direnç katsayısı ( $\mu$ ).....	51
2.7.7. Yangına karşı dayanıklılık.....	52
2.7.8. Birim hacim ağırlık (BHA) .....	54
2.7.9. Su emme oranı .....	55
2.7.10. Basınç dayanımı .....	55
2.7.11. Ekonomiklik .....	56
2.7.12. Dayanıklılık (durabilite).....	57
2.7.13. Yeniden kullanılabilirlik .....	59
2.7.14. Çevresel etkiler .....	59
2.8. Binalarda ısı yalıtım uygulamaları .....	61
2.8.1. Duvarlarda ısı yalıtımı .....	64
2.8.2. Çatılarda ısı yalıtımı.....	67
2.8.3. Pencereelerde ısı yalıtımı .....	69

2.8.4. Zeminde ısı yalıtımı .....	70
2.8.5. Tesisatlarda ısı yalıtımı .....	71
2.8.6. Isı yalıtım malzemelerinin ekonomik açıdan değerlendirilmesi.....	72
2.8.7. Isı yalıtım uygulamalarında karşılaşılan güçlükler.....	74
2.9. Nano malzemeler ve aerojel sistemleri .....	75
2.9.1. Nano malzemelerin tanımı ve özellikleri .....	76
2.9.2. Aerojellerin tanımı, yapısı ve özellikleri.....	77
2.9.3. Aerojel çeşitleri .....	78
2.9.4. Aerojel sentez yöntemleri.....	84
2.9.5. Sol-jel yöntemiyle aerojel sentezi .....	86
2.9.5.1. Jelin oluşturulması .....	91
2.9.5.2. Jelin yaşlandırılması ve çözücü değişimi.....	92
2.9.5.3. Jelin kurutulması.....	93
2.10. Aerojelerde ısı iletim mekanizması .....	98
2.11. Aerojellerin genel uygulama alanları.....	100
2.11.1. Pratik ve mühendislik uygulamaları.....	101
2.11.2. Endüstriyel kullanımı ve ticarileşme süreci .....	101
2.12. Aerojellerin inşaat mühendisliği uygulamaları.....	102
2.12.1. Saydam yapı elemanları ve cam sistemleri.....	104
2.12.2. Yalıtım harçları ve dış cephe kaplamaları.....	105
2.12.3. Aerojel katkılı köpük beton uygulamaları .....	107
2.12.4. Yüksek performanslı yalıtım panelleri .....	109
2.13. Aerojel bazlı kompozitlerin sınıflandırılması ve uygulamaları.....	109
2.13.1. Lif katkılı aerojel kompozitler .....	111
2.13.2. Çimento esaslı aerojel kompozitler .....	112
2.13.3. Polimer matrisli aerojel kompozitler .....	113
2.14. Aerojel uygulamalarındaki kısıtlılıklar ve geliştirme önerileri .....	114
3. MATERYAL VE METOT.....	116
3.1. Aerojel sentezinde kullanılan silisyum kaynakları.....	116
3.2. Aerojel sentezinde kullanılan kimyasallar ve diğer malzemeler.....	119

3.3.	Karakterizasyon yöntemleri.....	121
3.3.1.	Taramalı elektron mikroskobu (SEM-EDX) analizi.....	122
3.3.2.	Fourier dönüşümlü kızılötesi spektroskopisi (FT-IR) analizi .....	122
3.3.3.	X-ışını kırınımı (XRD) analizi .....	123
3.3.4.	X-ışını floresans spektrometrisi (XRF) analizi .....	124
3.3.5.	Yoğunluk ve porozite hesaplamaları .....	124
3.3.6.	Termal kamera analizi .....	125
3.3.7.	Isıl iletkenlik analizi .....	127
3.3.8.	Basınç deneyi.....	127
3.3.9.	Yanma davranışı testi.....	129
3.4.	Aerjellerin optimizasyonu.....	129
3.5.	Aerjellerin ve aerjel kompozitlerin sentezlenmesi.....	132
3.6.	Aerjel kompozitlerin test kutusu olarak dizaynı .....	134
4.	BULGULAR VE TARTIŞMA.....	136
4.1.	Hammaddelerin karakterizasyon sonuçları.....	136
4.2.	Aerjellerin SEM-EDX analizi sonuçları.....	141
4.3.	Aerjellerin FT-IR analizi sonuçları .....	144
4.4.	Aerjellerin XRD analizi sonuçları.....	147
4.5.	Aerjellerin yoğunluk ve porozite hesaplaması sonuçları .....	150
4.6.	Aerjellerin ısıl iletkenlik analizi sonuçları .....	151
4.7.	Aerjellerin basınç deneyi sonuçları.....	152
4.8.	Aerjellerin yanma davranışı testi sonuçları .....	156
4.9.	Termal kamera analizi sonuçları .....	162
4.9.1.	Aerjellerin termal kamera analizi sonuçları.....	162
4.9.2.	Aerjel kompozitlerin termal kamera analizi sonuçları .....	168
4.9.3.	Aerjel kompozit kutuların termal kamera analizi sonuçları.....	172
4.9.4.	Aerjel kompozit kutuların iç ortam sıcaklık ölçüm sonuçları.....	178
5.	SONUÇLAR VE ÖNERİLER .....	184
	KAYNAKÇA .....	186

## ŞEKİLLER LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 2.1. Yaşam döngüsü değerlendirme aşamaları. ....	9
Şekil 2.2. Türkiye’de EEBT yaklaşımıyla inşa edilen ilk pilot uygulama.....	11
Şekil 2.3. Türkiye geneli binaların 2025 yıl sonu itibarıyla EKB sınıfı dağılımları.....	11
Şekil 2.4. Türkiye’nin enerji verimliliği uygulamalarındaki önemli durakları.....	14
Şekil 2.5. TS 825/2025 standardına göre Türkiye derece-gün bölgeleri. ....	15
Şekil 2.6. Kristal yapıdaki malzemelerin ısı iletim mekanizması.....	23
Şekil 2.7. Gözenekli yapılarda ısı iletim mekanizması.....	24
Şekil 2.8. Isı transfer mekanizmaları. ....	25
Şekil 2.9. Isı yalıtım malzemelerinin sınıflandırılması. ....	29
Şekil 2.10. Farklı formlarda üretilen taş yünü (a-b-c), cam yünü (d-e-f) ve genişletilmiş perlit (g-h-ı) (İzocam, 2026; Gnyapı, 2026; Sadıkoğlu Yalıtım, 2026; Kaleperlit, 2026; Aspayapı, 2026). ....	30
Şekil 2.11. Gazbeton (a), bims (b) ve geleneksel tuğla örnekleri (c).....	32
Şekil 2.12. EPS (a), XPS (b), PUR (c) ve PIR (d-e) yalıtım malzemeleri örnekleri (Poytherm, 2026; İzocam, 2026; Turkchem, 2026; Çatıdünyası, 2026; Inkafixing, 2026). ....	34
Şekil 2.13. PVC (a) ve fenol köpük (b) örnekleri (Insapedia, 2026 ve Yupsenipvs, 2026). ....	36
Şekil 2.14. Aerojel (a-b), vakum yalıtım paneli (c) ve PCM (d) uygulama örnekleri (İzomarket, 2026 ve Insapedia, 2026). ....	37
Şekil 2.15. ECB ve biyokütle esaslı yalıtım malzemeleri (Insapedia, 2026).....	40
Şekil 2.16. Yaygın kullanılan ısı yalıtım malzemelerinin ısıl iletkenlik katsayıları. ....	46
Şekil 2.17. Bodrum ve döşemelerde ısı yalıtım uygulama örnekleri (Ytong, 2026 ve Bysyalıtım, 2026). ....	62
Şekil 2.18. Farklı yalıtım malzemeleri kullanılarak gerçekleştirilen mantolama uygulamaları (Hepsiemlak, 2026 ve Mecidoğluyapı, 2026. ....	62
Şekil 2.19. Farklı yalıtım malzemeleri kullanılarak gerçekleştirilen çatı yalıtımı (Gunogluizolasyon, 2026 ve Elveren, 2026).....	63
Şekil 2.20. Yapı bileşenlerine göre ısı kayıplarının dağılım grafiği. ....	63
Şekil 2.21. Dış duvar yalıtım uygulaması. ....	65
Şekil 2.22. İç duvar yalıtım uygulaması. ....	66

<b>Şekil 2.23.</b> Sandviç duvar yalıtım uygulaması.....	66
<b>Şekil 2.24.</b> Geleneksel çatı ve soğuk çatıların yansıtma özelliği.....	68
<b>Şekil 2.25.</b> Yalıtım camı kesiti (İzoder, 2026).....	69
<b>Şekil 2.26.</b> Tek camlı pencere sistemi (a, c) ve çift camlı pencere sistemi (b, d) (Gursanglass, 2026). ....	70
<b>Şekil 2.27.</b> Yapı temellerinde yalıtım uygulaması kesiti (Cevikizolasyon, 2026).....	70
<b>Şekil 2.28.</b> Toprağa basan döşeme ve arakat döşemelerde yalıtım uygulaması (İzoder, 2026). ..	71
<b>Şekil 2.29.</b> Su boruları (a) ve tesisatlarda yalıtım uygulamaları (b) (İzoteknik, 2026 ve Ihouses, 2026). ....	72
<b>Şekil 2.30.</b> Aerojellerin çeşitli uygulama alanları.....	78
<b>Şekil 2.31.</b> Farklı türlerde ve formlarda üretilen aerojel örnekleri. ....	79
<b>Şekil 2.32.</b> Toz ve lif (fiber) formlarda sentezlenen silika aerojellerin mikro yapı farklılıkları...80	
<b>Şekil 2.33.</b> Farklı bileşimlerle sentezlenen aerojel örnekleri.....	83
<b>Şekil 2.34.</b> Nano malzeme sentez yöntemleri.....	85
<b>Şekil 2.35.</b> Hidroliz, yoğuşma ve jelleşme reaksiyonları.....	87
<b>Şekil 2.36.</b> Hidrojelden aerojеле dönüşüm süreci ve ürünün mikro yapısı. ....	88
<b>Şekil 2.37.</b> Doğal hammadde kökenli silika kaynakları (Tasisat, 2026; Canerkaraguler, 2026; Sempas, 2026; Volkanatabey, 2026).....	89
<b>Şekil 2.38.</b> Silika açısından zengin endüstriyel kaynaklar (Akerkimya, 2026; Erdoganlargida, 2026; Camkumu, 2026; Vietnam, 2026; Arex, 2026).....	90
<b>Şekil 2.39.</b> Jel oluşumunun aşamaları.....	91
<b>Şekil 2.40.</b> Aerojel sentezinde çözücü değişimi. ....	92
<b>Şekil 2.41.</b> Farklı kurutma yöntemlerinin aerojelin mikro yapısına etkisi.....	93
<b>Şekil 2.42.</b> Dondurarak kurutma yöntemiyle aerojel hazırlanma süreci.....	96
<b>Şekil 2.43.</b> Selüloz kökenli bir aerojel numunesinde farklı kurutma yöntemlerinin mikro yapıya etkisi.....	97
<b>Şekil 2.44.</b> Aerojel yalıtım malzemelerinde ısı transfer mekanizması. ....	99
<b>Şekil 2.45.</b> Yapı sektöründe kullanılan tipik aerojel formları.....	103
<b>Şekil 2.46.</b> Çeşitli formlarda aerojel yalıtım malzemeleri. a) şilte form, b) levha form (Therealtytoday, 2026).....	104
<b>Şekil 2.47.</b> Saydam yapı elemanları ve cam sistemlerinde aerojel uygulama örnekleri (Kierantimberlake, 2026). ....	105
<b>Şekil 2.48.</b> Aerojel sıva uygulaması öncesi (a) ve sonrası (b) görüntüleri. ....	106

<b>Şekil 2.49.</b> Aerojel katkılı köpük beton uygulaması. a) el örnekleri ve b) mikroskopik yapısı..	108
<b>Şekil 2.50.</b> Levha formundaki aerojeller ve uygulaması (Tapecompanies, 2026).....	109
<b>Şekil 2.51.</b> Kompozit bir malzemenin içerdiği faz bileşenleri.....	110
<b>Şekil 2.52.</b> Karbon fiber ve karbon aerojellerin SEM görüntüleri.....	111
<b>Şekil 2.53.</b> Standart kum içeren harç ve aerojel katkılı harcın SEM görüntüleri. ....	112
<b>Şekil 2.54.</b> Farklı PVA içeriklerine sahip polimer katkılı aerojellerin SEM görüntüleri. ....	114
<b>Şekil 3.1.</b> Sentez sırasında kullanılan silika kaynakları.....	119
<b>Şekil 3.2.</b> Taramalı elektron mikroskobu (a) ve kaplama cihazı (b) görünümü. ....	122
<b>Şekil 3.3.</b> Fonksiyonel grupların tespitinde kullanılan FT-IR spektroskopisi cihazı.....	123
<b>Şekil 3.4.</b> Kristal yapı tespitinde kullanılan XRD cihazı. ....	123
<b>Şekil 3.5.</b> Kimyasal bileşimin tespitinde kullanılan XRF cihazı. ....	124
<b>Şekil 3.6.</b> Termal kamera test düzeneği. ....	126
<b>Şekil 3.7.</b> Test kutularının sıcaklık ölçümünde kullanılan termal kamera test düzeneği ve arduino sistemi. ....	126
<b>Şekil 3.8.</b> Isıl iletkenlik ölçüm cihazı.....	127
<b>Şekil 3.9.</b> Basınç dayanımı deney düzeneği.....	128
<b>Şekil 3.10.</b> Islak jellerin hazırlanması. ....	130
<b>Şekil 3.11.</b> Kalıba alınmış ıslak jeller (sol) ve kurutma sonrası görünümleri (sağ).....	130
<b>Şekil 3.12.</b> Dondurma ve kurutma aşamaları ile nihai ürünlerin genel görünümü. ....	131
<b>Şekil 3.13.</b> Farklı PVA oranlarında hazırlanan aerojellerin fiziki görünümü.....	131
<b>Şekil 3.14.</b> Aerojellerin sentez aşamaları.....	133
<b>Şekil 3.15.</b> LWA-Kompozitlerin kalıba alınması ve kurutma sonrası görünümü. ....	133
<b>Şekil 3.16.</b> LWA-Kompozit örneği ve şematik gösterimi. ....	134
<b>Şekil 3.17.</b> Elde edilen üç farklı LWA-Kompozit örneği. ....	134
<b>Şekil 3.18.</b> Alçıpan duvarlara sahip test kutusu tasarımı ve arduino düzeneği.....	135
<b>Şekil 4.1.</b> Ham diyatomitin SEM analiz görüntüleri.....	137
<b>Şekil 4.2.</b> Ham diyatomitin EDX analiz sonuçları.....	138
<b>Şekil 4.3.</b> Ham taban külünün 10KX büyütmede SEM analiz görüntüsü. ....	139
<b>Şekil 4.4.</b> Ham taban külünün EDX analiz sonuçları. ....	139
<b>Şekil 4.5.</b> Ham uçucu külün 10KX büyütmede SEM analiz görüntüsü.....	140
<b>Şekil 4.6.</b> Ham uçucu külün EDX analiz sonuçları.....	140
<b>Şekil 4.7.</b> DT-LWA numunesinin SEM analiz görüntüleri. a) 300 X büyütmedeki gözenek yapısı, b) 1000 X büyütmedeki gözenek yapısı görünümü.....	141

<b>Şekil 4.8.</b> TK-LWA numunesinin SEM analiz görüntüleri. a) 300 X büyütmedeki gözenek yapısı, b) 1000X büyütmedeki gözenek yapısı görünümü.....	<b>141</b>
<b>Şekil 4.9.</b> UK-LWA numunesinin SEM analiz görüntüleri. a) 300 X büyütmedeki gözenek yapısı, b) 1000 X büyütmedeki gözenek yapısı görünümü.....	<b>142</b>
<b>Şekil 4.10.</b> DT, UK ve TK-LWA numunelerinin EDX analiz sonuçları.....	<b>143</b>
<b>Şekil 4.11.</b> Farklı polimer oranına sahip DT-LWA numunelerin FT-IR grafiği.....	<b>144</b>
<b>Şekil 4.12.</b> Ham uçucu kül ve uçucu kül katkıli aerojelin FT-IR grafiği.....	<b>146</b>
<b>Şekil 4.13.</b> Ham taban külü ve taban külü katkıli aerojellerin FT-IR grafiği.....	<b>146</b>
<b>Şekil 4.14.</b> Ham diyatomit ve diyatomit katkıli aerojelin FT-IR grafiği.....	<b>147</b>
<b>Şekil 4.15.</b> Ham diyatomit ve diyatomitle sentezlenen aerojelin XRD grafiği.....	<b>148</b>
<b>Şekil 4.16.</b> Ham uçucu kül ve uçucu külle sentezlenen aerojelin XRD grafiği.....	<b>149</b>
<b>Şekil 4.17.</b> Ham taban külü ve taban külü ile sentezlenen aerojelin XRD grafiği.....	<b>150</b>
<b>Şekil 4.18.</b> DT-LWA numunesinin gerilme-şekil değiştirme grafiği.....	<b>153</b>
<b>Şekil 4.19.</b> TK-LWA numunesinin gerilme-şekil değiştirme grafiği.....	<b>154</b>
<b>Şekil 4.20.</b> UK-LWA numunesinin gerilme-şekil değiştirme grafiği.....	<b>155</b>
<b>Şekil 4.21.</b> DT- LWA ve DT-LWA kaplanmış numunenin yanma testi.....	<b>157</b>
<b>Şekil 4.22.</b> TK- LWA ve TK-LWA-Kaplanmış numunenin yanma testi.....	<b>158</b>
<b>Şekil 4.23.</b> UK- LWA ve UK-LWA-Kaplanmış numunenin yanma testi.....	<b>159</b>
<b>Şekil 4.24.</b> UK- LWA-Kaplanmış ve TK-LWA-Kaplanmış numunelerin uzun süreli yanma testi.....	<b>160</b>
<b>Şekil 4.25.</b> Termal kamera ölçüm düzeneği.....	<b>163</b>
<b>Şekil 4.26.</b> Aerojel numunelerin termal kamera ölçüm sonuçları.....	<b>164</b>
<b>Şekil 4.27.</b> TK-LWA numunesinin ısınma ve soğuma grafikleri ile termal kamera görüntüleri.....	<b>165</b>
<b>Şekil 4.28.</b> UK-LWA numunesinin ısınma ve soğuma grafikleri ile termal kamera görüntüleri.....	<b>166</b>
<b>Şekil 4.29.</b> DT-LWA numunesinin ısınma ve soğuma grafikleri ile termal kamera görüntüleri.....	<b>167</b>
<b>Şekil 4.30.</b> TK-LWA-Kompozitin ısınma ve soğuma grafikleri ile termal kamera görüntüleri.....	<b>169</b>
<b>Şekil 4.31.</b> UK-LWA-Kompozitin ısınma ve soğuma grafikleri ile termal kamera görüntüleri.....	<b>170</b>
<b>Şekil 4.32.</b> DT-LWA-Kompozitin ısınma ve soğuma grafikleri ile termal kamera görüntüleri.....	<b>171</b>

<b>Şekil 4.33.</b> Alçıpandan yapılmış test kutusunun ısınma ve soğuma grafikleri ile termal kamera görüntüleri. ....	<b>173</b>
<b>Şekil 4.34.</b> TK-LWA test kutusunun ısınma ve soğuma grafikleri ile termal kamera görüntüleri. ....	<b>174</b>
<b>Şekil 4.35.</b> UK-LWA test kutusunun ısınma ve soğuma grafikleri ile termal kamera görüntüleri. ....	<b>175</b>
<b>Şekil 4.36.</b> DT-LWA test kutusunun ısınma ve soğuma grafikleri ile termal kamera görüntüleri. ....	<b>176</b>
<b>Şekil 4.37.</b> DT-LWA test kutusunun kutu içi sıcaklık grafiği. ....	<b>179</b>
<b>Şekil 4.38.</b> TK-LWA test kutusunun kutu içi sıcaklık grafiği. ....	<b>180</b>
<b>Şekil 4.39.</b> UK-LWA test kutusunun kutu içi sıcaklık grafiği. ....	<b>181</b>

## TABLolar LİSTESİ

	Sayfa
<b>Tablo 2.1.</b> Yapı elemanları için tavsiye edilen ısıl geçirgenlik üst limitleri.....	15
<b>Tablo 2.2.</b> Isı yalıtım malzemelerinin teknik ve mekanik özelliklerinin karşılaştırması. ....	43
<b>Tablo 2.3.</b> Isı yalıtım malzemelerinin yangına dayanım açısından sınıflandırılması.....	53
<b>Tablo 2.4.</b> Isı yalıtım malzemelerinin ekonomik ve çevresel özelliklerinin karşılaştırması .....	56
<b>Tablo 2.4.</b> Isı yalıtım malzemelerinin ekonomik ve çevresel özelliklerinin karşılaştırması (Devamı) .....	57
<b>Tablo 3.1.</b> Tez çalışması sırasında hazırlanan numunelerin kodları ve tanımları. ....	116
<b>Tablo 3.2.</b> LWA numunelerin hazırlanmasında kullanılan sentez parametreleri. ....	132
<b>Tablo 4.1.</b> Hammaddelerin XRF analiz sonuçları. ....	136
<b>Tablo 4.2.</b> FT-IR spektrumlarındaki karakteristik titreşim frekansları. ....	145
<b>Tablo 4.3.</b> Sentezlenen arojellerin kütle, boyut ve hacimleri. ....	150
<b>Tablo 4.4.</b> Sentezlenen arojellerin yoğunluk ve gözeneklilik değerleri. ....	151
<b>Tablo 4.5.</b> Optimizasyon çalışmalarından elde edilen arojellerin termal görüntüleme analiz sonuçları. ....	163
<b>Tablo 4.6.</b> LWA numuneleri için ölçüm noktalarından alınan sıcaklık değerleri. ....	168
<b>Tablo 4.7.</b> LWA-Kompozit numuneleri için ölçüm noktalarından alınan sıcaklık değerleri.....	172
<b>Tablo 4.8.</b> LWA-Kutu numuneleri için ölçüm noktalarından alınan sıcaklık değerleri.....	177
<b>Tablo 4.9.</b> Isınma fazında kaydedilen sıcaklık değişimleri. ....	182
<b>Tablo 4.10.</b> Soğuma fazında kaydedilen sıcaklık değişimleri. ....	182

## KISALTMALAR VE SİMGELER LİSTESİ

**%:** Yüzde

**Δ:** Delta

**3D:** Üç Boyutlu

**AB:** Avrupa Birliği

**ABD:** Amerika Birleşik Devletleri

**ASTM:** Amerikan Test ve Malzeme Derneği

**BEP:** Binalarda Enerji Performansı

**BM:** Birleşmiş Milletler

**BREEAM:** Yapı Araştırma Kurumu Çevresel Değerlendirme Metodu (Building Research Establishment Environmental Assessment Method)

**cm:** Santimetre

**CMC:** Karboksümetil Selüloz

**CVD:** Kimyasal Buhar Biriktirme

**DHT:** Dijital Nem ve Sıcaklık

**DIN:** Alman Standartlar Enstitüsü

**dk:** Dakika

**DT:** Diyatomit

**ECB:** Genleştirilmiş Mantar Levha

**EDX:** Enerji Dağıtıcılı X-ışınları Spektroskopisi

**EEBT:** Enerji Etkin Bina Tasarımı

**EED:** Enerji Verimliliği Direktifi

**EKB:** Enerji Kimlik Belgesi

**EN:** Avrupa Standardı

**EPB:** Genleştirilmiş Perlit

**EPBD:** Energy Performance of Buildings Directive (Binalarda Enerji Performansı Direktifi)

**EPD:** Çevresel Ürün Beyanları

**EPS:** Genleştirilmiş Polistiren

**FT-IR:** Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektroskopisi

**g:** Gram

**g:** Yer Çekimi İvmesi

**GES:** Güneş Enerji Santrali

**GHG:** Sera Gazı Emisyonu

**GWP:** Global Warming Potential- Küresel Isınma Potansiyeli

**HFC:** Hidroflorokarbon

**HTC:** Isı Transfer Katsayısı

**IEA:** Uluslararası Enerji Ajansı

**IR:** Infrared (Kızılötesi) Işımlar

**ISO:** Uluslararası Standardizasyon Örgütü

**IUPAC:** Uluslararası Saf ve Uygulamalı Kimya Birliği

**K:** Kelvin

**KDV:** Katma Değer Vergisi

**KfW:** Kreditanstalt für Wiederaufbau -Yeniden Yapılanma Kredi Kurumu

**kg:** Kilogram

**KOBİ:** Küçük ve Orta Büyüklükteki İşletme

**LCA:** Life Cycle Analysis -Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi

**LCCA:** Life Cycle Cost Analysis-Yaşam Döngüsü Maliyet Analizi

**LEED:** Enerji ve Çevresel Tasarımda Liderlik (Leadership in Energy and Environmental Design)

**LWA:** Light Weight Aerogel-Hafif Aerojel

**mg:** Miligram

**ml:** Mililitre

**mm:** Milimetre

**MÖ:** Milattan Önce

**MPa:** Mega Paskal

**Mtep:** Milyon Ton Eşdeğer Petrol

**MTMS:** Metil Trimetoksi Silan

**MW:** Mineral Yünü

**nm:** Nanometre

**nSEB:** Neredeyse Sıfır Enerjili Binalar

**°C:** Santigrat Derece

**PCM:** Faz Değiştiren Malzemeler

**PEDS:** Polietoksidisiloksan

**PF:** Fenol Köpüğü

**pH:** Hidrojen İyonu Derişimi (Potansiyel Hidrojen)

**PIR:** Poliizosiyanürat

**Pt:** Platin

**PUR:** Poliüretan Köpük

**PVA:** Polivinil Alkol

**PVC:** Polivinil Klorür

**R-Değeri:** Isıl Direnç

**rpm:** Revolutions Per Minute (Dakikadaki Devir Sayısı)

**SEM:** Taramalı Elektron Mikroskobu

**SI:** Uluslararası Birim Sistemi

**TEOS:** Tetraetil Ortosilikat

**TEP:** Ton Eşdeğer Petrol

**TK:** Taban Külü

**TMOS:** Tetrametil Ortosilikat

**TS:** Türk Standardı

**U- Değeri:** Isı Geçirgenlik Katsayısı

**UEVP:** Ulusal Enerji Verimliliği Strateji Belgesi ve Eylem Planı

**UK:** Uçucu KİL

**UNFCCC:** İklım Değişikliği ereve Sözleşmesi

**US\$:** Amerikan Doları

**UV:** Ultraviyole (Morötesi) Işınlar

**VIP:** Vakum Yalıtım Paneli

**VOC:** Uçucu Organik Bileşik

**WD:** Working Distance (alışma Aralığı)

**XPS:** Ekstrüde Polistiren

**XRD:** X-Işını Kırınım Analizi

**YDD:** Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi

**YDMA:** Yaşam Döngüsü Maliyet Analizi

**YEK:** Yenilenebilir Enerji Kaynakları

**Yes-TR:** Ulusal Yeşil Sertifika Sistemi

**μ:** Mikron

## 1. GİRİŞ

Enerji; modern toplumların ekonomik büyümesi, teknolojik gelişimi ve yaşam kalitesinin sürdürülmesinde temel faktör olarak kabul edilmektedir. İnsanlık tarihi boyunca, ilk dönemlerden bu yana farklı formlarda kullanılan enerji, özellikle sanayi devriminden itibaren artan üretim kapasitesi ve hızla büyüyen kentleşme süreçleriyle birlikte küresel ölçekte daha kritik bir hal almıştır (Onwe vd., 2024). Nüfus artışı, sanayileşme, kentleşme ve dijitalleşme süreçleriyle birlikte enerji talebi hızla yükselmektedir. Bu talep, mevcut enerji kaynaklarının sınırlı olması nedeniyle hem ekonomik hem de çevresel boyutta sorunlara yol açmaktadır. Bu durum, mevcut enerji kaynaklarının daha etkin ve sürdürülebilir biçimde kullanımını zorunlu kılmaktadır.

Günümüzde küresel enerji tüketiminin yaklaşık %80 kadarı kömür, petrol ve doğal gaz gibi fosil kökenli enerji kaynaklarından karşılanmaktadır (Nasr vd., 2023). Bu durumun bir sonucu olarak her yıl yaklaşık 50 milyar ton sera gazı atmosfere salınmaktadır. Uluslararası Enerji Ajansı (IEA) verilerine göre sera gazı emisyonlarının (GHG) dörtte üçü doğrudan enerji kullanımına bağlı olup, bu durum iklim değişikliğinin en önemli nedeni olarak görülmektedir (Lindstad vd., 2023). İklim değişikliği ile mücadele kapsamında 2015 yılında imzalanan Paris Anlaşması ve Birleşmiş Milletler Sürdürülebilir Kalkınma Hedefleri, enerji verimliliğini küresel ölçekte en önemli politika araçlarından biri olarak öne çıkarmaktadır. Paris Anlaşması, küresel sıcaklık artışını 1,5 °C sınırının altında tutmayı hedeflemektedir. Buna ek olarak Avrupa Yeşil Mutabakatı da düşük karbonlu ekonomiye geçişi hızlandırmaktadır. Söz konusu uygulamalar, yapı sektörü gibi yüksek enerji tüketimi ve emisyon üretimine sahip alanları bu dönüşümün merkezine yerleştirmektedir (Lozinsky vd., 2025).

İnşaat sektörü, küresel ekonomik yapının temel bileşenlerinden biri olup dünya genelinde ekonomik üretimin yaklaşık %10-12'sini oluşturmaktadır (Domljan ve Domljan, 2024). Sektör aynı zamanda toplam hammadde kullanımının yaklaşık %50'sini ve küresel ölçekte toplam enerjinin büyük bir kısmını tüketerek yüksek düzeyde kaynak talebi oluşturmaktadır. Uluslararası raporlara göre, binalar küresel ölçekte enerji tüketiminin yaklaşık %30-40'ından, doğrudan ve dolaylı sera gazı emisyonlarının ise yaklaşık %35-37'sinden sorumludur (Gupta & Deb, 2023). Yapılarda etkin yalıtım uygulamaları ile bina içi termal konfora ek olarak kış aylarında ısınma yüklerinin azaltılması sağlanmaktadır. Günümüzde gazbeton, taş yünü, cam yünü, genleştirilmiş polistiren (EPS), ekstrüde polistiren (XPS) gibi geleneksel malzemelerin yanı sıra aerojel, faz değiştiren malzemeler (PCM), vakum yalıtım panelleri (VIP) ve biyo-bazlı malzemeler kullanılarak yalıtım uygulamaları gerçekleştirilebilmektedir. Yalıtım malzemeleri levha, film, lifli veya parçacıklı formlarda olabileceği gibi aynı yapıların mekanik veya kimyasal

olarak bağlanmasıyla elde edilen kompozit türlerde de üretilmektedir (Fawaier & Bokor, 2022).

Doğru malzeme seçimi ve uygulanması, binaların enerji performansını iyileştirerek hem ekonomik hem de çevresel açıdan faydalar sağlamaktadır. Küresel ısınma ile birlikte dış ortam sıcaklıkları değişirken, sabit bir iç ortam sıcaklığı elde etmek ve yaşam konforunu iyileştirmek amacıyla yeni nesil yalıtım teknolojileri daha önemli hale gelmektedir (Aruta vd., 2025). Geleneksel yalıtım malzemelerinin çoğunun, üretim süreçleri sırasında yüksek karbon ayak izine sahip olduğu bilinmektedir. Ancak yenilikçi ve doğal yalıtım malzemeleri gibi geri dönüştürülebilir ürünler bu olumsuz etkiyi azaltarak çevre dostu alternatif sunmaktadır. Bu malzemeler, geri dönüşüm potansiyeli ve uzun ömürlü kullanımları sayesinde yüksek performansa ek olarak karbon emisyonlarını düşürmeye de yardımcı olmaktadır.

Günümüzde sektörün enerji yükünü azaltmak amacıyla nanoteknoloji tabanlı çözümler yaygın kullanılmaktadır. Vakumlu izolasyon panelleri, grafit tozu katkı maddesi eklenerek genişletilmiş polistiren ürünleri, aerojeller, nano-seramik ısı yalıtım kaplamalar ve faz değiştiren yapı malzemeleri piyasada halihazırda kullanılan ve yapılarda enerji verimliliği sağlayan alternatifler olarak öne çıkmaktadır. Bu bağlamda, nano malzemeler arasında özellikle aerojeller en dikkat çekici olanlarından biridir. Aerojel türleri; silika, selüloz, karbon ve alümina aerojellerden kompozit aerojele kadar farklılık gösterebilmektedir. Bunlar; %99'a varan gözeneklilikleri, düşük yoğunlukları, geniş yüzey alanları ve düşük ısı iletkenlikleri sayesinde "*süper yalıtım malzemeleri*" olarak tanımlanmaktadır (J. Liu vd., 2022). Bu özellikleri nedeniyle aerojeller, geleneksel yalıtım malzemelerine kıyasla çok daha düşük termal direnç sağlamakta, aynı zamanda hafiflik ve çok yönlülük sunmaktadır (J. Zhang vd., 2023). Aerojellerin yalıtım alanında yakın gelecekte en önemli yapı malzemelerinden biri olması beklenmektedir. Hem pasif evlerde hem de sıfır enerjili binalarda enerji verimliliğini artırmada ve sera gazı etkisinin azaltılmasında önemli bir yer tutacağı ön görülmektedir. Aerojeller, yalnızca harç ve sıva katkısı olarak değil, aynı zamanda duvar yalıtım levhaları, köpük beton ve ısı yalıtım kaplamaları gibi farklı formlarda üretilerek yapı sektöründe kullanılmaktadır. Aerojel katkılı kompozitlerde ise genellikle daha düşük yoğunluk ve ısı iletkenlik elde edildiğinden, yapı kabuğunda sağlanan enerji verimliliği önemli ölçüde artmakta ve geleneksel yalıtım malzemelerine kıyasla sera gazı emisyonlarının %65'e kadar azaltılabileceği bildirilmektedir (Lamy-Mendes vd., 2021). Bununla birlikte, ticari üretim süreçlerinin karmaşıklığı ve hammadde maliyetlerinin yüksek olması, aerojel kullanımının yaygınlaşmasını engellemektedir. Günümüzde aerojel yalıtımının geleneksel yalıtım malzemelerine kıyasla metrekare başına 25 kat daha maliyetli olduğu bilinmektedir (Balaji vd., 2022).

Aerogellerin üretiminde maliyeti düşürmek, çevresel etkiyi azaltmak ve sürdürülebilirliği sağlamak amacıyla alternatif hammaddelerin geliştirilmesi büyük önem taşımaktadır. Son yıllarda bu yönde yapılan çalışmalar, silika açısından zengin endüstriyel atıkların ve doğal kaynakların aerogel sentezinde alternatif hammadde olarak kullanılabilmesini göstermektedir. Bu yaklaşım hem aerogelin yüksek maliyet sorununu azaltmakta hem de endüstriyel sürdürülebilirliğe destek olmaktadır. Ayrıca yöntem; atık yönetimi, ekonomik fayda ve döngüsel ekonomi hedefleriyle de uyum sağlamaktadır.

### **1.1. Tez çalışmasının amacı**

Bu tez çalışmasının amacı; uçucu kül ve taban külü gibi endüstriyel atıklardan ve diatomit gibi kolay ulaşılabilir, zararsız, ucuz ve doğal silika kaynaklarından; hafif, gözenekli ve düşük ısı iletkenliğe sahip aerogel kompozitler elde etmektir.

Bu doğrultuda araştırma hedefleri şunlardır:

Endüstriyel atık olarak ortaya çıkan ürünlerin ve doğal kaynakların düşük maliyetli aerogel yapılara dönüştürülmesi,

Hafif aerogel olarak adlandırılan bu ürünleri alçı levha ile birleştirerek yalıtım kompozitlerinin geliştirilmesi,

Aerogel kompozitlerin gerçek oda koşullarını yansıtmaları amacıyla test kutusu şeklinde dizayn edilmesi,

Elde edilen aerogellerin mikro yapı, mekanik dayanım, yanma davranışı ve ısı iletkenliklerinin incelenmesi,

Üretilen malzemelerin geleneksel yalıtım ürünleriyle karşılaştırılması ve enerji verimliliği açısından potansiyelinin ortaya konulması,

Geliştirilen malzemelerin yapı sektöründe yalıtım amacıyla kullanılabilen, çevreci, düşük maliyetli ve sürdürülebilirlik özelliklerinin ortaya konulmasıdır.

Bu tez çalışması; çeşitli endüstriyel atıkların katma değeri yüksek ürünlere dönüştürülmesi, endüstriyel atık ve doğal hammadde kullanımı ile çevresel sürdürülebilirliğe katkı sağlanması ve üretim maliyetlerinin azaltılması yönüyle oldukça önemlidir.

Ayrıca; nanoteknolojik yöntemler kullanılarak hazırlanmış yenilikçi ürünlerin yapı sektöründe kullanılabilirliğinin artırılması ve üstün ısı yalıtım performansı sayesinde enerji verimliliğine katkı sağlanması yönüyle de dikkat çekicidir. Buna ek olarak; tez çalışmasından elde edilen araştırma bulgularının literatürde önemli bir yer tutacağı düşünülmektedir.

## 1.2. Tez çalışmasının kapsamı

Tez çalışması kapsamında; hafif aerjel (LWA) olarak adlandırılan ürünler, termik santral atığı olan uçucu kül ve taban külü ile doğal taş türü olan diyatomit kullanılarak sentezlenmiştir. Sentez sırasında; mevcut çalışmalardaki geleneksel ekstraksiyon yöntemleri gibi ön işlem uygulanmadan; uçucu kül, taban külü ve diyatomit doğrudan silika kaynağı olarak kullanılmıştır. Sentezlenen hafif, süngerimsi yapıdaki aerjeller alçıpan ile birleştirilmiş ve binalarda enerji verimliliği sağlamada kullanılacak ısı yalıtım kompozitleri (LWA-Kompozit) elde edilmiştir. Sol jel yöntemiyle gerçekleştirilen sentezde bağlayıcı olarak polivinil alkol (PVA) ve karboksimetil selüloz (CMC) kullanılmıştır. Kurutma aşamasında dondurarak kurutma yöntemi tercih edilmiştir. Yöntemin avantajı olarak; çözücü olarak yalnızca su kullanılmış ve enerji tüketimine ek olarak sentez süresi de kısaltılmıştır.

Elde edilen yalıtım kompozitleri; “yalnızca aerjel yapılar” ve “hazır alçıpan üzerine entegre edilmiş aerjel yapılar” şeklinde gruplandırılarak karakterize edilmiştir. Alçıpansız numunelerin Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM-EDX), Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektroskopisi (FT-IR), X-Işını Kırınımı (XRD) analizleri yapılmış ve ısıl iletkenlik katsayıları ölçülmüştür. Ayrıca LWA numunelerin yoğunluk-gözeneklilik değerleri hesaplanmıştır. Ek olarak numunelerin termal kamera görüntüleri alınmış, yangın davranışı ve basınç dayanımı test edilmiştir. Alçıpan ile birleştirilerek hazırlanan LWA kompozitler ise alçıpan ile hazırlanan bir test kutusu düzeneğine entegre edilerek termal kamera görüntüleri alınmış, aynı zamanda Arduino DHT11 sensörü ile kutu içi sıcaklıklar ölçülmüştür. Bu bağlamda; yöntem yaklaşımı ve yapı sektöründe ısı yalıtım uygulamaları açısından değerlendirildiğinde bu tez çalışması özgün bir katkı sunmaktadır.

## 2. KURAMSAL VE KAVRAMSAL TEMELLER

Günümüzde binaların enerji performansını artırmak, enerji verimliliği adına en stratejik hedeflerden biri haline gelmiştir. Isı yalıtımı, yapı kabuğundaki enerji kayıplarını minimize eden en temel uygulamadır. Bu bağlamda aerjeller; ultra düşük yoğunlukları, benzersiz gözenek yapıları ve üstün ısı yalıtım performanslarıyla yapı sektörü için yüksek potansiyelli çözümler sunmaktadır. Ancak geleneksel aerjel üretiminde kullanılan toksik etkiye sahip silika öncülleri ve süperkritik kurutma gibi maliyetli kurutma süreçleri, aerjellerin ticari olarak yaygınlaşmasının önündeki en büyük engellerdendir. Bu tez çalışması, endüstriyel atıkları ve doğal taş kaynaklarını hammadde olarak kullanarak hem düşük maliyetli aerjel üretmeyi hem de çevresel sürdürülebilirliğe katkı sağlamayı amaçlamaktadır. Bu kapsamda; üretilen aerjellerin binalarda ısı yalıtım malzemesi olarak kullanılabilirliği araştırılmıştır.

Aerojel sentezine ilişkin mevcut literatür çalışmaları incelendiğinde atık temelli silika kaynağı kullanımının sınırlı olduğu görülmektedir. Özellikle uçucu kül, taban külü ve diyatomit bazlı aerojel sentez çalışmalarının az sayıda olduğu söylenebilmektedir. Atık kullanımıyla gerçekleştirilen bu sınırlı çalışmalarda silika ekstraksiyonu ve çeşitli ön işlem süreçlerinin yüksek maliyetli olduğu dikkat çekmektedir. Ayrıca aerojel sentezine dair gerçekleştirilen çalışmaların çoğunluğu uygulamaya dökülmemiş ve yapı malzemelerine entegre edilmemiştir. Bu kapsamda aerojelin alçı levhalarla birleştirilmesine yönelik uygulamaların ve termal kamera ile sensörlerin birlikte kullanıldığı testlerin ender bulunduğu görülmüştür. Bu tez çalışması; düşük üretim maliyeti ve yapı malzemelerine uygulanabilirliği bakımından literatürdeki bu boşluğu doldurmayı hedeflemektedir. Bu bağlamda nanoteknoloji yöntemlerinin sağlayacağı avantajlardan faydalanılarak elde edilen düşük ısı iletkenliğe sahip yalıtım malzemeleri hem bilimsel hem de endüstriyel üretimler için önem arz edecektir. Silika kaynağı olarak hem endüstriyel atıkların hem de doğal malzemelerin kullanımıyla gerçekleştirilen maliyet etkin, sürdürülebilir ve çevre dostu aerojel sentezi bu çalışmanın özgün değeri olarak ortaya konulmuştur. Böylece yalnızca yapı sektöründe enerji verimliliğini artıracak yeni nesil yalıtım malzemeleri geliştirilmekle kalmayıp, aynı zamanda atık yönetimi ve çevresel sürdürülebilirliğe de katkı sağlanmıştır. Sentezlenen aerojel kompozitlerin yoğunluk, gözeneklilik, mekanik dayanım, ısı iletkenlik ve yanma davranışlarının detaylı olarak incelenmesiyle literatürdeki önemli bir boşluk doldurulmuş olup gelecekte yapılacak araştırmalar için güçlü bir temel oluşturulmuştur.

## **2.1. Isı yalıtımının temelleri ve yalıtım malzemeleri**

Fosil yakıtlara olan bağımlılığın azaltılması, binalarda enerji ihtiyacının verimli bir şekilde karşılanması ve karbon ayak izinin düşürülmesi açısından bina kabuğunda gerçekleştirilen ısı yalıtım uygulamaları kritik öneme sahiptir. Bu amaçla son yıllarda hem mevcut binaların yenilenmesi hem de yeni binaların inşasında bina zarfının çeşitli bileşenleri için daha düşük ısı geçirgenlik değerlerini zorunlu tutan, daha sıkı ısı yalıtımı gereksinimleri içeren bina yönetmelikleri yürürlüğe konulmuştur (di Filippo vd., 2025). Artan uygulamalara rağmen mevcut yapı stokunda yalıtımsız bina sayısı oldukça fazladır ve bu durum ciddi enerji kayıplarını da beraberinde getirmektedir. Bu nedenle mevzuatlara ve standartlara uygun şekilde planlanan, doğru mühendislik uygulamaları ile desteklenmiş ısı yalıtım projelerinin yaygınlaştırılması önem arz etmektedir.

Günümüzde yaygın olarak kullanılan yalıtım malzemeleri arasında EPS, XPS, poliüretan (PUR), cam yünü, taş yünü, cam köpüğü, fenol köpüğü (PF) ve genleştirilmiş mantar levhalar (ECB) yer almaktadır. Bu malzemeler uzun yıllardır tercih edilmekle birlikte; düşük yangın

dayanımı, düşük mekanik dayanım, sınırlı kullanım ömrü, zayıf çevresel sürdürülebilirlik ve uzun vadede performans kayıpları konularında önemli kısıtlılıklar taşımaktadır (Gautam vd., 2024). Öte yandan, çimento esaslı yapı malzemeleri ise yüksek dayanım, dayanıklılık, güvenlik ve düşük maliyet gibi avantajlara sahip olmakla birlikte, yüksek ısı geçirgenlikleri nedeniyle enerji verimliliği açısından oldukça yetersiz kalmaktadır (Y. U. Kim vd., 2024). Bu nedenle geleneksel yalıtım malzemelerinin kısıtlılıklarının giderilmesi, mekanik ve termal özellikleri iyileştirilmiş daha yüksek performanslı, çevre dostu ve ekonomik açıdan sürdürülebilir yeni nesil yalıtım malzemelerin geliştirilmesi kaçınılmaz hale gelmiştir.

Yapı malzemelerinde üstün yalıtım performansı önemlidir ve enerji tasarrufunda ciddi bir etkiye sahiptir. Mevcut binalar genellikle ısı geçirgenliği yüksek, yalıtım özelliği zayıf malzemelerden yapılmaktadır. Mevcut yalıtım uygulamalarında ısı direnci artırmak amacıyla yalıtım malzemelerinin kalınlıkları artırılmaktadır. Malzeme kalınlığının artması yapı yükünün artmasına ve daha karmaşık yapı stokuna sebep olmaktadır. Malzemelerin yoğunluk, gözeneklilik ve özgül ısıları ısıyı emme, iletme veya depolama yeteneklerini etkileyen faktörlerdendir. Düşük yoğunluklu ve yüksek gözenek hacmi, malzeme içerisinde ısı transferini azaltmakta ve böylece daha iyi yalıtım performansı elde edilmektedir. Yapı malzemesinin gözenek miktarının artırılması ile ısı iletkenlik %80 oranına kadar azaltılabilmektedir. Yapılan araştırmalar, çimentolu kompozitler için gözenekliliğin %1 artırılmasının ısı iletkenlik değerinde %0,6 oranda azalma sağlayacağını ortaya koymaktadır (Shah vd., 2021). Aerojel, vermikülit, geliştirilmiş polistiren, geliştirilmiş perlit gibi malzemelerin agrega yerine kullanımı ise yapı yükünü azaltmanın yanı sıra ısı konforun da iyileştirilmesine katkı sağlamaktadır. Binaların sebep olduğu yüksek enerji tüketimini minimize etmek ve yapı dayanıklılığını artırmak amacıyla yenilikçi malzemelerin geliştirilmesi üzerine yapılan çalışmalar gün geçtikçe yaygınlaşmaktadır. Bu bağlamda nanoteknoloji, yapı sektöründe geleceğin enerji verimliliği çözümlerini şekillendiren ve yenilikçi çözümler sunan önemli bir bilimsel ve teknolojik alan haline gelmiştir (Y. Zhang vd., 2023).

Isı yalıtım sürecinin etkinliğini artırmak için; malzeme seçimi, montaj tekniklerinin doğruluğu, çevresel faktörler ve yapı tasarım süreçleri birlikte ele alınmalıdır. Bunlara ek olarak yönetmelikler, teşvik mekanizmaları, teknik eğitimler ve ekonomik destek programları da iyi uygulamaların yaygınlaşmasında ve enerji etkin binalara geçiş sürecinin hızlandırılmasında etkin rol oynamaktadır. Sonuç olarak; enerji verimliliğinin artırılması ve iklim değişikliğinin olumsuz etkilerinin azaltılması yolunda en etkili stratejilerden biri, binalarda uygulanacak doğru yalıtım sistemleridir (Aşıkoğlu Metehan, 2025).

## 2.2. Isı yalıtım uygulamalarının enerji verimliliğindeki rolü

Mevcut eğilimlerin bir sonucu olarak, hızlı kentleşme ve iklim politikaları dikkate alındığında, binalardan kaynaklanan CO<sub>2</sub> salınımının 2050 yılına kadar toplam küresel CO<sub>2</sub> emisyonlarının %50'sinden fazlasını oluşturabileceği öngörülmektedir. Bu yüksek oran, binaları hem ekonomik hem de çevresel sürdürülebilirlik açısından stratejik bir konuma taşımaktadır (Kuczyński vd., 2025). Türkiye özelinde bakıldığında, binaların toplam nihai enerji tüketimindeki payı %33 seviyesindedir ve bunun büyük bir kısmı konutlardan kaynaklanmaktadır (İpek & İpek, 2022). Ayrıca Türkiye enerji arzının büyük bir kısmı hala fosil yakıtlardan sağlamakta olup bu durum ülkeyi enerji ithalatına bağımlı hale getirmektedir. Türkiye'de 2030 yılına kadar bina sektörünün enerji tüketiminin yaklaşık 38 bin TEP (Ton Eşdeğer Petrol) seviyesine çıkacağı öngörülmekte, bu durum mevzuat düzenlemeleri ile enerji verimliliği politikalarının önemini daha da artırmaktadır (Akiner, 2025). Genel bir çerçeveden bakıldığında; 21. yüzyılda enerji güvenliği, enerji verimliliğinin artırılması, sürdürülebilir enerji kaynaklarının kullanımı, enerji etkin binaların tasarımı, enerjide dışa bağımlılığın azaltılması ve çevresel etkilerin minimize edilmesi gibi konu başlıkları sıklıkla gündeme gelmektedir (Lewandowski, 2025). Özellikle enerji tüketiminin büyük bir kısmından sorumlu olduğu bilinen yapı sektöründe, kullanım konforundan vazgeçmek zorunda kalmadan kaynakların etkin biçimde kullanılması ve enerji tasarrufu sağlamanın hem ekonomik hem de çevresel açıdan olumlu sonuçlar doğuracağı bir gerçektir.

Binalarda enerji tüketiminin büyük bir bölümü ısıtma, soğutma, havalandırma, aydınlatma ve sıcak su kullanımından kaynaklanmakta, bu tüketimin önemli bir kısmı ise yapı kabuğu üzerinden gerçekleşen ısı kayıpları ile ilişkilendirilmektedir. Kat yüksekliğinin artması ile dış duvar yüzey alanının büyümesi, bu elemanlar üzerinden gerçekleşen ısı kayıplarını artırmaktadır. Araştırmalar, çok katlı yapılarda enerji kayıplarının yaklaşık %40'ı dış duvarlardan, %35'i pencerelerden, %10'u çatılardan, %15'i ise hava sızıntılarından kaynaklandığını ortaya koymaktadır (Hossain vd., 2023; Vogt vd., 2022). Bu nedenle binanın yalnızca dış cephe yalıtımıyla sınırlandırılmaksızın, diğer yapı elemanlarının da bir bütün olarak ele alınıp yalıtım uygulamalarının bütüncül bir yaklaşımla gerçekleştirilmesi gerekmektedir (Tahmasbi vd., 2025).

Bina kabuğunda gerçekleştirilecek doğru ısı yalıtım uygulamaları sayesinde yapı elemanlarının ısı geçirgenlik katsayılarının ( $U$ -değeri) düşürülmesi, ısıl direncin ( $R$ -değeri) artırılması ve enerji tüketiminde %25-50 oranında tasarruf sağlanması mümkündür (Filonchik vd., 2024). Isı yalıtımı ile aynı zamanda ısı köprülerinin oluşumu engellenmekte, iç mekan sıcaklık dengesi korunmakta ve yoğuşma oluşumu minimize edilmektedir. Bu durum, yapı

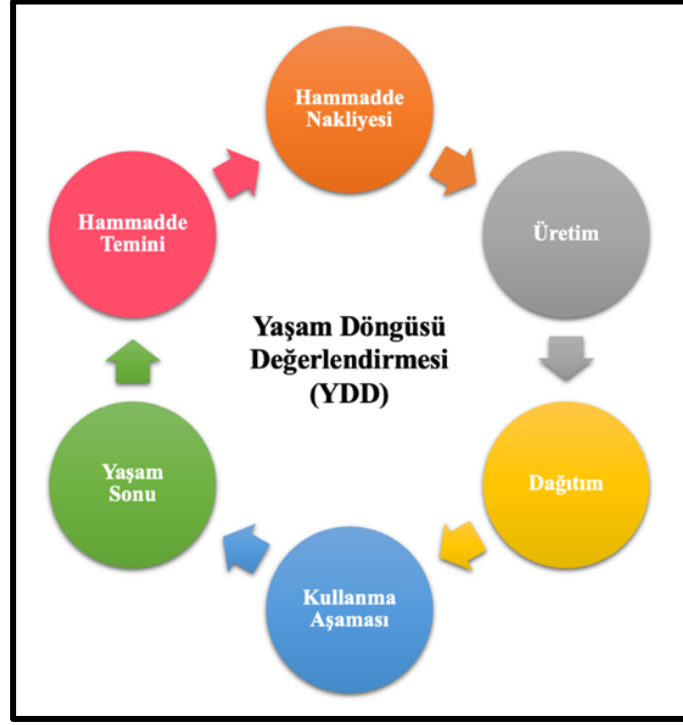
elemanlarının kullanım ömrünü uzatmaya ve bakım maliyetlerini azaltmaya yardımcı olmaktadır.

Yalıtımda kullanılan malzemelerinin yangına dayanıklı özellikte seçilmesi halinde yapı güvenliği de desteklenmekte ve ses yalıtımı gibi ilave faydaları da beraberinde getirmektedir. Enerji verimliliğine sahip tesisat sistemlerinin kullanımı ve yenilenebilir enerji kaynaklarının bina sistemlerine entegrasyonu ile birlikte, bina zarfının enerji verimliliği performansı önemli ölçüde iyileşmektedir. Bu sayede bina enerji ihtiyacında ve işletme maliyetinde önemli ölçüde tasarruf sağlanabilmektedir. Söz konusu çok yönlü faydalar, yalıtım malzemelerinin hem akademik araştırmalarda hem de endüstriyel uygulamalarda öncelikli olarak ele alınmasına zemin hazırlamaktadır. Ayrıca ısı yalıtımı, ulusal mevzuatların yanı sıra uluslararası yeşil bina sertifikasyon sistemlerinde temel performans kriterlerinden biri olarak kabul edilmektedir (Balcı vd., 2025).

Enerji verimliliğinin artırılması ekonomik bir gereklilik olmasının yanı sıra küresel iklim kriziyle mücadele etmenin de temelini oluşturmaktadır. Yapı kabuğunda yüksek oranlı enerji kayıpları fosil yakıt kullanımının artmasına sebep olmaktadır. Özellikle karbondioksit (CO<sub>2</sub>), metan (CH<sub>4</sub>) ve azot oksit (N<sub>2</sub>O) olmak üzere çeşitli sera gazlarının atmosferde birikmesi sonucu küresel ısınmada artış gerçekleşmektedir (Sharma vd., 2025). Bu durum iklim istikrarsızlığına yol açarken aynı zamanda çevresel ve sosyoekonomik anlamda birçok sorunu beraberinde getirmektedir. Sera gazı emisyonlarının azaltılması hedefine yönelik 1997 Kyoto Protokolü ve 2015 yılında imzalanan Paris Anlaşması gibi uluslararası ölçekte anlaşmalar, gelişmekte olan ülkelerin her beş yılın sonunda emisyon hedeflerini gözden geçirmeyi ve hedefleri güncellemeyi zorunlu tutmuştur (Noman vd., 2025).

İnşaat sektöründe yapı malzemeleri, toprak işleri, imalat, nakliye ve bina yıkımları gibi faaliyetlerin tümü sera gazı etkisini artırmaktadır. Özellikle binalarda enerji verimsizliği, doğru olmayan yalıtım uygulamaları, sürdürülebilirliği olmayan tasarımlar ile eski teknoloji ile çalışan sistemlerin varlığı bu olumsuz etkileri artırıcı etmenlerdir. Bu bağlamda, ürün ve hizmetin çevresel etkisinin değerlendirilmesinde Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi (YDD) yaygın kullanılan bir yöntemdir. Malzemenin yaşam döngüsü boyunca karbon ayak izi, TS EN ISO 14044:2006/2 standardına göre YDD yöntemi kullanılarak hesaplanmaktadır. YDD, hammadde temininden başlayıp ürün bertarafına kadarki tüm süreçlerde sera gazı emisyonlarının ve dolayısıyla karbon ayak izinin hesaplanmasına olanak tanımaktadır. Yöntem, ürün veya sürecin çevre dostu alternatiflerini belirlemek, yapı malzemeleri, enerji sistemleri ve endüstriyel uygulamalarında sürdürülebilirliğin iyileştirilmesinde etkin rol oynamaktadır (Hardianto vd., 2025).

YDD kapsamında bir ürünün yaşam döngüsü boyunca çevresel etkileri Şekil 2.1.'de verilmiştir.



Şekil 2.1. Yaşam döngüsü değerlendirme aşamaları.

YDD kapsamındaki emisyonlarının hesaplanmasında kullanılan temel kavramlardan biri olan karbon ayak izi, insan faaliyetleri sonucunda doğrudan ya da dolaylı olarak atmosfere salınan sera gazlarının toplam miktarını CO<sub>2</sub> eşdeğeri (CO<sub>2</sub>-eq) olarak ifadesidir (K. Wang & Gao, 2025). Çevresel Ürün Beyanları (EPD) aracılığıyla sayısallaştırılan gömülü karbon, malzemenin yaşam döngüsü aşamaları boyunca emisyonları yansıtan temel bir ölçüttür. Karbon içeriği 1 kgCO<sub>2</sub>eq/m<sup>2</sup> altında olan malzemelerin çevresel etkisi “*düşük*” kabul edilirken, 6 kgCO<sub>2</sub>eq/m<sup>2</sup> değerini aşan malzemelerin karbon ayak izi “*önemli düzeyde*” kabul edilmektedir (B. M. Rocha vd., 2025). Bu bağlamda; küresel ısınmanın önüne geçmede en etkin yöntem olarak binaların enerji verimliliğini artırmak, yenilenebilir enerji kaynaklarının yaygınlaşması ve sürdürülebilir malzeme kullanımı önem taşımaktadır. Bu kapsamda gerçekleştirilen yalıtım uygulamaları, yapının ısıtılması ve soğutulması sırasında kullanılan enerji ihtiyacını azaltarak daha çevreci bir ortam sağlamaya yardımcı olmaktadır.

### 2.3. Enerji etkin yapı tasarımının önemi ve ilkeleri

Binalar, küresel enerji tüketiminin yaklaşık %30-40'ından sorumludur. Türkiye gibi enerjide dışa bağımlı ve gelişmekte olan bir ülkede Enerji Etkin Bina Tasarımı (EEBT) çevresel ve ekonomik açıdan zorunluluk haline gelmiştir. Bu sistem, bir binanın inşaa aşamasından

başlayan ve tüm ömrünü etkileyen kararlar bütününden oluşmaktadır. Böylelikle yapı sektöründe malzeme kalitesinden mimari tasarımlara kadarki geniş çerçevede kapsamlı bir değişim mümkün olmaktadır (İmert & Fitoz, 2025).

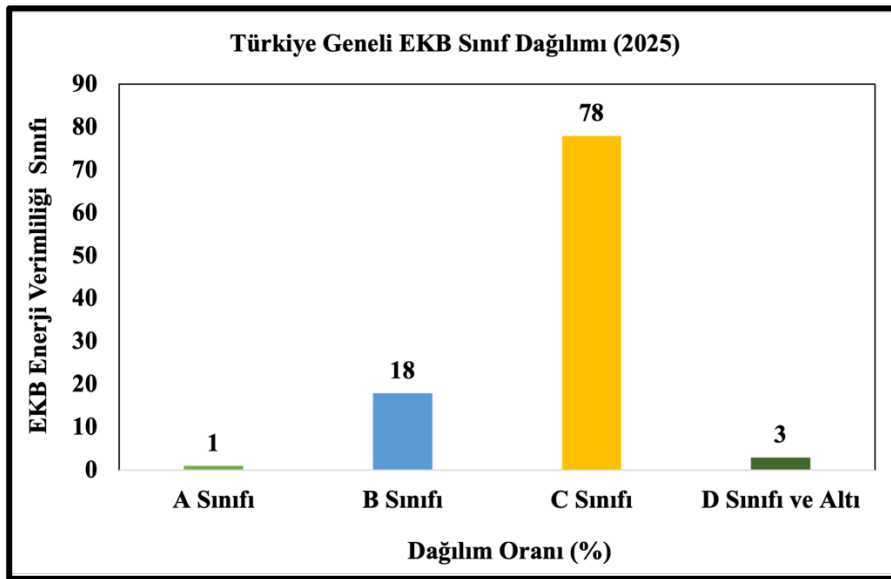
Enerji etkin binalar, yenilenebilir kaynaklarla entegre olmuş, yaşam döngüsü boyunca minimum enerji tüketen ve kullanıcı konforunu önemseyen tasarımlar olarak öne çıkmaktadır. Bu bağlamda; enerji verimliliği ile enerji ihtiyacı azalırken, 2053 Net Sıfır Emisyon hedefleri için yapı sektörünün dönüşümüne olanak tanımaktadır. Ayrıca hava kalitesi, doğal aydınlatma ve ısı konfor avantajları sayesinde kullanıcı sağlığını ve rahatını olumlu etkilemektedir. EEBT; pasif stratejilerden başlayarak aktif sistemlerle desteklenen yaklaşımı benimsemektedir. Bu yaklaşımda mekanik sistemlere ihtiyaç duyulmaksızın binanın doğru formda ve konumda yapılması avantajlarından yararlanılmaktadır. Uygulamada yer seçimi ve yönelim, bina formu ve kabuğu, doğal havalandırma ve aydınlatma sistemleri pasif stratejiler arasında sayılabilmektedir. Pasif stratejilerin desteklenmesinde ise yüksek verimli aktif sistemler ve yenilenebilir kaynaklar devreye girmektedir. Akıllı bina yönetimi (sensörler vb.), yenilenebilir enerji entegrasyonları (Güneş Enerji Santrali (GES) gibi) ve yüksek verimli havalandırma sistemleri (ısı pompaları ve geri kazanımlı sistemler) aktif stratejiler arasında yer almaktadır (Açıkgüz vd., 2025).

Tapu ve Kadastro Genel Müdürlüğü Sincan Hizmet Binası, Türkiye’de EEBT yaklaşımıyla inşa edilen ilk pilot uygulamalardan biridir. Aralık 2022’de resmi olarak tamamlanan bina, Enerji ve Çevresel Tasarımda Liderlik (Leadership in Energy and Environmental Design- LEED) kriterlerine göre tasarlanan binalara kıyasla %42 oranında enerji tasarrufu sağlayacak şekilde yapılmıştır. Yapı Araştırma Kurumu Çevresel Değerlendirme Metodu (Building Research Establishment Environmental Assessment Method-BREEAM) sertifikasyonunda yüksek seviye hedefleriyle çevre dostu bir yapı olarak öne çıkmaktadır. Bu özellikleriyle bina, Türkiye’nin ilk akıllı ve enerji verimli kamu binalarından biri olarak kabul edilmektedir. Bu bina ayrıca Türkiye’nin yerli sertifikasyon sistemi olan Ulusal Yeşil Sertifika Sistemi (Yes-TR) için bir rehber niteliğindedir ([TKGM DHBD, 2022](#)) (Şekil 2.2.).



Şekil 2.2. Türkiye’de EEBT yaklaşımıyla inşa edilen ilk pilot uygulama.

EEBT doğrultusunda Türkiye’de son yıllarda oldukça önemli adımlar atılmıştır. Özellikle binalarda izin verilen maksimum yıllık ısıtma enerjisi ihtiyacını belirleyen TS 825 standardı, 2020 yılından itibaren zorunlu hale getirilen EKB ve 2023 yılı itibarıyla başlatılan Neredeyse Sıfır Enerjili Binalar (nSEB) yaklaşımı EEBT’ye yönelik atılan en güçlü adımlardandır. Bu kapsamda 2025 itibarıyla 2.000 m<sup>2</sup> üzerindeki tüm yapılar için nSEB zorunlu hale getirilmiştir. Bu binaların yenilenebilir enerji kaynağı kullanma zorunluluğu %5’ten %10’a çıkarılmış ve yeni yapılacak olan tüm binalar için EKB sınıfının en az “B” olması şart koşulmuştur. Bu durumda 2035 yılına kadar 102.000 gigavat-saat (GWh) enerji tasarrufu sağlanması hedeflenmektedir. 2025 yıl sonu itibarıyla Türkiye genelinde EKB alan bina sayısı (yıllık) 114.890 olarak rapor edilmiş ve 2026 hedefi 120.000 olarak belirlenmiştir. 2025 yılı itibarıyla mevcut binaların EKB sınıf dağılımları Şekil 2.3.’te verilmiştir ([T.C ÇŞİDB, 2026](#)).



Şekil 2.3. Türkiye geneli binaların 2025 yıl sonu itibarıyla EKB sınıfı dağılımları.

Türkiye’de binaların toplam enerji tüketimindeki payının yaklaşık %22,2-25 arasında olduğu bilinmektedir. Ayrıca Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı’nın verilerine göre enerji tasarrufundaki en büyük pay bina ve hizmet sektöründen kaynaklanmaktadır. Ulusal Enerji Verimliliği Eylem Planı (UEVP) (2024-2030) çerçevesinde Türkiye’nin 2030 yılına kadar ülke genelinde sadece konutlardan tasarruf etmeyi planladığı enerji miktarı 1,2 Mtep (Milyon Ton Eşdeğer Petrol) olarak hedeflenmiştir. 2025 sonu itibarıyla %44,1’lik tasarruf payı ile binalar en başarılı sektör konumundadır. Bu başarının gerçekleşmesindeki en büyük pay ise yaklaşık 103 bin binanın dış cephe yalıtımının tamamlanmasına aittir. Söz konusu tasarrufun EEBT ilkeleri doğrultusunda gerçekleştirilen uygulamaların bir sonucu olduğu ortadadır ([T.C. ETKB UEVP, 2024](#)). Uygulamada karşılaşılan temel zorlukların başında mevcut yapı stoğu gelmektedir. Her ne kadar yeni binalar mevcut standartlara uygun olsa da eski yapıların yalıtımsız olması enerji verimliliğinin sağlanmasında en büyük engellerden biridir. Bunun yanı sıra enerji verimli sistemlerin ilk yatırım maliyetlerinin yüksek oluşu da uygulamayı sınırlandırmaktadır.

### **2.3.1. Türkiye yapı sektöründe enerji verimliliği ve mevcut durum**

Türkiye'nin de içinde bulunduğu Akdeniz bölgesinde sanayileşme, nüfus artışı ve ekonomik kalkınmayla birlikte enerji talebinde istikrarlı bir artış gözlenmektedir (Köse & Kutlu Kaynar, 2025). Özellikle artan konut sayısı ve fosil yakıtlara bağımlılık nedeniyle binalarda enerji tüketimi artmakta ve bu durum bölgeyi, küresel iklim krizine karşı daha savunmasız hale getirmektedir. Türkiye’nin toplam enerji ihtiyacının yaklaşık %75’i ithalata dayalı olup bu ihtiyacın büyük çoğunluğunu doğal gaz ve elektrikten karşılamaktadır. Doğal gazın, ülkenin toplam enerji tüketiminin yaklaşık %46’sını oluşturması ve bunun yaklaşık %99’luk kısmını ithalat yoluyla temin edilmesi enerji arz güvenliği konusunda hassasiyete sebep olmaktadır (Eksi vd., 2025). Bu nedenle Türkiye; uzun vadeli enerji ve iklim stratejileri ile binalarda enerji verimliliğini artırmayı, fosil yakıtlara olan bağımlılığı en aza indirmeyi ve yenilenebilir enerji kaynaklarını entegre etmeyi öncelik haline getirmelidir. Türkiye’de yapı sektörü, toplam nihai enerji tüketiminin %31’ini oluşturarak sanayi sektöründen sonra ikinci büyük tüketici konumundadır. Bu enerjinin önemli bir kısmı konut ve hizmet yapılarında ısınma amaçlı kullanımlardan kaynaklanmaktadır. Binalarda enerji kayıplarının azaltılması, çevresel etkilerin düşürülmesi ve sürdürülebilir yapı tasarımlarının geliştirilmesinde uygulanan en etkili yöntemlerden biri ısı yalıtımıdır (Shahee vd., 2024).

Isı yalıtımı sayesinde, kış aylarında iç mekanlardaki ısının dış ortama aktarılmasını, yaz aylarında ise dışarıdaki yüksek sıcaklıkların iç mekanlara girişinin engellenmesi yıl boyunca enerji verimliliğini artırmaktadır. Enerji verimliliğinin artırılması iç mekan konforuna ek olarak fosil yakıt tüketimini de azaltacağından ekonomik tasarruf ve çevresel sürdürülebilirliğin

sağlanmasına yardımcı olmaktadır. Bu durum bina kullanıcıları için doğrudan maliyeti azaltırken, ulusal anlamda da enerji ithalatına olan bağımlılığı azaltmaya katkı sağlamaktadır.

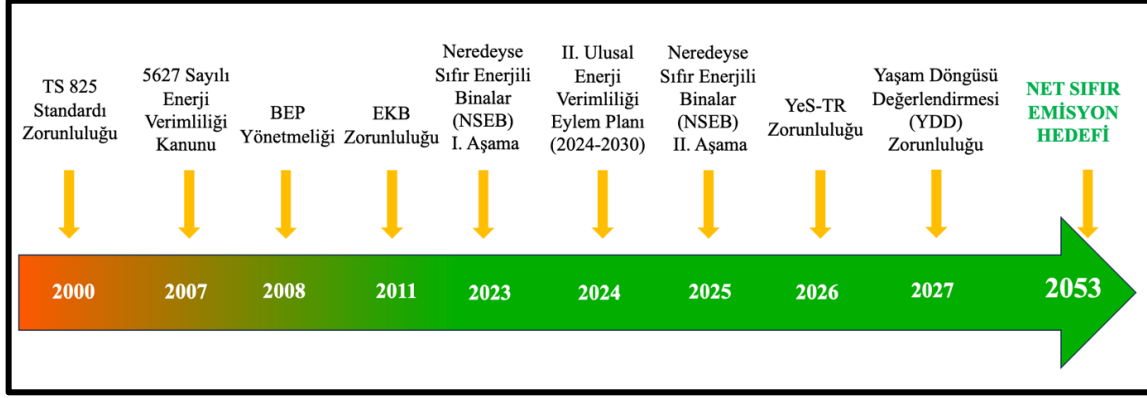
Ülkemizde toplam enerjinin yaklaşık %80'i, binaların ısıtılması ve soğutulması sırasında tüketilmektedir. Türkiye'de ısı yalıtım uygulamalarının yeterince yaygın olmayışı sebebiyle benzer iklim koşullarına sahip Avrupa ülkeleri ile kıyaslandığında binalarda ısı kayıp ve kazanç oranları çok daha fazladır. Bunun sonucunda daha fazla yakıt sarfiyatı ve çevre kirliliği meydana gelmektedir. İstatistiksel çalışmalar; Fransa, İngiltere ve İsveç gibi ülkelerde konutlarda ısıtma-soğutma amaçlı tüketilen enerjinin neredeyse 2-3 katının Türkiye'de tüketildiğini ortaya koymaktadır (Timuralp vd., 2025). Bu nedenle ülkemizde enerji etkin bina tasarımlarını arttırmak, enerjinin verimli kullanımını teşvik etmek ve ısı yalıtım uygulamalarını yaygınlaştırmak öncelikli hale gelmelidir.

### **2.3.2. Türkiye'de enerji verimliliği politikaları ve mevzuat**

Son yıllarda ülkemiz, yalıtım uygulamaları konusunu gündemde tutmaya çalışarak çeşitli uygulama ve yaptırım yoluna gitse de mevcut konut sayısı göz önüne alındığında uygulamaların yetersiz kaldığı açıktır. Enerji kullanımını azaltmak, emisyonları düşürmek ve net sıfır hedeflerine ulaşmak büyük ölçüde stratejik enerji verimliliği girişimlerine bağlıdır. Bu girişimler piyasa tabanlı yaklaşımlar, teknolojik gelişmeler ve hükümetin düzenleyici çerçeveleri dahil olmak üzere çok boyutlu stratejileri kapsamaktadır (Bera vd., 2025). Özellikle Avrupa'da binalarda enerji verimliliği bağlamında gerçekleştirilen faaliyetlerin Türkiye'nin bina enerji performansına ilişkin yasal ve düzenleyici çerçevesini oluşturmaya yardımcı olduğu açıktır. Ancak Avrupa gelişmelerine oranla pilot uygulama sınırlarında kaldığı da kesin bir gerçektir. Türkiye'de enerji verimli binalara ilişkin çalışmaların uygulanabilirliği, sağlayacağı potansiyel tasarruflar ve uzun vadeli stratejilerin anlaşılması konusundaki belirsizlik halen devam etmektedir (Aşıkoğlu Metehan, 2025). Yönetmeliklerin tam uygulanmayışı, teşvik sistemlerinin yeterince gelişmemiş olması, halkın bilinç düzeyinin düşük olması ve denetim mekanizmasındaki zayıflıklar yalıtım konusunun yaygınlaşmasının önündeki engelleri ifade etmektedir.

Küresel ölçekte teknolojinin gelişmesi ve bilimsel çalışmaların arttırılmasıyla birlikte yalıtım malzemelerinde çeşitlilik ve kalite artışı görülmektedir. Türkiye için bu çalışmaların etkinliği yeterli olmasa da gelişmiş ülkelerde yapılan çalışmaların yansımaları ülkemiz için önemli bir fırsat ve rehber niteliği taşımaktadır (Yılmaz & Cesur, 2023). Ülkemizde enerji verimliliği konusundaki çalışmaların başlangıcı 1970'li yıllarda ısı korunumu konusundaki yasa ve yönetmeliklere dayanmaktadır. 1985 yılında Bayındırlık ve İskân Bakanlığı'nın yürürlüğe

koyduğu “Isı Korunumu Yönetmeliği” ve ardından TS 825 “Binalarda Isı Yalıtım Kuralları Standardı” ile binalarda ısıtma enerjisinin sınıflandırılması ve enerji tüketiminin hesaplanması ile devam etmiştir (Şekil 2.4.).

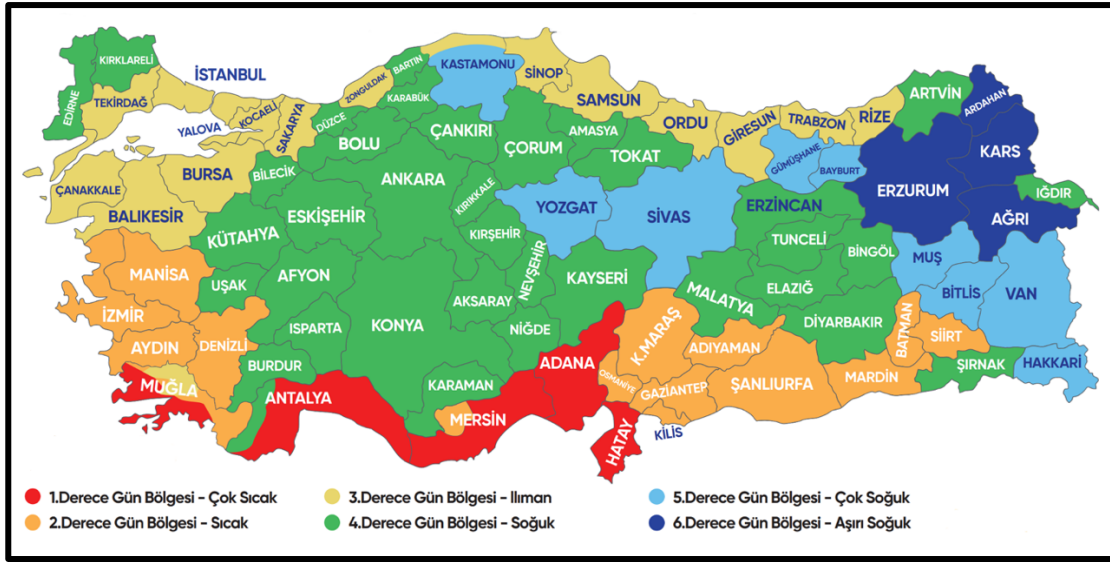


Şekil 2.4. Türkiye'nin enerji verimliliği uygulamalarındaki önemli durakları.

Türkiye'nin ısı yalıtım uygulamaları kapsamında yaptığı ilk düzenleme 1989 yılında kabul edilen ve 14 Haziran 2000 tarihinden itibaren tüm binalarda uygulanması zorunlu hale getirilmiş olan TS 825 Standardı'dır. Bu standart, bir binanın tasarlanma aşamasından başlayarak her aşamada enerjinin verimli kullanılmasını sağlayacak şekilde yalıtılmasına dair kuralları ve yönergeleri içermektedir (Caner, 2021).

Standartın güncel versiyonu 1 Nisan 2025 tarihinde yürürlüğe girmiş, bu versiyonda binaların enerji limitleri ve  $U$ -değerleri iyileştirilmiştir (TSE, 21 Mart 2025). Bu kapsamda, binaların sadece ısıtma ihtiyaçlarına göre değil aynı zamanda soğutma ihtiyacına göre de tasarlanması zorunlu hale getirilmiştir. Bu standart sadece konutlar için değil, aynı zamanda sinema salonları, ofisler, tüm sosyal tesisler, yurtlar, hastane, okul, bakımevi ve konaklama tesisi gibi kamuya hizmet veren alanlarda da zorunlu tutulmuştur. Buna ek olarak genel kullanım amaçları için şartlandırılan her türlü bina ve iş yerleri ile endüstri ve sanayi binalarında da uygulanması gerekmektedir. Standart, yeni yapılacak olan binaların ısı kayıplarını en aza indirecek şekilde sektör bazında enerji ihtiyacı tahmininde bulunmayı amaçlamaktadır (Saygın vd., 2025).

Güncel standart içeriğinde Türkiye, iklimsel değişiklikler açısından altı farklı bölgeye ayrılmış ve her bölge için uygulanması gereken ısı geçirenlik limitleri daha katı sınır değerlerle güncellenmiştir. Böylece enerji kaybının önlenmesi ve iklim odaklı bina tasarımı mümkün olmaktadır. Standartta göre Türkiye derece-gün bölgeleri haritası Şekil 2.5.'te verilmiştir (TSE, 21 Mart 2025).



Şekil 2.5. TS 825/2025 standardına göre Türkiye derece-gün bölgeleri.

Güncel versiyonda iklim bölgeleri için önerilen  $U$ - değerleri duvarlar için %30-37, çatılar için %16-25, döşemeler için %33-42 ve pencereler için %25 oranında düşürülmüştür. Standartta farklı derece-gün bölgelerinde yer alan yapı elemanları için tavsiye edilen ısı geçirgenlik üst limitleri Tablo 2.1.'de verilmiştir.

Tablo 2.1. Yapı elemanları için tavsiye edilen ısı geçirgenlik üst limitleri.

Derece-Gün Bölgesi	Duvar ( $U_D$ ) ( $W/m^2K$ )	Tavan/Çatı ( $U_T$ ) ( $W/m^2K$ )	Döşeme ( $U_f$ ) ( $W/m^2K$ )	Pencere	
				( $U_p$ ) ( $W/m^2K$ )	g (-)
1. Bölge	0,45	0,35	0,4	1,8	$\leq 0,45$
2. Bölge	0,4	0,3	0,35	1,8	$\leq 0,45$
3. Bölge	0,4	0,3	0,35	1,8	$\leq 0,45$
4. Bölge	0,35	0,25	0,3	1,8	$\geq 0,55$
5. Bölge	0,25	0,2	0,25	1,8	$\geq 0,55$
6. Bölge	0,25	0,2	0,25	1,8	$\geq 0,55$

TS 825 standardı, ekonomik ve çevresel faktörleri dikkate almadan yalnızca ısı kaybı ve kazancı hesaplamalarına dayanarak, binalar için minimum yalıtım gereksinimlerini belirlemektedir. Ancak bu tür statik hesaplamalar tek başına yeterli değildir. Küresel ölçekte artan rekabet koşullarında endüstriyel performansın sağlanması için etkili bir maliyet analizine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu bağlamda; yalıtım kalınlığı, yıllık enerji verimliliği kazanımları, karbon emisyonu azaltımı ve sürdürülebilir uygulamalar arasındaki etkileşimin uzun vadeli ekonomik etkileriyle birlikte anlaşılmasını amaçlayan Yaşam Döngüsü Maliyet Analizi-YDMA (Life Cycle Cost Analysis-LCCA) kavramı ortaya çıkmıştır. Bu analiz, genel maliyetleri

düşürme ve hem üreticilere hem de kullanıcılara ekonomik avantajlar sağlama amacıyla bir ürünün kullanım ömrünün üretimden bertarafa kadar tüm aşamalarındaki giderleri değerlendirmeyi içermektedir (Laseter vd., 2017).

Türkiye’de yapılan çalışmalar, yalıtımsız bir binanın TS 825 standardı gerekliliklerine uygun bir şekilde yalıtılması halinde kış aylarında ısıtma için harcanan enerjide yıllık yaklaşık %75 oranında tasarruf etmenin mümkün olduğunu ortaya koymaktadır. Buna ek olarak yaşam döngüsü maliyetinde %70, yaşam döngüsü sera gazı salımında ise %73 kadar iyileştirmeler sağladığını göstermiştir (Altun vd., 2019). TS 825 standardının ardından 2001 yılında “*Yapı Denetimi Uygulama Usul ve Esasları Yönetmeliği*” yürürlüğe girmiş, 19 farklı şehirde pilot uygulamaları başlatılarak yapının yalıtım dahil tüm inşaat standartlarına uygunluğu bu yönetmeliğe göre gerçekleştirilmektedir. Zamanla tüm Türkiye’de yaygınlaşmış olan bu yönetmelik kapsamında yapıların statik performansı, malzeme özellikleri ve yalıtım uygulamalarının mevzuata uygun olup olmadığı denetlenmektedir. Bu yönetmelikle inşaat firmalarının standarda uygun olmayan malzeme kullanması ve yalıtım uygulamalarındaki ihmallerin engellenmesi amaçlanmaktadır. Ancak denetim firmalarının bağımsız olması ve yetersiz yaptırımlar, yönetmeliğin etkinliğini kısıtlamaktadır (Altun vd., 2019).

2007 yılında yürürlüğe giren 5627 sayılı “*Enerji Verimliliği Kanunu*”, binalar, enerji ve ulaşım dahil olmak üzere sektörlerdeki enerji tüketimini düşürmeyi amaçlamaktadır. Ayrıca 2008 yılında yürürlüğe giren “*Binalarda Enerji Performansı Yönetmeliği (BEP)*” sayesinde yeni binalar standartlara uygun yalıtım özelliği göstermiştir ([Binalarda Enerji Performansı Yönetmeliği, 2008](#)). Bu yönetmelikte yapılar için gerekli tüm yalıtım esasları, sıhhi tesisat ve elektrik tesisatı ve aydınlatma gibi tüm kriterlere dair usul ve esaslar belirtilmektedir. Bu kapsamda, BEP yönetmeliğinin bir gereği olarak hem yeni hem de mevcut binalarda Enerji Kimlik Belgesi (EKB) zorunlu hale getirilmiştir. EKB, BEP-TR hesaplama yöntemi kullanılarak tespit edilen, binaların yıllık toplam enerji tüketimine bağlı olarak hazırlanmaktadır. Bu belgelendirme, 2011 yılından itibaren yeni binalarda, 2020 yılı itibarıyla da mevcut binalarda geçerli hale gelmiştir. 10 yıl süreyle geçerli sayılan bu belge ile binalar A’dan G’ye kadar sınıflandırılmış ve yeni yapılan binaların en az “C” sınıfı enerji kimlik belgesine sahip olmaları zorunlu kılınmıştır.

Ancak 1 Ocak 2025 tarihi itibarıyla yürürlüğe giren ve güncellenmiş “*Binalarda Enerji Performansı Yönetmeliği*”, 2000 m<sup>2</sup>’den büyük taban alanına sahip tüm binaların en az "B" enerji performans sınıfına sahip olmasını ve enerjilerinin en az %10'unu yenilenebilir kaynaklardan tüketmesini zorunlu kılmıştır. Binalar için yapılan bu sınıflama; binaların enerji tüketimini, ısı yalıtım seviyesini, kullanılan yakıt türünü ve karbon salımı açısından değerlendirilmesini

mümkün kılmaktadır. Böylelikle kullanıcılar bu konuda daha bilinçli hareket etmekte ve tüm yapıların nSEB konseptine uygun olarak inşası mümkün olmaktadır (Aşıkoğlu Metehan, 2025). BEP yönetmeliği yeni binalar için iyileştirme sağlamasına rağmen mevcut binalardaki yalıtım eksikleri halen problem olmaya devam etmektedir. Bu noktada; ülkemizde yalıtım uygulamaları ısı yalıtımı ile ilgili yönetmelikler ve standartlar dikkate alınarak gerçekleştirilmelidir.

Türkiye'nin deprem kuşağında yer alması nedeniyle ülke genelinde yürütülen kentsel dönüşüm sürecinin enerji verimliliği stratejileriyle entegrasyonu, teknik ve ekonomik anlamda fırsat odaklı bir yaklaşımdır. Ülkemizde mevcut bina stokları için tüm verilerin kapsamlı bir şekilde değerlendirilmesi; depreme karşı dayanıklı binaların ve enerji verimli bina dönüşümlerinin gerçekleştirilmesinde büyük önem taşımaktadır. Bu süreçte iklim özellikleri, yapı türü ve bina kabuğu gibi özellikler dikkate alınarak sürdürülebilirlik, ekonomiklik ve uygulanabilirlik bakımından en uygun yöntem belirlenmelidir. Bunun için kamu ve özel sektör desteği, finansal katkılar, teknik destek, motivasyon ve eğitim konularında bütüncül bir yaklaşım benimsenmelidir. Binalarda enerji verimliliği uygulamalarının kapsamının genişletilmesi, denetimlerin artırılması ve çeşitli yaptırımların hayata geçirilmesi bu sürecin yürütülmesindeki temel faktörlerdendir. Ayrıca pasif yapı tasarımlarının öncelikli hale getirilmesi, bina sistemlerinde verimliliğin artırılması, yenilikçi malzeme ve teknolojilerin kullanımının yaygınlaştırılması ve toplumsal bilincin artırılması gibi yaklaşımlarla küresel iklim hedefleri ve daha iyi bir gelecek hedefine yaklaşmak mümkün olacaktır (Mıhlayanlar & Meral, 2023).

### **2.3.3. Türkiye'de teşvik uygulamaları ve destek mekanizmaları**

Türkiye'de ısı yalıtım uygulamalarını yaygınlaştırmak amacıyla kullanılan standartlar ve mevzuatlar, enerji verimliliği politikalarının hayata geçirilmesinde önemli bir çerçeve sunmaktadır. Bu amaçla yeni inşaat projelerinin ve yenileme çalışmalarının belirli enerji tasarrufu gereksinimlerini karşılama bina kodları ve standartlar, en temel düzenlemeler olarak öne çıkmaktadır.

Yasal düzenlemelerin sahada etkin bir şekilde uygulanması amacıyla hükümetlerin finansal teşvik mekanizmalarını devreye sokması oldukça önemlidir. Bu kapsamda hibe programları, vergi indirimleri veya düşük faizli kredi imkânı sunan sübvansiyonlar gibi finansal destekler, işletmelerin ve tüketicilerin enerji verimli teknolojileri benimsemelerini daha fazla teşvik etmektedir (Bera vd., 2025). Buna ek olarak denetim süreçlerinin güçlendirilmesi ve toplumun bilinç düzeyinin artırılması da ulusal enerji güvenliği, çevresel sürdürülebilirlik ve ekonomik kalkınma açısından aynı derecede önemlidir.

Türkiye’de ısı yalıtımı uygulamaları ve enerji verimliliği teşvikleri Avrupa Birliği (AB) ülkelerine kıyasla henüz yeterli seviyeye ulaşamamıştır. Enerji verimli binaların teşvik edilmesi için yeni ve mevcut konutlarda finansal teşvikler ve destek mekanizmaları artırılmalıdır. Binalarda enerji verimliliğini artırmak için doğrudan sübvansiyonlar, vergi indirimleri ve düşük faizli krediler gibi finansal mekanizmalar uygulanabilmektedir. Özellikle eski yapılar ve enerji verimsiz binalar için emlak vergisinde geçici muafiyet, tapu harçlarında indirim veya enerji verimliliği yatırımlarının gelir vergisinde gider olarak yazılabilmesi sağlanabilmektedir. Türkiye’de genel teşvik ihtiyacının karşılanması amacıyla 2024-2030 Ulusal Enerji Verimliliği Strateji Belgesi ve Eylem Planı (UEVP) çerçevesinde binalarda enerji tüketiminin azaltılması öncelikli hedef olarak seçilmiştir ([T.C. ETKB UEVP, 2024](#)). UEVP’nin somut bir örneği olarak 2022 yılında “Binalarda Isı Yalıtımı Kredisi” uygulamaya alınmıştır. Bu kapsamda, güncel uygulamada konut sahiplerine düşük faiz ve 60 ay vadeli kredi imkânı sunularak yalıtım maliyetlerinin ekonomik anlamda uygulanabilir hale getirilmesi amaçlanmıştır.

Yenilenebilir Enerji Kaynakları (YEK) dönüşümü de Türkiye'nin iklim ve enerji politikalarıyla uyumludur. Bu yaklaşım, fosil yakıt tüketiminin ve yapı sektörüyle ilişkili sera gazı emisyonlarının azaltılmasına önemli ölçüde katkıda bulunmaktadır. Ayrıca elektrik tüketiminin büyük ölçüde YEK ile karşılanması durumunda enerji ithalatına bağımlılık azalacak ve böylece cari açık hafifleyecektir. Dolayısıyla, YEK dönüşümlerinin çevresel sürdürülebilirlik, ekonomik istikrar ve enerji güvenliği açısından kritik bir rol oynayacaktır (Eksi vd., 2025).

#### **2.3.4. Uluslararası örneklerin Türkiye’de uygulanma potansiyeli**

Uluslararası ölçekte devam eden uygulama örnekleri, enerji verimliliği hedefleri doğrultusunda çeşitlendirilmektedir. AB’de Energy Performance of Buildings Directive (EPBD), binaların enerji performansları konusunda düzenlemeleri içeren hukuki mekanizma olarak öne çıkmaktadır. Bu sistemi destekleyici strateji olarak Renovation Wave devreye sokulmuş, 2030’a kadar 35 milyon yapının enerji performansının iyileştirilerek yenilenmesini hedeflenmiştir (Di Ruocco, 2024). Almanya’da Yeniden Yapılanma Kredi Kurumu (Kreditanstalt für Wiederaufbau-KfW) destekli enerji verimli restorasyon ve teşvik modelleri ile düşük faizli kredi ve hibelerle enerji verimli iyileştirme yatırımlarına yönlendirmek amaçlanmıştır. KfW’de teknik koşullar, finansman ve kalite kontrol aşamalarının entegre bir şekilde yürütüldüğü mekanizmada enerji hedefinin içeriği ve yapılan iyileştirmenin boyutuna bağlı olarak, kredi veya hibenin büyüklüğü belirlenmektedir (Leichter & Piccardo, 2024). ABD’de Energy Star programı ile binalar ve ekipmanlar için gönüllü etiketleme ve sertifikasyon yaklaşımı uygulanmaktadır. Böylelikle sertifikalı ürün ve binalar daha düşük işletme maliyeti ve daha yüksek kira değeri sağlamaktadır (Brolinson vd., 2023). Bu uygulama, Türkiye’deki EKB

uygulanmasına benzer bir yaklaşım izlemektedir. Uluslararası uygulamalar doğrultusunda, Türkiye için stratejik öneriler arasında; TS 825 standardı ve BEP şartlarını sağlayabilen projeler için KfW benzeri düşük faizli kredi veya hibe desteği sağlanabilmektedir. Türkiye'de benzer bir diğer model, Küçük ve Orta Ölçekli İşletmelerin (KOBİ) ve büyük sanayi işletmelerinin rekabet gücünü önemli ölçüde artırabilmektedir. Ancak yüksek ilk yatırım maliyetleri, farkındalık eksikliği ve yerel olarak üretilen yalıtım malzemelerindeki fiyat dalgalanmaları gibi bazı engeller bu stratejilerin uygulanmasını zorlaştırmaktadır. Bu nedenle, yalıtım uygulamalarının yaygın olarak benimsenmesini sağlamak için bu zorluklar, farkındalık kampanyaları ve uzun vadeli finansman modelleriyle ele alınmalıdır (Saygın vd., 2025).

Energy Star benzeri uygulama ile EKB veri tabanının etkin kullanımıyla piyasadaki şeffaflık artırılarak, pilot bölge sınırlandırmasının ardından ölçeklendirme yapılabilir. Ayrıca kullanıcıların herhangi bir ön ödeme olmaksızın, enerji verimliliği iyileştirmelerini finanse etmeye yardımcı olan “Tasarruf Ettikçe Öde” sistemi gibi finans modelleri de etkili olabilir (J. Lin, 2018). Türkiye'deki eski binaların büyük ölçekli güçlendirilmesini teşvik etmek amacıyla enerji tasarrufunun garanti altına alınacağı enerji performans sözleşmeleri uygulanabilir. Buna ek olarak yalıtım sektöründe bilgi ve tecrübenin artmasını sağlayacak eğitim ve istihdam olanakları artırılarak stratejik uygulamalar geliştirilebilir. Türkiye’de bina yalıtım stratejilerinin etkin bir şekilde uygulanması için politika yapıcılar, özel sektör ve tüketiciler arasında iş birliği gereklidir. Ulusal ölçekte uygulamalar için düşük faizli kredi imkanları, Katma Değer Vergisi (KDV) indirimi, toplu konut projelerinde zorunlu yalıtım uygulamaları, kamu binalarında örnek projelerin geliştirilmesi gibi uygulamalar, enerji verimliliği teşvik mekanizmasını güçlendirebilir. Yerel yönetimler düzeyinde ise İstanbul’da bazı belediyeler dış cephe mantolama yalıtımı için düşük faizli kredi ve uzun ödeme vadesi seçenekleri sunarak konut sahiplerini yalıtım yaptırmaya teşvik etmeyi hedeflemektedir.

Uluslararası modellerin Türkiye’ye uyarlanmasında en kritik iki parametre; finansal destek ve teknik denetimdir. Almanya’da uygulanan KfW modeline benzer şekilde; TS 825 standardının kredi sürecine dahil edilmesi ve uygulamaların bağımsız teknik denetçiler tarafından onaylanması ile yalıtım yatırımlarının geri dönüş süreleri garanti altına alınmalıdır. Böylelikle uygulama hatalarının önlenmesi, düşük kalitede malzeme kullanımının önüne geçilmesi ve enerji tasarrufu sağlayan nitelikli projelerin hayata geçirilmesi sağlanacaktır.

### **2.3.5. Konutlarda ısı yalıtımının sağlayacağı faydalar**

Binalarda enerji kayıplarını minimum seviyelere indirebilmenin en etkili yolu şüphesiz ısı yalıtımı uygulamalarıdır. Bu uygulama enerji talebini en aza indirirken konforu, dayanıklılığı

ve ekonomik etkiyi artıran; maliyet etkin ve çevresel açıdan faydalı bir strateji olarak değerlendirilmektedir. Yalıtım uygulaması enerji tasarrufunun yanı sıra toplam karbon ayak izini azaltmada da önemli rol oynamaktadır. Özellikle ülkemizde binaların ısıtılması amacıyla çoğunlukla fosil yakıtlar kullanılmaktadır. Bu bağlamda, ısı yalıtımı uygulamaları ile daha az yakıt tüketilerek enerji tasarrufu sağlanacak ve çevre kirliliği büyük ölçüde azalmış olacaktır. Buna bağlı olarak kullanılan kazan büyüklüğü, radyatör sayısı ve kalorifer tesisatlarındaki diğer ekipmanların harcama maliyetleri azaltılarak hem ülke ekonomisine katkı sağlanmış olacak hem de bireysel harcamalar azalarak tasarruf sağlanacaktır (Erzen vd., 2025).

Konutlarda ısı yalıtımının sağladığı temel avantajlar şu şekilde özetlenebilmektedir (Klemczak vd., 2024).

*Isıl konfor:* Binalarda ısı yalıtım uygulamaları mekanik iklimlendirme sistemlerine olan bağımlılığı azaltmakla beraber özellikle mevsimler arası dönemlerde iç mekanların ısı konfor süresini de uzatmaktadır.

*Binaların yapısal bütünlüğü:* Binalar için yüksek sıcaklık değişimleri, istenmeyen termal hareketlere neden olarak bina yapısına ve iç mekana zarar verebilmektedir. Binalarda uygun ısı yalıtımı kullanılarak sıcaklık dalgalanmalarını minimize etmeye ve bina bütünlüğünü korumaya yardımcı olmaktadır. Böylelikle bina yapısı, sıcaklık dalgalanmaları ve nem yoğunlaşmasından kaynaklanan hasarlardan korunmaktadır.

*Enerji tasarrufu:* İyi yalıtılmış bir bina, kış aylarında ısıtma ve yaz aylarında soğutma için daha az enerjiye ihtiyaç duymaktadır. Böylece hem ekonomik tasarruf sağlanmakta hem de enerji kaynaklarının daha verimli kullanılması mümkün olmaktadır.

*Çevre koruma:* Isı yalıtımı uygulamaları sadece enerji maliyetlerinden tasarruf sağlamakla kalmaz, aynı zamanda mekanik iklimlendirme sistemlerine bağımlılığı da azaltmaktadır. Bu durum fosil yakıt tüketimini ve sera gazı emisyonlarını azaltmaktadır. Böylelikle çevresel sürdürülebilirlik desteklenmekte, insan sağlığı iyileştirilmiş olmaktadır.

*Ses Yalıtımı:* Isı yalıtımı uygulamaları çevresel gürültülerin azaltılmasına da katkı sağlamaktadır. Özellikle endüstriyel faaliyetler, kalabalık yaşam alanlarının bulunduğu bölgeler ve yoğun trafik bölgelerinde yalıtım uygulamaları önem kazanmaktadır.

*Yangın güvenliği:* Doğru yalıtım malzemesi, yangın sırasında alevlerin yayılmasını geciktirerek kontrol edilmesini kolaylaştırmaktadır. Böylelikle can güvenliğinin artmasına ek olarak yapı elemanlarının hasar görmesi de engellenmektedir.

*Ekonomik faydalar:* Enerji maliyetleri, bina işletme giderlerinin önemli bir bölümünü teşkil etmektedir. Doğru yalıtım uygulamaları ile bu maliyetlerde kayda değer azalma sağlanabilmektedir.

Sonuç olarak, binalarda ısı yalıtım uygulamaları bireysel enerji tasarrufu ve ekonomik fayda sağlamanın yanında ulusal enerji güvenliği, çevresel sürdürülebilirliği desteklemekte ve binaların uzun vadede dayanıklılığını artırmaktadır. Bu nedenle iklim değişikliği ile mücadele, ekonomik kalkınma ve toplumsal refahın sürdürülebilirliği açısından vazgeçilmez bir unsur haline gelmiştir.

#### **2.4. Isı yalıtım malzemelerinin tarihsel gelişimi**

Yalıtımın tarihi, eski uygarlıklardan günümüze kadar uzanmaktadır. Tarih öncesi çağlarda ısı yalıtım malzemelerinin kullanımı özellikle aşırı sıcak ve soğuk çevresel koşullarla mücadele etme amacını kapsamaktaydı. Maya, İnkâ ve Aztekler dahil olmak üzere ilk insanların zorlu iklim koşullarına karşı hayatta kalma mücadelesi, yalıtım konusunda çeşitli yöntemlerin ve malzemelerin geliştirilmesini zorunlu kılmıştır (Leo Samuel vd., 2017). Yalıtım malzemelerinin gelişimi, enerji verimliliği ve sürdürülebilirlik hedeflerine yanıt olarak tarihsel ve teknolojik süreçler tarafından şekillendirilmiştir. İlk yalıtım tekniklerinde çamur ve taş gibi yerel kaynaklardan elde edilen doğal malzemelerden yararlanılmıştır. Bu malzemeler, özellikle soğuk iklimlerde barınakların sıcaklık kontrolünü sağlamak amacıyla kullanılmıştır.

19. yüzyılda Sanayi Devrimiyle birlikte enerji maliyetlerinin artması ve sanayileşmenin hızlanması, daha etkili ve uzun ömürlü yalıtım malzemelerine olan talebi artırmıştır. 19. ve 20. yüzyılın başlarında mantar, talaş, testere tozu, ahşap yünü ve asbest yaygın kullanılan yalıtım malzemeleridir. 19. yüzyılın ortalarında, yeni teknolojiler mantar granüllerinin çeşitli bağlayıcılarla birleştirilmesine olanak tanımış bu da mantar levhalar ve tuğlaların üretimini sağlamıştır. Aynı yüzyılın sonlarında, mantar granüllerinin ek bağlayıcılar kullanmadan ısıtılarak genleşmesiyle mantarın doğal reçineleriyle bağlanması mümkün olmuştur (Cetiner & Shea, 2018). 20. yüzyılda daha düşük üretim maliyetleriyle benzer yalıtım özellikleri sunan poliüretan köpük ve polistiren gibi sentetik malzemelerin ortaya çıkması, mantar yalıtımının pazar payını azaltmıştır (Kozub, 2024).

20. yüzyılın başlarında, organik kimya alanlarında kaydedilen gelişmeler, çeşitli petrol bazlı plastiklerin keşfedilmesine olanak tanımıştır. %85'e kadar geri dönüştürülmüş kâğıt malzemelerden üretilen selüloz yalıtım malzemeleri ilk olarak 1920'lerde popülerlik kazanmıştır. Bu malzemeler mükemmel termal özellikleri, ses yalıtım yetenekleri ve çevre dostu üretim

süreçleriyle dikkat çekmiştir (Su vd., 2024). 1930'larda geliştirilen fiberglas yalıtım malzemesi, yıllar içinde konut ve ticari inşaatlarda en çok kullanılan malzemelerden biri haline gelmiştir.

20. yüzyılın ortalarında mineral yünü, cam yünü ve poliüretan köpük gibi yalıtım malzemeleri daha düşük ısı iletkenlik değerleri sunarak enerji kayıplarını azaltmada etkili bir çözüm sağlamıştır. Malzemenin yangına dayanıklılık özellikleri, kurulum kolaylığı ve farklı formlarda üretilebilmesi popüler olmasına katkıda bulunmuştur.

21. yüzyılda enerji ve çevre problemlerinin küresel ölçekteki yayılımı, ısı yalıtım malzemelerinde önemli gelişmelerin önünü açmıştır. Kaydedilen ilerlemeler, performans ve sürdürülebilirliği artırmanın yanı sıra karbon emisyonlarının azaltılması ve enerji verimliliğinin iyileştirilmesi yoluyla iklim değişikliğiyle mücadelede öncülük etmiştir (Braish vd., 2023). Bu yüzyılda en önemli yeniliklerden biri aerojellerdir. Düşük yoğunluk, hafiflik ve mükemmel yalıtım performansına rağmen inşaat sektöründe yalıtım malzemesi olarak kullanımları yüksek maliyetleri nedeniyle sınırlıdır. Aerojelin yanı sıra vakum yalıtım panelleri ve faz değişim malzemeleri, ısı yalıtımında son teknoloji ürünler olarak ortaya çıkmıştır. Günümüzde ise organik ve sentetik malzemelerin kullanımı yaygınlaşmış, teknolojik gelişmelerle birlikte yüksek performanslı yalıtım malzemeleri üzerine daha kapsamlı çalışmalar gerçekleştirilmiştir (Zhilyaev vd., 2023).

## **2.5. Isı yalıtımının mekanizması**

Isı yalıtım malzemeleri, farklı sıcaklıklara sahip alanlar arasındaki ısı transferini en aza indiren malzemelerdir. Bunlar; iletim (kondüksiyon), taşınım (konveksiyon) ve ışıınım (radyasyon) yollarıyla ısı transferine dirençli bir bariyer oluşturarak ısı kayıp ve kazançlarını etkili bir şekilde azaltmaktadır (Hofmeister, 2024). Fiberglas, geliştirilmiş köpük veya mineral yün gibi yaygın yalıtım malzemeleri, çok sayıda küçük hava boşluğu içerecek şekilde tasarlanmıştır. Yalıtım malzemeleri küçük alanlarda hapsolmuş havayı ve diğer gazların hareketini kısıtlayarak ısının iletimini engellerken aynı zamanda binalardan kaynaklanan sera gazı emisyonlarını da minimize edebilmektedir.

Yalıtım malzemelerinde toplam ısı transferi; katı malzeme içinden iletim, gaz molekülleri aracılığıyla iletim ve gözenekler arası radyasyon olmak üzere üç ana bileşenden oluşmaktadır. Malzemedeki hava kabarcıklarının boyutları mikron düzeyinde olduğundan konveksiyonla ısı iletimi ihmal edilebilmektedir. Konveksiyon, parçacıklar arasındaki hava boşluklarının düzeni ve hacminden etkilenirken; iletim ise katı parçacıklar arasındaki temas alanı ve temas noktalarının yoğunluğundan etkilenmektedir (Petcu vd., 2023). Malzemenin yalıtım performansında optimum yoğunluk oldukça önemlidir. Malzemedeki hava boşlukları ne kadar

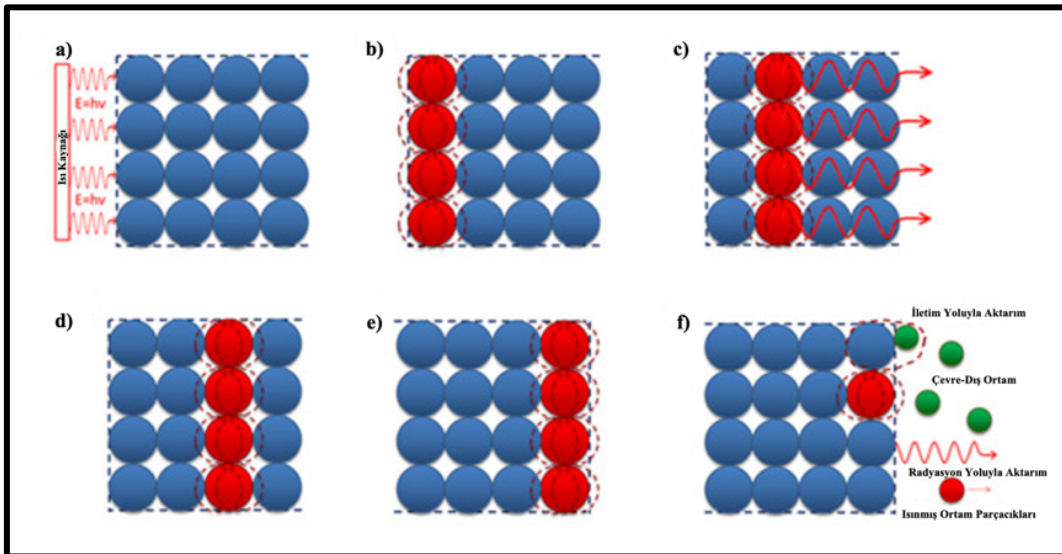
küçükse, yalıtım performansı o kadar iyi olmaktadır. Bir malzemenin yoğunluğu arttıkça, hava boşluklarının boyutu azalmakta ve parçacıklar arasındaki temas noktalarının sayısı artmaktadır. Bu nedenle, homojen bir şekilde hava ile dolu bir malzeme sıkıştırıldığında optimum noktada ısı transferinin konvektif bileşeni azalırken, katı parçalar arasındaki bağlantının iyileşmesi nedeniyle iletim artmaktadır (Véjelic vd., 2023).

Tipik yalıtım malzemelerinde ısı direnç genellikle durgun havanın  $R$ -değerini aşamaz. Ancak bazı polistiren ve poliüretan esaslı malzemelerde, gözeneklerde hava yerine havadan daha ağır olan yani ısı iletkenliği havadan daha düşük florokarbon gazı doldurulmaktadır. Bu da daha yüksek  $R$ -değerinin oluşumuna olanak tanımaktadır. Bu nedenle malzemede konveksiyon, radyasyon ve iletim olmak üzere üç ısı transferinin etkileşimi, yalıtımın genel etkinliğini belirlemektedir (Al-Homoud, 2005). Ayrıca polimerik malzemelerin düzensiz zincir yapısı nedeniyle ısı akışının rastgele yönlere dağılması malzemenin termal direncini artırmaktadır. Böylelikle bu tür amorf malzemelerde ısı iletkenlik katsayısı azalmaktadır.

Isı transferi; iletim, taşınım ve ışınım olmak üzere üç temel fiziksel mekanizma ile gerçekleşmektedir (Miracco vd., 2025). Bir malzemenin toplam ısı iletkenliği ( $\lambda_t$ ) D.1'de görüldüğü gibi;  $\lambda_{kond}^s$  (katı iletimi),  $\lambda_{kond}^g$  (gaz iletimi),  $\lambda_{konv}$  (konveksiyon) ve  $\lambda_{rad}$  (radyasyon) katkılarının toplamından elde edilmektedir (Cai vd., 2024).

$$\lambda_t = \lambda_{kond}^s + \lambda_{kond}^g + \lambda_{konv} + \lambda_{rad} \quad (D.1)$$

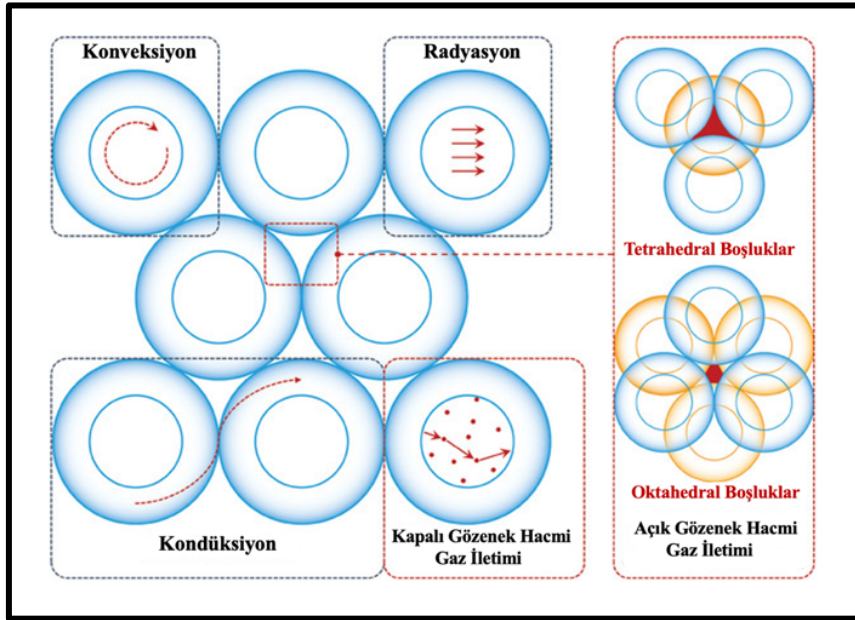
Kristal yapıdaki bir malzemede atomik düzeydeki ısı iletim mekanizması Şekil 2.6.'da verilmiştir. Şekil; (Burger vd., 2016) kaynağından değiştirilerek yeniden çizilmiştir.



Şekil 2.6. Kristal yapıdaki malzemelerin ısı iletim mekanizması.

Malzemede ısı enerjisi ilk olarak numunenin yüzey atomlarına iletilir (a). Bu aşama enerji girişi olarak adlandırılabilir. Isı etkisiyle yüzey atomları titreşim enerjisi kazanır (b). Bu durum atomik titreşimi temsil etmektedir. Yüzey atomlarının termal enerjisi benzer hızda dalgalar şeklinde komşu atomlara aktarılır (c). Ardından ısı enerjisi numune içinde yayılmaya başlar (d). Fonon taşınımı olarak adlandırılan bu durum ısının tüm kristal yapıya yayılmasını sağlar (e). Atomların titreşimlerinin komşu atomlara kısmi olarak etki etmesiyle makro ölçekte yayılım gerçekleşir. Isı, numunenin karşı yüzeyine ulaştığında iletim veya radyasyon yoluyla kısmen çevreye aktarılır (f). Bu çevresel aktarım sonucunda transfer süreci tamamlanmış olur (Burger vd., 2016).

Gözenekli malzemelerde ısı transfer mekanizmasının nasıl gerçekleştiği Şekil 2.7.'de gösterilmektedir. Şekil, (H. Lin vd., 2024) kaynağından değiştirilerek yeniden çizilmiştir.



Şekil 2.7. Gözenekli yapılarda ısı iletim mekanizması.

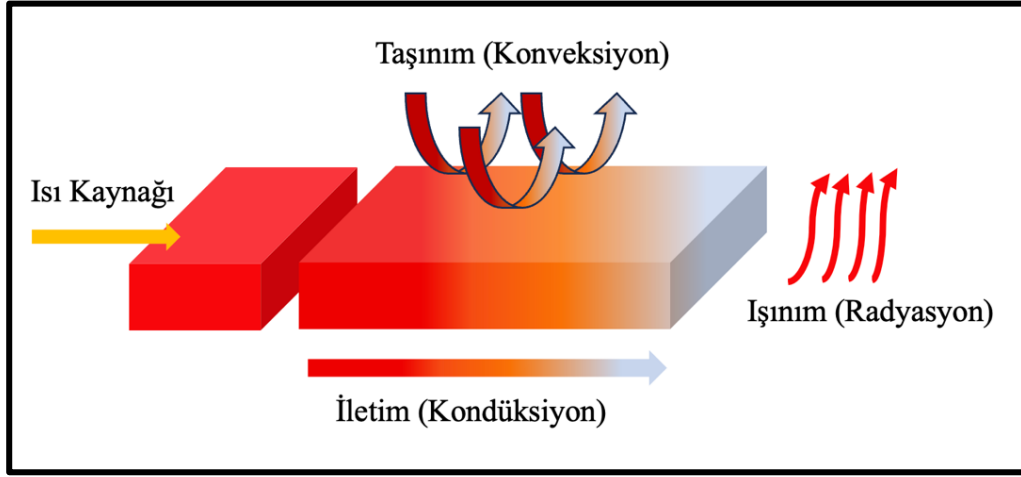
Gözenekli malzemelerde ısı transferini sınırlandıran çok fazlı ve heterojen bir mekanizma söz konusudur. Yapıda atomik sürekliliğin bulunmayışı ve oktahedral ve tetrahedral boşluk yapılarının varlığı ısı akışına engel olmaktadır. Gözenek hacmi sayesinde katı fazdan gaz fazına geçmeye çalışan ısı termal dirençle karşılaştığından malzeme yalıtım özelliği kazanmaktadır. Kristal yapıda fonon ve serbest elektronlar ana taşıyıcı iken gözenekli malzemelerde iletim, taşınım ve radyasyonla transfer etkin rol oynamaktadır.

### 2.5.1. Isı iletimi (kondüksiyon)

Isı iletimi, farklı sıcaklıklara sahip bir maddenin makro ölçekte hareketi olmaksızın, parçacıkların mikroskobik titreşim enerjilerinin çarpışma yoluyla komşu parçacıklara

aktarılması durumudur (Burger vd., 2016). Moleküller arasındaki titreşim ve çarpışma sonucu enerji, yüksek sıcaklıklı bölgeden düşük sıcaklıklı bölgeye doğru iletilmektedir. Özellikle katı ortamlarda belirgin olan bu mekanizmada, enerji akışı doğrudan temas yoluyla meydana gelmektedir. Isı yalıtım malzemelerinde katı faz iletimi; kristal yapısı, saflığı, bağ türü ve atomik düzeni gibi özelliklerle malzemenin gözenek yapısına bağlıdır (H. Lin vd., 2024).

Şekil 2.8.'de ısı transfer mekanizmaları verilmiş olup şekil, (Sako vd., 2020) kaynağından değiştirilerek yeniden çizilmiştir.



Şekil 2.8. Isı transfer mekanizmaları.

Düşük yoğunluklu ve daha küçük gözenek boyutuna sahip yalıtım malzemelerinde katı fazında ısı iletimi önemli ölçüde düşüktür. Katı fazda ısı iletimi, yük taşıyıcı elektronlar veya atomik kafes titreşim enerjisinin kuantumları olan “fononlar” aracılığıyla gerçekleşmektedir. Yarı iletken veya yalıtkan katı ortamlarda fononlar, metaller gibi iletken katılarda ise hem “fononlar” hem de “serbest elektronlar” ısı iletim mekanizmasına eşlik etmektedir (Feng vd., 2024). Bu bağlamda, elektriksel olarak iletken olan katı maddelerde serbest elektronların varlığı ısı iletiminin daha hızlı gerçekleşmesini sağlamaktadır.

Seramik ve polimer gibi serbest elektrondan yoksun, elektriksel olarak yalıtkan katı malzemelerde ısı iletimi esas olarak atomların ve moleküllerin denge konumları etrafında titreştiği kristal kafesin titreşimi tarafından üretilen fononların katkısıyla sağlanmaktadır (Y. Guo vd., 2020). Fononların yön, enerji veya momentum değişikliklerine uğraması sonucunda “fonon saçılması” meydana gelmektedir. Bir sebeple bozulan fonon taşınımı, termal iletkenliği önemli ölçüde azaltmaktadır. Kristal yapıdaki bir malzemede düzenli atomik dizilim fonon yayılmasını kolaylaştırırken, amorf yapıdaki malzemelerde kristal yapı düzensizliği fonon saçılmasını artırarak ısı direnci yükseltmektedir.

Isı iletimi, homojen ve izotropik bir ortamda Fourier'in "Isı İletim Yasası" ile hesaplanmaktadır. İlgili bağıntılar D.2 ve D.3'te verilmiştir. Bu doğrultuda, bir malzeme içinden geçen ısı akış hızı ( $q$ ), sıcaklık gradyanı ( $\Delta T = dT/dx$ ) ve malzemenin ısı iletim katsayısı ( $k$ ) ile doğru orantılıdır. Matematiksel olarak; ısı iletkenlik katsayısı düşük olan malzemeler daha iyi ısı yalıtkanlardır (Bodin vd., 2025).

$$q = -k \cdot A \cdot \frac{dT}{dx} \quad (D.2)$$

$$q = \frac{k \cdot A \cdot \Delta T}{L} \quad (D.3)$$

Uygulama örnekleri bakımından; cam yünü, silika aerojel şilte ve taş yünü gibi lifli malzemeler katı fazın yapısına bağlı olarak gerçekleşen ısı iletimini sınırlandırmak amacıyla düşük yoğunluklu ve gözenekli olarak tasarlanmaktadır. Bu yalıtım malzemeleri gaz fazı ile birbirine bağlı gözenekli ağ yapısı sayesinde ısı iletimi büyük ölçüde yavaşlamaktadır. Ancak sıcaklık artışıyla birlikte malzemenin özellikle büyük gözeneklerindeki gaz fazının ısı iletkenliği artmakta ve dolayısıyla yalıtım performansı zayıflamaktadır (Y. Wang vd., 2023).

### 2.5.2. Isı taşınımı (konveksiyon)

Gaz veya sıvı ortamlarda enerjinin, hareketli parçacıklar aracılığıyla aktarılması durumuna "ısı taşınımı" ya da "konveksiyon" denilmektedir (Şekil 2.8.). Bu mekanizmada, yüksek sıcaklıklı bölgelerdeki sıvı veya gaz moleküllerinin kinetik enerjileri artmakta ve bu enerji düşük sıcaklıklı bölgelere taşınarak ısı geçişine sebep olmaktadır (Feng vd., 2024). Konveksiyon, özellikle gaz fazındaki yalıtım ortamları için önemli bir ısı transfer mekanizmasıdır.

Yalıtım malzemelerinin mikro veya nano ölçekteki gözenekleri, moleküllerin serbest hareketini viskoz kuvvetlerle engellemektedir. Bu sayede gözenek içinde konvektif akımlar bastırılmakta ve dolayısıyla ısı iletkenlik azalmaktadır (Cai vd., 2024). Özellikle kapalı hücreli köpükler, lifli malzemeler ve aerojel gibi yüksek gözenekli yalıtım malzemeleri için bu durum daha belirgin olmaktadır.

Konveksiyonla ısı transferi temelde iki türdür. Bunlardan doğal (serbest) konveksiyon, sıcaklık farkının sebep olduğu yoğunluk farklarıyla oluşurken (ısınan havanın yükselmesi gibi); zorlanmış konveksiyonda fan ya da pompa gibi dış bir kuvvetin varlığı ile gaz akışı gerçekleşmektedir. Konveksiyonla ısı transferi, Newton'un "Soğuma Yasası" ile ifade edilmektedir. İlgili hesaplama formülü D.4'te verilmiştir.

$$q = h \cdot A \cdot (T_s - T_\infty) \quad (D.4)$$

Burada ısı transfer hızı  $q$  (W), ısı geçiş katsayısı  $h$  (W/m<sup>2</sup>·K), ısı geçiş yüzeyi  $A$  (m<sup>2</sup>), yüzey sıcaklığı  $T_s$  (K veya °C) ve akışkanın sıcaklığı  $T_\infty$  (K veya °C) olarak tanımlanmaktadır (B. Zhao, 2022).

Yeni nesil yalıtım malzemeleri tasarlanırken geliştirilmiş polistiren, ekstrüde polistiren, cam köpüğü ve fenolik köpük gibi kapalı hücre yapısı özellikle tercih edilmektedir. Bu tür malzemelerde kapalı hücre yapısı, hava hareketini baskılayarak taşınım kaynaklı ısı kaybını engellemektedir. Gözeneklerdeki gaz fazı, bu durumda ısıl iletkenliği azaltmaya yardımcı rol oynamaktadır. Ancak sıcaklık artışıyla birlikte bu gaz fazın ısıl iletkenliği de artmaktadır. Bu durumda konveksiyonla iletimin dolaylı etkileri artırılmaktadır (Y. Wang vd., 2023).

### 2.5.3. Işınım (radyasyon)

Isı transferinin bir diğer mekanizması “ışınım” (radyasyon) olarak adlandırılmaktadır. Radyasyonla ısı transferi, ısının elektromanyetik dalgalar aracılığıyla her yöne yayılması şeklinde tanımlanmaktadır (Şekil 2.8.). Bu mekanizmada enerjinin “fotonlar” şeklinde, herhangi bir ortam gereksizinin aktarımı söz konusudur (Feng vd., 2024). Radyasyonla ısı transferinde malzemenin yüzey özellikleri belirleyici rol oynamaktadır. Bunlardan ilki, yansıtıcı yüzeyler veya opak katmanlardır. Yansıtıcı özelliğe sahip yüzeyler ısıyı geri yansıtma suretiyle ısı geçişini engellemektedir. Buna karşın koyu renkli ve mat görünümdeki yüzeyler ışınımı daha fazla soğuracağından enerji transfer düzeyinin artmasına sebep olmaktadır (Lisowski & Glinicki, 2023). Ayrıca bol miktarda hava boşluğu bulunan gözenekli ve lifli malzemeler en iyi yalıtkanlar olarak bilinmektedir. Bu malzemeler yüksek oranda hava boşluğu içerdiğinden taşınım ve radyasyon yoluyla ısı transferi aynı anda etki etmektedir. Ancak arojel gibi mikro-nano ölçekli gözenek yapısına sahip bir malzeme, taşınım mekanizmasının etkisi minimum olacağından ihmal edilmektedir. Bu durumda ısı iletimi ve ışınım baskın rol oynamaktadır. Yalıtım uygulamalarında, yüksek sıcaklıklı yüzeylerde ışınımın sebep olduğu enerji kayıpları dikkate alınmaktadır.

Radyasyonla ısı transferi, yüzey sıcaklığı ve yaydığı enerjinin dalga boyuna bağlı olarak artmakta olup “Stefan–Boltzmann” yasasıyla ifade edilmektedir. D.5’te verilen bağıntıda; radyasyonla ısı transferi  $q$  (W), yüzeyin ışınım katsayısı  $\varepsilon$  [0-1], Stefan–Boltzmann sabiti  $\sigma$  ( $\sim 5,67 \times 10^{-8}$  W/m<sup>2</sup>·K<sup>4</sup>), yüzey alanı  $A$  (m<sup>2</sup>), cismin yüzey sıcaklığı  $T$  (K veya °C) ve çevre sıcaklığı  $T_0$  (K veya °C) olarak ifade edilmektedir (Henry & Merlis, 2019).

$$q = \varepsilon \cdot \sigma \cdot A \cdot (T_s^4 - T_j^4) \quad (D.5)$$

Mevcut ısı transfer mekanizmaları bir bütün olarak değerlendirildiğinde, bir yalıtım malzemesinin etkinliği; gözeneklilik, açık/kapalı hücre tipi, lif yönelmesi gibi mikro yapı

özelliklerine, malzeme kalınlığına ve montaj biçimine, UV, sıcaklık ve nem gibi çevresel koşullara bağlıdır (Lisowski & Glinicki, 2023).

Isı iletimi, taşınım ve ışınım yoluyla transferin bir bütün olarak ele alındığı bir tasarımda üstün yalıtım performansı elde etmek mümkün olmaktadır. Doğru bir şekilde monte edilmiş yalıtım malzemeleri iletim ve taşınım yoluyla gerçekleşen ısı transferini yavaşlatarak enerji verimliliğini artırmaktadır. Yalıtım uygulamaları yalnızca konut binalarında değil aynı zamanda endüstriyel sistemlerin iç ortam sıcaklıklarını korumak, ısıtma ve soğutma için harcanan enerjiyi azaltmak ve enerji verimliliğini artırmak açısından oldukça önemlidir. Isı yalıtımının etkinliği, büyük oranda düşük ısıl iletkenliğe sahip malzemelerle sağlanmaktadır. Böylece soğuk iklimlerde ısı kaybının önlenmesi veya sıcak iklimlerde ısı kazanımının engellenmesi mümkündür. Yüzyıllar boyunca, bu hedeflere ulaşmak için her biri kendine özgü özelliklere ve sınırlamalara sahip çok çeşitli malzemeler kullanılmıştır. Erken dönem yalıtım uygulamaları öncelikle konfora odaklanırken; çağdaş teknikler enerji tasarrufu, sera gazı emisyonlarının azaltılması ve sürdürülebilir bina tasarımlarının geliştirilmesine öncelik vermektedir.

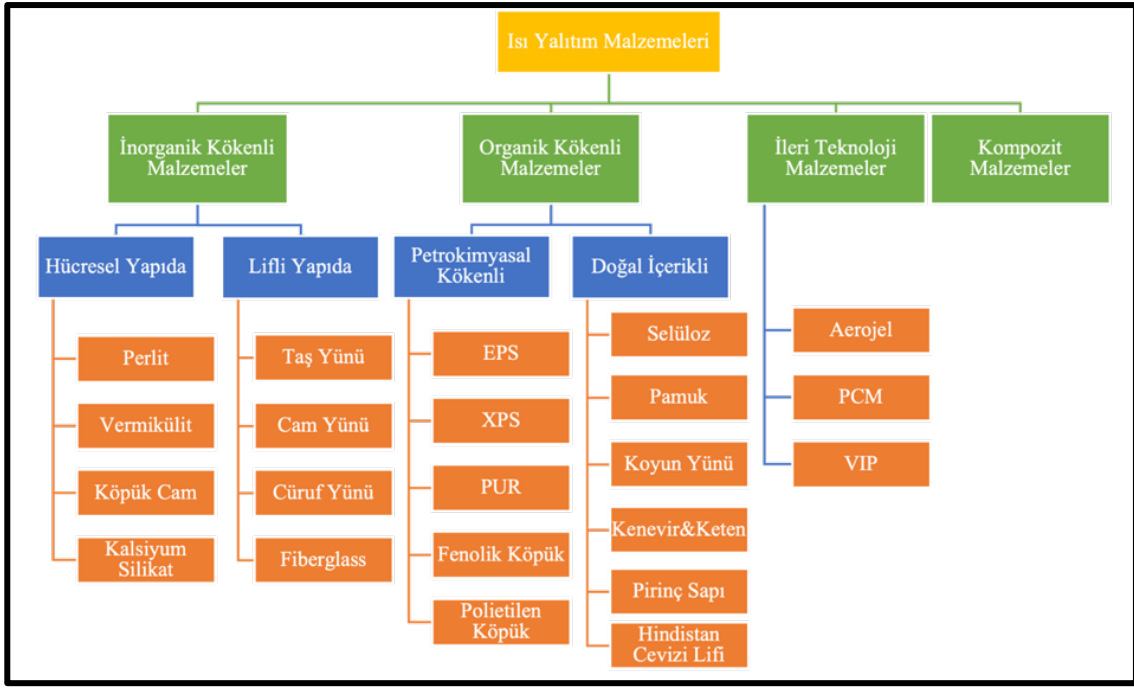
## **2.6. Isı yalıtımında kullanılan malzemeler**

Isı yalıtım malzemeleri, genel olarak katı bir matris içerisinde rastgele veya düzenli olarak dağılmış gaz fazındaki hücreler, gözenekler veya boşluklardan oluşan çok fazlı yapılardır (Peavy, 1996). Bu malzemeler doğru bir şekilde uygulandığında ısı akış hızını iletim, taşınım ve radyasyon yoluyla geciktirmektedir. Uygun şekilde seçilmiş yalıtım malzemelerinin avantajları kullanım amaçlarına bağlı olarak değişmektedir. Bunlar; havalandırma ve iklimlendirme sistemlerine olan bağımlılığın azaltılması, enerji tasarrufu, iç mekan termal konfor sürelerinin uzatılması, ses yalıtımı ve yangın koruması olarak örneklendirilebilmektedir (Ham vd., 2024).

Isı yalıtım malzemeleri; bileşim, yapı, uygulama alanı ve özel nitelikler gibi çeşitli kriterlere göre sınıflandırılabilir. Genel olarak yalıtım malzemeleri organik ve inorganik kökenli olmak üzere iki ana kategoriye ayrılabilir da malzeme bilimindeki teknolojik gelişmeler sonucunda ileri teknoloji ürünler ve kompozitler de sınıflamaya dahil edilmiştir (Ali vd., 2024).

Yapısal özellikleri bakımından hücresel, lifli veya gözenekli, kimyasal bileşimlerine göre organik veya inorganik, kökenlerine göre ise mineral, bitkisel, hayvansal, sentetik veya geri dönüştürülmüş hammaddeden elde edilen türler olarak sınıflandırılmaktadır (Violano & Cannaviello, 2023).

Şekil 2.9.'da ısı yalıtım malzemelerinin kökensel sınıflandırması verilmiştir.



Şekil 2.9. Isı yalıtım malzemelerinin sınıflandırılması.

Doğal kökenli yalıtım malzemeleri; sürdürülebilirlik, biyolojik olarak parçalanabilirlik ve çevresel güvenlik açısından ön plana çıkarken; sentetik malzemeler çok yönlülük, dayanıklılık ve yüksek performans özellikleriyle modern yalıtım çözümleri için önemli bir konuma sahiptir.

Isı yalıtım malzemeleri, kullanım yeri ve şekline bağlı olmak üzere çeşitli formlarda üretilebilmektedir. Her biri belirli kurulum yöntemleri ve uygulamalar için en iyi performansı gösterecek yalıtım levhaları, rulolar, gevşek dolgu malzemeleri, sert levhalar veya yansıtıcı yapılar şeklinde üretilebilmektedir. Doğru yalıtım malzemesi tipi ve formunun seçilmesi, uygulama türüne ve istenen malzemelerin fiziksel, termal ve mekanik özelliklerine bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. Cam yünü ve taş yünü gibi mineral esaslı malzemeler; levha veya rulo formunda üretilebileceği gibi üfleme yoluyla da uygulanabilmektedir. Selüloz, perlit, vermikülit dökme veya betonla karıştırma şeklinde uygulanabilen gevşek dolgu malzemeleri formunda bulunabildiği gibi levha veya blok formunda da üretilebilmektedir (Jensen vd., 2023). Duvar, çatı ve zeminlerin yalıtılmasında kullanılan polistiren (EPS ve XPS), poliüretan ve poliizosiyanürat çoğunlukla sert levha formunda üretilmektedir. Buna ek olarak poliüretan ve poliizosiyanürat köpük püskürtme yöntemi ile yerinde uygulanabilen formlarda üretilmektedir. Yansıtıcı malzemeler ise genellikle alüminyum folyo veya seramik kaplamalar şeklinde kullanılmaktadır (Klemczak vd., 2024).

Yapı sektöründe enerji verimliliği sağlamak amacıyla kullanılan yalıtım malzemeleri; yalnızca termal performans değil, aynı zamanda çevresel sürdürülebilirlik, kullanım ömrü ve güvenlik kriterleri açısından da değerlendirilmektedir. Dolayısıyla, bina yalıtımında kullanılacak

malzeme seçiminde uygulama alanı, iklim koşulları, çevresel etmenler ve maliyet gibi unsurlar da dikkate alınmalıdır. Günümüzde ısı yalıtımı alanındaki araştırmalarda görülen artış, enerji verimliliği yüksek ve çevre dostu yapıların geliştirilmesi yönündeki küresel eğilimi ortaya koymaktadır.

### 2.6.1. Taş yünü

Mineral yünü; taş, cam ve cüruf yünü gibi türlerden oluşmaktadır. Bunlardan en yaygın olanları taş yünü ve cam yünüdür (Şekil 2.10 a-c.). Taş yünü; diyabaz, anortozit, dolomit, bazalt ve olivin kumu gibi doğal taşların yaklaşık 1450-1520 °C sıcaklıklarda ergitilmesi sonucu elde edilmektedir. Üretim sürecinde reçineler, nişasta veya yağlar gibi kohezyon maddeleri kullanılarak birbirine bağlanan camsı liflerin çapı 2-6 µm, uzunluğu ise 2-6 mm arasında değişmektedir (Schiavoni vd., 2016). Taş yününün yoğunluğu 30 ila 200 kg/m<sup>3</sup> arasında değişmekte ve bu değer XPS ile EPS'nin yoğunluğundan daha yüksek değer sunmaktadır. Isıl iletkenliği 0,033 ila 0,040 W/(m.K) arasında değişirken, buhar difüzyon direnci 1 olarak bildirilmiştir. Küf oluşumuna dirençli olan taş yünü, hacimce %2,5-10 arasında değişen su emme değerine sahiptir (Kumar vd., 2020).



Şekil 2.10. Farklı formlarda üretilen taş yünü (a-b-c), cam yünü (d-e-f) ve genişletilmiş perlit (g-h-i) (İzocam, 2026; Gnyapy, 2026; Sadıkoğlu Yalıtım, 2026; Kaleperlit, 2026; Aspayapy, 2026).

Taş yünü, 700 °C sıcaklıklara kadar dayanıklılık gösterebilmekte ve A1-A2 sınıfı yanmaz malzeme olarak sınıflandırılmaktadır. Biyolojik ve kimyasal maddeler ile titreşim gibi mekanik etkilere karşı dayanıklı olması nedeniyle çatılarda, zeminlerde, duvarlarda ve tavanlarda yaygın olarak kullanılabilir (Karamanos vd., 2008). Düşük yoğunluklu türleri genellikle taşıyıcı

olmayan iç duvar sistemleri ve ara bölmelerde kullanılırken, yüksek yoğunluklu olanları çatı, dış duvar ve döşeme gibi mekanik dayanım gerektiren uygulamalarda tercih edilmektedir. Ayrıca endüstriyel yalıtım uygulamaları ile elektronik sektöründeki yalıtım uygulamalarında sıklıkla tercih edilmektedir. Isı yalıtım performansının yanı sıra gürültü ve titreşim kontrolü ile ses yalıtımı sağlaması ve yangına karşı dayanıklılık gibi avantajları sebebiyle birçok mühendislik çözümleri için etkili bir malzeme olarak öne çıkmaktadır (Gorur Avsaroglu, 2025).

### **2.6.2. Cam yünü**

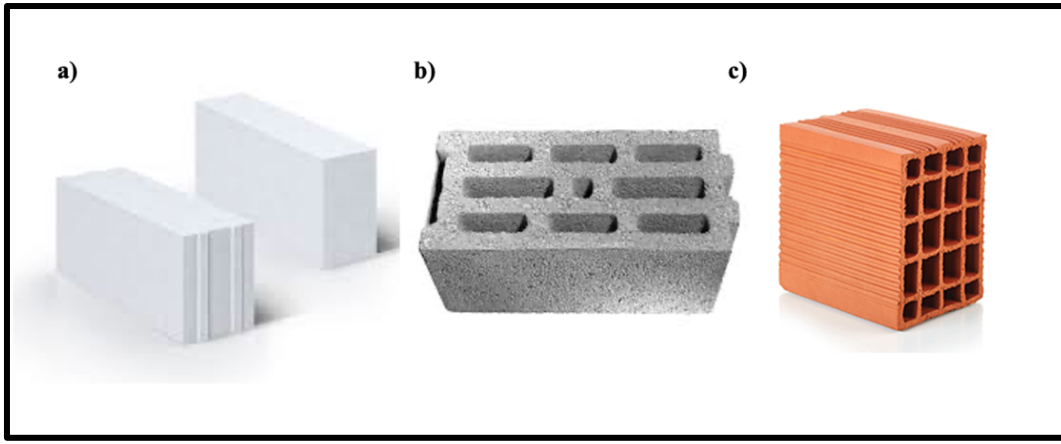
Mineral kökenli lifli ısı yalıtım malzemelerinden biri olan cam yünü; kuvars kumu, dolomit, kireçtaşı ve genellikle geri dönüştürülmüş camların 1300-1450 °C sıcaklıklarda eritilmesi ve elyaf haline getirilmesi ile elde edilmektedir. Cam yününün ısıl iletkenliği taş yününden bir miktar düşük olup 0,030 ile 0,050 W/(m.K) arasında değişmektedir (Kumar vd., 2020). Türkiye’de kullanılan TS EN 13501-1 standardına göre cam yünü A1-A2 sınıfı yanmaz malzeme olarak sınıflandırılmaktadır (TS EN, 16 Aralık 2019). Malzeme; 13-100 kg/m<sup>3</sup> üretim yoğunluğuna ve 1 değerinde buhar difüzyon direnç katsayısına sahiptir (Hill vd., 2018). Hem ısı hem de ses yalıtımında sergilediği iyi performans ek olarak kolay uygulanabilir olması, yangına dayanıklı ve nispeten çevre dostu olmaları nedeniyle yaygın kullanılmaktadır. Rulo, levha veya gevşek dolgulu formlarda üretilirken, levha formundaki üretimlerde lifleri bağlamak için genellikle renksiz reçineler eklenerek üstün yangın direnci ve mekanik dayanım elde edilmektedir (Hill vd., 2018) (Şekil 2.10 d-f.).

### **2.6.3. Genleştirilmiş perlit (GP)**

Genleştirilmiş perlit, inorganik kökenli hücreli yalıtım malzemeleri arasında yer almaktadır. Volkanik kökenli perlit mineralinin 800-1150 °C gibi yüksek sıcaklıklara maruz bırakılarak bünyesinde bulunan yaklaşık %25 oranındaki suyun buharlaştırılması sağlanmaktadır. Bu süreçte perlit taneleri genişlerken hacimsel olarak önemli ölçüde artış göstermekte ve düşük yoğunluklu, gözenekli ve açık renkli genleştirilmiş perlit elde edilmektedir (Dzięcioł vd., 2025). GP; sıva, harç ve beton agregası olarak kullanılabilirdiği gibi, yalıtım levhası formuna da dönüştürülebilmektedir (Şekil 2.10 g-ı.). Gözenekli yapısında yer alan hava boşlukları, malzemenin ısı yalıtım özelliğini arttırmaktadır. Yapı bakımından hafif bir malzeme olması nedeniyle bina yükünü arttırmaz ve yapıda kullanım alanının genişlemesini sağlar. Yığın yoğunluğu 25-400 kg/m<sup>3</sup> arasında değişirken, ısı iletkenlik katsayısı ise 0,034-0,059 W/(m.K) aralığında değişmektedir. Hammadde kaynağının bolluğu, yalıtım özelliklerinin iyi oluşu ve hafif bir yapı malzemesi olması gibi birçok olumlu yönleri nedeniyle genleştirilmiş perlit üzerine çalışmalar artarak devam etmektedir (Rungrueng vd., 2025).

#### 2.6.4. Gazbeton

Silis kumu, çimento ve kireç ile birlikte su ile karıştırılarak üretilen yapı malzemesidir. Elde edilen hamura alüminyum tozu eklenerek gaz oluşumu sağlanmaktadır. Hamur malzeme kalıplara dökülerek istenen ebatlarda kesilmekte ve buhar kürü uygulanarak sertleşmiş yapı elde edilmektedir. Ülkemizde gazbeton ürünler; yalıtım plağı, donatısız duvar blokları, çatı ve döşeme elemanları ile bölme panolar şeklinde üretilmektedir (Şekil 2.11 a). Üretim aşamasında tehlikeli atık oluşmadığından çevre kirliliğı problemlerine sebep olmamaktadır. Ayrıca kullanım sırasında bozunma ya da hasar durumuna sık rastlanmadığından bakım maliyeti yok denecek kadar azdır.



Şekil 2.11. Gazbeton (a), bims (b) ve geleneksel tuğla örnekleri (c).

Isı yalıtım malzemeleri arasında en düşük ısıl iletkenliğe sahip malzemenin gaz beton olduğu bilinmektedir. Kolay işlenebilen, hafif, gözenekli, uzun ömürlü, ekonomik, kolay işçilikli ve yüksek dayanımlı bir yalıtım malzemesidir. Plak şeklinde üretilen gaz betonlarda ısıl iletkenliği 0,050 W/(m.K) olarak belirtilmiştir. Yanma sınıfı A1 olan gaz beton 1200 °C sıcaklığa kadar dayanıklı olabilmektedir. Alev geçişini engelleme özelliğı sayesinde yangın duvarı olarak kullanılabilir (Avan vd., 2021).

#### 2.6.5. Bims (pomza taşı)

Volkanik kökenli, silikat esaslı, süngerimsi yapıya ve camsı dokuya sahip olan bims (pomza); oldukça gözenekli (%70-85) bir volkanik kayadır. Gözenekli yapısı sayesinde hafif bir malzemedir. Silis içeriğı %75'e kadar ulaşabilmekte olup birim hacim ağırlığı 1000 kg/m<sup>3</sup>'ten küçüktür. Fiziksel ve kimyasal etmenlere karşı oldukça dayanıklıdır. Beton ile kıyaslandığında 6 kat daha esnektir. Bu özelliğı sayesinde deprem anında herhangi bir kırılma, çatlama gibi davranış sergilemeyerek sismik dalgaların soğurulma oranını artırmaktadır (Avan vd., 2021).

Yapı sektöründe duvar blokları, sıva kumu, yalıtım plakları ve asmolenlerde kullanılırken; en yaygın kullanım alanı yalıtım teknolojileri olarak ön plana çıkmaktadır. Standart bims blokların (19x33x24 cm boyutlarında) ısı iletkenlik değeri 0,186 W/(m.K) olarak verilmiştir (Şekil 2.11 b). Son yıllarda yapı sektöründeki gelişmelerle birlikte bims malzemesi diğer yapı malzemeleri ile birlikte kullanılarak yeni malzemeler üretilmeye başlanmıştır. Bims agregalı hafif beton üretimi ve EPS kullanılarak geliştirilen izolasyon blokları buna örnek olarak verilebilmektedir. Bu kapsamda ilk kez Türkiye’de üretilen hibrit bloklar; orta kısmında EPS köpük tabakası, iki kenarda ise bims agregalı hafif beton bulunan yalıtım ürünüdür. Bu ürün; düşük ısı iletkenliği, hafifliği ve düşük maliyetli oluşuyla dikkat çekmektedir.

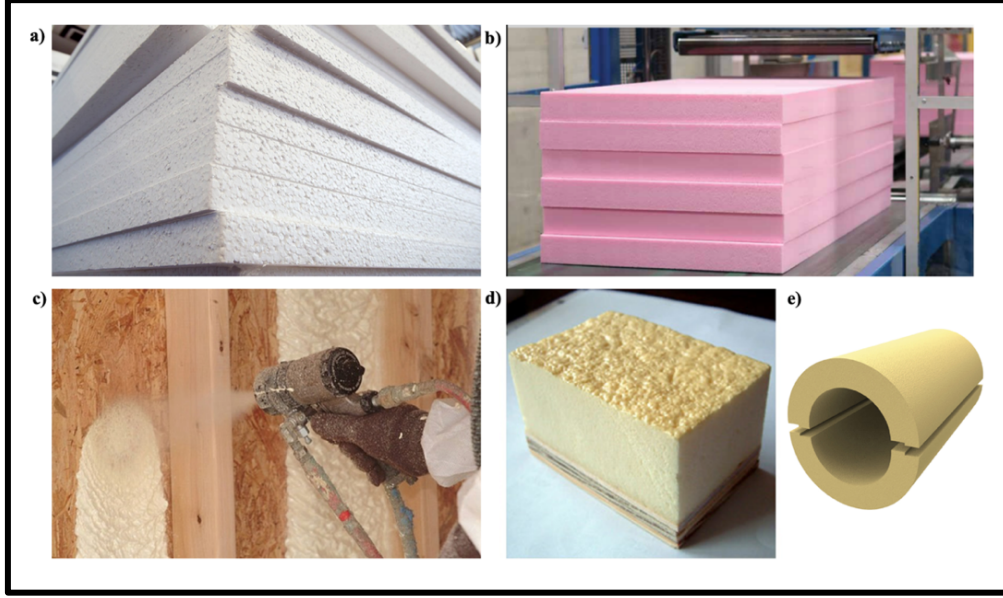
#### **2.6.6. Geleneksel tuğla**

Geleneksel kil esaslı tuğla bloklar, doğal kilin suyla karıştırılıp şekillendirilmesi ve ardından yüksek sıcaklıklı fırınlarda 900-1100 °C sıcaklıkta pişirilmesiyle elde edilen yapı malzemesidir. Pişmiş toprak; tuğlanın A1 sınıfı yanmazlık özelliği kazanmasını sağlarken, yüksek basınç dayanımı sayesinde yapısal olarak güvenilirdir. Tuğlanın ısı iletkenlik değeri 0,030-0,050 W/(m.K) arasında değişmektedir (Avan vd., 2021). Isı depolama özelliği sayesinde ısı konfor korunurken, aynı zamanda gözenekli yapısı küf oluşumunu engellemektedir. Günümüzde “izo tuğla” adıyla üretilen düşey delikli ve geçmeli sistem tuğlalar enerji verimliliğinde etkin rol oynamaktadır (Şekil 2.11 c). Hammadde temini kolay ve ucuz, ısı yalıtım performansı yüksek, hafif, dayanıklı ve kolay uygulanabilir özellikleri nedeniyle sektörde yaygın kullanılmaktadır.

#### **2.6.7. Genleştirilmiş polistiren (EPS)**

Genleştirilmiş polistiren, organik kökenli hammaddelerden üretilmiş yapay bir yalıtım malzemesidir (Şekil 2.12 a). Doğal gaz ve mineral yağlardan türetilen stiren monomerinin polimerizasyonundan elde edilen EPS; kapalı gözenekli köpük yapıya sahip, çoğunlukla beyaz renkli termoplastik polimerdir. Kapalı gözenekli yapısı sayesinde kapiler su geçirimsizliğine sahip olmadıklarından ıslanmamakta ve sürekli yalıtıma imkan tanımaktadır. Düşük enerjilerle üretilmesi, maliyet etkinliği, çevre dostu oluşu ve üstün yalıtım performansı ile öne plana çıkmaktadır. Ayrıca mekanik dayanımı, eğilme direnci ve darbe sönümleyebilme kapasitesi sayesinde uzun süre kırılmadan kullanılabilir. EPS’nin ısı iletkenlik katsayısı genellikle 0,029-0,041 W/(m.K) aralığında olup yapı ömrü boyunca yüksek performans göstermektedir (Hung Anh & Pászory, 2021). Malzeme hafif, kolay işlenebilir ve %100 geri dönüştürülebilir olmasının yanı sıra kullanım alanına uygun olarak istenen yoğunluklarda üretilmesi de

mümkündür. Isı yalıtım amacıyla kullanılan EPS ürünler genellikle 15-35 kg/m<sup>3</sup> yoğunluk aralığında üretilmekte olup yangın performansı açısından yüksek yanıcılık anlamına gelen E sınıfında yer almaktadır. EPS; ticari pazarlarda yaygın olarak bulunan, uygun maliyetli bir ısı yalıtım çözümdür. Malzeme; levha, boru veya çeşitli geometrilerde üretilebilmektedir (B. M. Rocha vd., 2025).



**Şekil 2.12.** EPS (a), XPS (b), PUR (c) ve PIR (d-e) yalıtım malzemeleri örnekleri (Poytherm, 2026; İzocam, 2026; Turkchem, 2026; Çatıdünyası, 2026; Inkafixing, 2026).

Plastiğin türev malzemelerinden biri olan EPS; öncelikle dış duvarlarda ısı köprülerini azaltmaya yardımcı olmakta, yoğuşma riskini azaltmakta ve cephe boyunca homojen bir ısı geçirgenlik katsayısı sağlamaktadır (J. Silvestre vd., 2022). Ayrıca zemin ve çatıların yalıtılmasında da sıklıkla kullanılmaktadır.

### 2.6.8. Ekstrüde polistiren köpük (XPS)

Ekstrüde polistiren köpük, organik kökenli plastik bir malzemedir. XPS, polistiren boncukların ekstrüzyon yöntemiyle çekilerek üretilen kapalı gözenekli bir yapıya sahiptir. (Schiavoni vd., 2016). Kapalı hücreli yapısı sayesinde bünyesine su almayarak düşük nem geçirgenliği göstermektedir. Malzeme, yüzeyinin pürüzlü veya pürüzsüz olmasına göre 0,037-0,050 W/(m.K) arasında değişen ısı iletkenlik değerlerine sahiptir. EPS ile karşılaştırıldığında XPS, yaklaşık %30 daha az kalınlıkta daha iyi ısı yalıtımı performansı sağlamaktadır (X. Zhao, 2017). XPS'in yoğunluğu genellikle 25-45 kg/m<sup>3</sup> aralığında olup üretim amacına göre 15-30 kg/m<sup>3</sup> aralığında değişebilmektedir. Bu değer EPS'nin yoğunluğundan biraz daha yüksektir. XPS, B1 yanma sınıfında olup -180 °C den 75 °C ye kadarki sıcaklıklara dayanım gösterse de yangına karşı dayanımı diğer malzemelere oranla nispeten düşüktür. Kapalı hücreli yapısı

sayesinde XPS, EPS'den daha yüksek mekanik performans ve daha iyi basınç dayanımı sergilemektedir. EPS'ye kıyasla daha iyi performans-kalınlık oranı sunarken, maliyeti neredeyse iki kat daha fazladır (B. M. Rocha vd., 2025). XPS'in maximum basınç dayanımı 50-150 kPa aralığında olup bu sayede döşeme, zemin altı yalıtım, çatı ve sandviç duvarlarda sıklıkla kullanılmaktadır (Park vd., 2025). Ürün; düz veya oluklu levhalar halinde üretilmekte olup genellikle çatı kaplamaları, duvar boşlukları, havalandırılmalı cepheler ve döşemelerde yüksek termal performans ve çok yönlü uygulama imkanı sunmaktadır (Şekil 2.12 b). XPS'nin buhar difüzyon direnç katsayısı 20-80 aralığında olup bu özelliği malzemenin nemli ortamlarda kullanımını avantajlı hale getirmektedir. Buhar geçirgenliğinin ve su emme kapasitesinin düşük olmasından dolayı yapı ömrü boyunca yüksek performans sergilemektedir (Kytinou vd., 2024). Bununla birlikte XPS, üretim ve kurulum aşamasından kullanım ve bertarafına kadarki tüm yaşam döngüsü boyunca CO<sub>2</sub> dahil olmak üzere çeşitli zararlı gazların salımına neden olmaktadır. Çevresel kaygılara rağmen günümüzde XPS inşaat sektöründe yaygın olarak bulunmakta ve sıklıkla tercih edilmektedir.

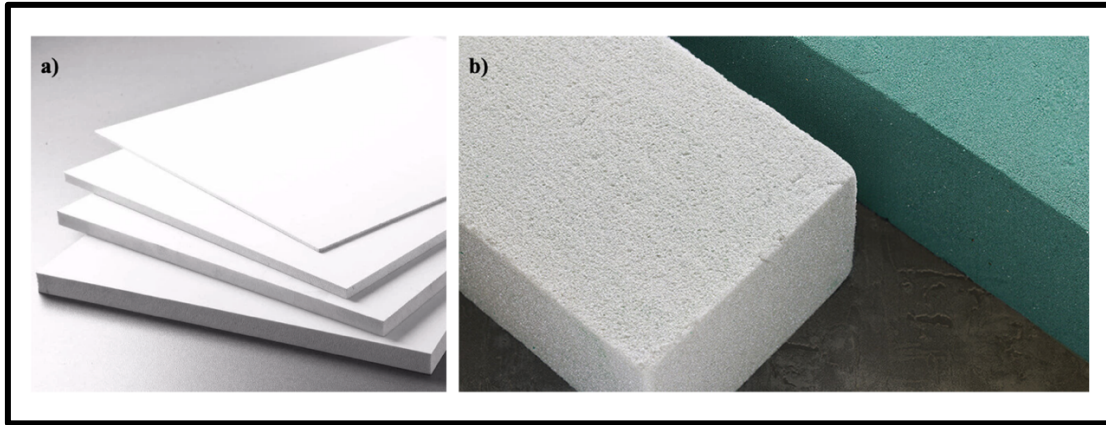
### **2.6.9. Poliüretan köpük (PUR) ve poliizosiyanürat (PIR)**

Poliüretan (PUR) ve poliizosiyanürat (PIR) köpükler, izosiyanat ile poliollerin kimyasal reaksiyonu sonucu oluşan kompozit malzemelerdir (Cai vd., 2024). Mekanik dayanımları yüksek, uzun ömürlü ve çok yönlü fonksiyonlara sahiptir. Üretim sürecinde, genleşme gazları köpüğün içinde hapsolmakta ve kapalı hücreli bir yapı meydana gelmektedir. Kapalı hücreleri soğutucu gazlar yardımıyla şişirilerek oluşturulduğundan, PUR/PIR köpükler daha yüksek *R*-değeri ve düşük nem geçirgenliği ile ön plana çıkmaktadır. PUR ve PIR, üretim teknolojisine bağlı olarak levha formunda, püskürtme yöntemiyle veya sandviç panel dolgusu şeklinde uygulanabilmektedir (Liszkowska vd., 2025). Hücresel morfolojileri ve yapısal özellikleri bakımından sert veya esnek yapıda üretilmektedir. Sert yapıdaki PUR, düşük ısı iletkenlik değerine sahip olup özellikle yalıtım levhaları, boru izolasyonu ve soğutucu ekipmanların yalıtımında sıklıkla tercih edilmektedir (Şekil 2.12 c-e). Bu malzemenin yalıtım performansı yoğunluk, hücre boyutu, kapalı hücre oranı ve hücrelerde hapsolmuş gazın termal iletkenliğine bağlı olarak değişmektedir. Açık hücreli, hava geçirgen ve yüksek elastikiyete sahip esnek PUR'ler ise daha çok mobilya sektöründe konfor amaçlı tercih edilmektedir (J. W. Kang vd., 2009). Bu malzemelerin kullanım sıcaklığı -200 °C ile +110 °C arasında değişmekte olup oldukça geniş bir sıcaklık aralığında üstün performans göstermektedir. Yanıcılık sınıfları B1- B3 arasında olup ısı iletkenlik katsayısı yaklaşık 0,035 W/(m.K)'dir. Malzemenin buhar difüzyon direnci ( $\mu$ -değeri) ise 30-100 değerleri aralığında iken mekanik dayanımları 100-400 kPa seviyelerine ulaşabilmektedir. PUR ve PIR arasındaki temel fark, PIR'in poliizosiyanürat

halkaları içermesi nedeniyle daha yüksek yanmazlık ve termal kararlılık sunmasıdır. Bu özellik PIR’i, PUR’a kıyasla yangın güvenliği gerektiren yapılarda daha avantajlı hale getirmektedir (Shin & Lee, 2025). Kullanım alanları arasında genellikle pencere dolguları, kapı boşlukları, cephe sistemleri ve bina zarfı uygulamalarında yer almaktadır.

#### 2.6.10. Polivinilklorür köpük (PVC)

Dünyada polietilen ve polipropilenden sonra en yaygın kullanılan termoplastik malzemedir. PVC köpükler üretim amaçlarına bağlı olarak sert, yarı sert veya yumuşak yapıda üretilmektedir (Şekil 2.13 a.).



Şekil 2.13. PVC (a) ve fenol köpük (b) örnekleri (Insapedia, 2026 ve Yupsenipvs, 2026).

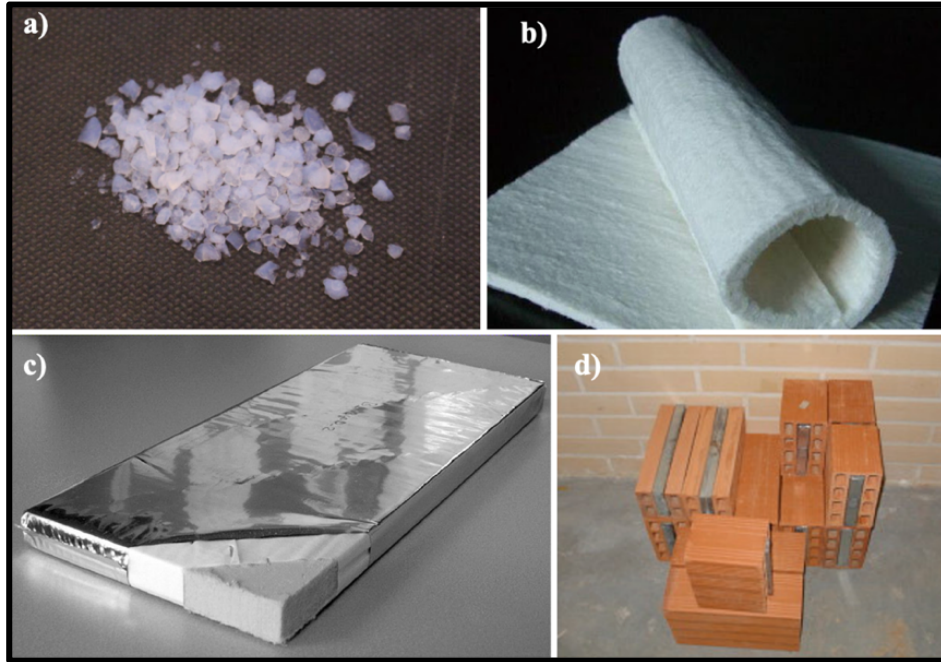
Malzeme, polivinilklorid esaslı termoplastik olup  $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'den  $95\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'ye kadarki sıcaklıklara dayanıklıdır. Üretim metoduna bağlı olarak gözenek yapısı açık veya kapalı olabilen PVC köpükler, zor yanıcı özelliğe sahiptir. Isıl iletkenlik katsayısı  $0,038\text{ W}/(\text{m.K})$  olarak belirlenmiş olup binalarda ve endüstriyel tesislerde enerji verimli yalıtım uygulamalarında sıklıkla tercih edilmektedir (Sebbar vd., 2025).

#### 2.6.11. Fenol köpüğü (PF)

Fenol formaldehit bazlı bakalit reçinesine anorganik özellikli şişirici katkıların eklenmesi ile elde edilen bir yalıtım malzemesidir. İstenilen yoğunluklarda levha veya boru şeklinde üretilen bilindiği gibi, alüminyum folyo ve metallerle de birleştirilebilmektedir (Şekil 2.13 b). Isıl iletkenlik değerleri  $0,030-0,045\text{ W}/(\text{m.K})$  arasında değişirken,  $-180$  ile  $+120\text{ }^{\circ}\text{C}$  arası sıcaklıklara karşı dayanıklılık göstermektedir. Kaplamasız halde iken yangın dayanım sınıfı B, folyo kaplamalı durumda ise C sınıfı yanma özelliğine sahiptir. Fenol köpükler bünyesine hızlı bir şekilde su almaları nedeniyle su ile temas etmeyen, yüksek sıcaklıklı tesisatların yalıtımında tercih edilmektedir. Ancak mekanik dayanımları sınırlı olduğundan basınca karşı zayıf ve kırılabilir yapı sergilemektedir (Kumar vd., 2020).

### 2.6.12. Aerojel yalıtım malzemeleri

Aerojeller, bilinen en düşük ısı iletkenlik değerine sahip yalıtım malzemeleri arasında yer almaktadır. Üretimleri genellikle sol-jel yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmektedir. Bu süreç sonunda hacminin %90'ından fazlası hava olan, son derece hafif ve gözenekli bir yapı elde edilmektedir (Hung Anh & Pásztor, 2021). Aerojeller; yüksek gözeneklilik, ultra hafiflik, düşük ısı iletkenlik ve düşük yoğunluk gibi benzersiz özellikler sergilemektedir. Üretim yöntemi ve saflık düzeyine bağlı olmak üzere toplam hacimlerinin %85 ila %99,8'i arasında gözenek hacmine sahip olmaları mümkündür. Bina yalıtım uygulamaları için genellikle 70-150 kg/m<sup>3</sup> aralığında değişen yoğunluklarda üretilmektedir. Ayrıca spesifik yüzey alanları 500-1000 m<sup>2</sup>/g aralığında değişmektedir. Isı iletkenlik değerleri 0,013–0,020 W/(m.K) seviyesinde olan aerojeller, A1 sınıfı yangın dayanımı ile birlikte neme karşı yüksek direnç göstermektedir (Kumar vd., 2021). En yaygın kullanılan aerojel türü olan silika aerojellerin gözenek boyutu 5 ila 70 nm arasında değişmektedir. Bu özellikleri sayesinde, mükemmel yalıtkan malzeme olarak kabul edilen aerojeller, başta uzay ve havacılık sanayii olmak üzere, ince duvarlı binalarda, enerji verimli cephe sistemlerinde ve endüstriyel ekipmanların yalıtımında kullanımları her geçen gün yaygınlaşmaktadır (Şekil 2.14 a-b).



**Şekil 2.14.** Aerojel (a-b), vakum yalıtım paneli (c) ve PCM (d) uygulama örnekleri (İzomarket, 2026 ve Insapedia, 2026).

Aerojel yalıtımın enerji verimliliği açısından oldukça etkili olduğu bilinmektedir. 10 mm kalınlığındaki bir aerojel yalıtım katmanı, enerji kullanımını %23 oranında azaltabilirken, 20 mm kalınlıklı bir katman yıllık %38'lik bir azalma sağlayabilmektedir. Birden fazla aerojel yalıtım

katmanının uygulanması durumunda ise ısıtma enerjisinde %10'a kadar tasarrufu sağlandığı bildirilmiştir (Ghazwani vd., 2025). (Sáez de Guinoa vd., 2017) tarafından gerçekleştirilen bir çalışmada nanoteknolojiden yararlanarak geliştirilen aerjel kompozitte azalan yalıtım kalınlığına rağmen daha yüksek dayanıklılık ve daha uzun kullanım ömrü sağlanmıştır. Ayrıca 10 mm kalınlığındaki bir yalıtım tabakasının, standart 25 mm genişletilmiş polistiren panellerle eşdeğer termal performans sunduğu ifade edilmiştir. Bununla birlikte aerjellerin yüksek maliyetli hammadde kaynağı ile üretilmesi ve kurutma aşamasında karşılaşılan karmaşık üretim aşamaları, kullanım yaygınlığını sınırlayan temel unsurlardır. Bu nedenle, düşük maliyetli üretim yöntemlerinin geliştirilmesine yönelik çalışmaların artırılması gerektiği düşünülmektedir (Balci vd., 2025).

### 2.6.13. Vakum yalıtım panelleri (VIP)

Vakum yalıtım panelleri (VIP), genellikle silikadan oluşan mikro gözenekli çekirdek malzemenin çok katmanlı, hava geçirmez bir filmle sarılması ve içindeki havanın vakumlanması yoluyla üretilmektedir (Ijjada & Nayaka, 2022) (Şekil 2.14 c). Vakum ortamında üretim süreci hem iletim hem de taşınım yoluyla gerçekleşen ısı transferini minimize etmekte, böylece panellerin termal direnci oldukça yüksek seviyelere ulaşmaktadır. Bu süreç, VIP'ları "*süper yalıtım malzemesi*" kategorisine taşımaktadır (Zach vd., 2023). Vakum ortamı, iletim yoluyla ısı transferinin engellenmesine olanak tanıyarak olağanüstü düşük ısı iletkenlik değerlerinin elde edilmesini sağlamaktadır. VIP'larda bu değerler genellikle 0.004-0.008 W/(m.K) aralığında değişmektedir (Szabó & Lakatos, 2024). Son derece ince yapılara sahip olmalarına rağmen yüksek yalıtım kapasiteleri ile ön plana çıkan VIP'ler, özellikle yüksek performans gerektiren bina kabuklarında ve taşımacılık sektöründe yaygın kullanılmaktadır. Ayrıca VIP'ların çok düşük düşük ısı iletkenlik değeri ve 50 yıldan fazla kullanım ömrüne sahip olduğu bilinmektedir (Tahmasbi vd., 2025). Özellikle alan kısıtlamasının olduğu yerlerde kullanılan VIP'larla, duvar kalınlığını %77'ye kadar azaltarak geleneksel yalıtım malzemeleriyle aynı performansı elde etmek mümkündür olmaktadır. VIP'ların ısı performansları nem geçirgenliğine, bariyer zarfının türüne ve sıcaklığa bağlı olarak zaman içinde değişmektedir. Yaşlanma hızı ilk on yılda yaklaşık %4,5 oranında olup ardından yaşlanma hızı yavaşlayarak uzun vadede EPS'ye kıyasla üstün dayanıklılık göstermektedir (M. Li & Lin, 2021).

Yalıtım performansındaki üstünlüğe rağmen üretim ve kurulum maliyetinin yüksek olması ile özel montaj tekniklerine gereksinim duyulması gibi sebepler VIP'ların yaygınlaşmasını sınırlandırmaktadır. Nakliye ve montaj hassasiyeti ile ısı köprüsü oluşturma riski gibi problemlerin giderilmesi halinde VIP'ların pratik uygulamalarda kullanımını optimize etmek mümkün olacaktır (Ghazwani vd., 2025).

#### 2.6.14. Faz değişim malzemeleri (PCM)

Faz değişim malzemeleri (PCM), çevresel ısıyı absorbe ederek fiziksel durum değişimine uğramakta ve ortam sıcaklığını dengeleyen bir yalıtım etkisi meydana getirmektedir (Poudhar & Ghosh, 2025). Bu malzemeler erime veya donma süreçlerinde büyük miktarda gizli ısıyı depolayıp serbest bırakarak yapıların termal dengeleme kapasitesini güçlendirmekte ve enerji verimliliğine katkı sağlamaktadır. PCM'ler organik, inorganik ve biyolojik kökenli olmak üzere üç farklı ana gruba ayrılmaktadır. Organik PCM'ler arasında parafinler, yağ asitleri, alkol, polietilen glikol ve esterler gibi parafin olmayan bileşikler ön plana çıkmaktadır (Baetens vd., 2010). Parafinler, yüksek ısı depolama kapasitesine sahip olup düşük süper soğuma eğilimi ve kimyasal olarak inert yapıları sayesinde avantajlıdır. Ancak karbon içeriklerinin yüksek olması çevresel açıdan dezavantaj oluşturmaktadır. Yağ asitleri ise yenilenebilir kaynaklardan elde edilen sürdürülebilir PCM türlerindedir (Sarcinella vd., 2025). İnorganik PCM'ler ise genellikle tuz hidratları, metaller ve alaşımlar gibi bileşenlerden oluşmaktadır. Bunlar, düşük maliyetli olmalarıyla avantaj sağlarken; düşük ısı depolama kapasitesi, yüksek kimyasal reaktivite ve yüksek süper soğuma sıcaklıkları gibi dezavantajlar nedeniyle kullanım alanları sınırlıdır (Mika vd., 2025).

PCM'lerin üretim sürecinde parafinler, tuz hidratları veya biyolojik kökenli bileşenler, mikro veya makro kapsül teknikleriyle koruyucu yapılara kaplanarak farklı yapısal elemanlara entegre edilmektedir. Bu kapsül yapı, faz geçişleri sırasında belirli sıcaklık aralıklarında eriyerek ısıyı emme ve sıcaklık düştüğünde donarak emdiği ısıyı geri verme prensibine göre çalışmaktadır (Obinna Iwuanyanwu vd., 2024). PCM'nin temel özelliklerinden biri sürdürülebilirliktir. Bu nedenle biyolojik kökenli yenilenebilir kaynaklardan üretilen parafin dışı bileşiklerin kullanımı en çok tercih edilen türdür. Bu tür PCM'ler beton, sıva veya alçı gibi inşaat malzemelerine doğrudan dahil edilerek ısı yalıtımı ve enerji tasarrufu sağlanabilmektedir (Silva vd., 2012) (Şekil 2.14 d). PCM'ler filmler, mikro kapsüllenmiş parçacıklar, lifler ve paneller gibi çeşitli şekil ve formlarda üretilebilmektedir (Sawadogo vd., 2022). Faz değişim malzemeleri, yapı sistemlerine pasif veya aktif olarak gömülebilmektedir. Pasif modda; PCM, herhangi bir ilave ekipmana ihtiyaç duyulmadan, sıva, alçı veya beton gibi yapı malzemelerine yerleştirilmektedir. Aktif sistemlerde ise PCM'ler mevcut ısıtma-soğutma sistemleriyle birlikte çalışarak enerji depolamayı gerçekleştirir (Nasr vd., 2023). PCM'lerin bir diğer kullanım şekli ise yalıtım performansını artırmak amacıyla cephe sistemleri, pencereler, panjur ve gölgeleme sistemleri gibi bina zarfına entegre edilmesidir. Optimum tasarıma sahip PCM entegrasyonu, yapıdan kaynaklanan CO<sub>2</sub> emisyonlarında %38,74'e kadar önemli bir azalma sağlanabilmektedir (Ghazwani vd., 2025). PCM'lerin ısı iletkenlik değerleri geleneksel yalıtım malzemelerine

kıyasla daha yüksek olmasına rağmen (0,20-0,40 W/(m.K)), ısı depolama kapasitesi ve termal stabilizasyon etkileri nedeniyle enerji verimli bina tasarımlarında sıklıkla tercih edilmektedir (Obinna Iwuanyanwu vd., 2024). PCM'lerin iç duvarlar, güneş alan cepheler, veri merkezleri ve iklim kontrollü ortamlarda kullanımları gittikçe yaygınlaşmaktadır (Tahmasbi vd., 2025). Özellikle gece-gündüz arasındaki sıcaklık farklarının belirgin olduğu dönemlerde PCM sistemleriyle donatılmış yapılarda yıllık enerji tüketiminin geleneksel binalara kıyasla %15 oranında azaldığı rapor edilmiştir (Zuo vd., 2025). PCM'ler termal konforu önemli ölçüde artırma, enerji tüketimini azaltma ve binaların çevresel sürdürülebilirliğini iyileştirme potansiyeline sahiptir. Ancak uygulamanın iklim koşulları, enerji maliyetleri, ilk yatırım ve devam eden bakım maliyetleri optimize edilmelidir.

### 2.6.15. Genleştirilmiş mantar levhalar (ECB)

Mantar; doğal ve sürdürülebilir bir biyolojik malzeme olup özellikle Akdeniz havzasında, Portekiz, İspanya, Fas, Tunus, Cezayir gibi ülkelerde yetişen mantar meşesinin (*Quercus suber L.*) dış kabuğundan 9-12 yılda bir hasat edilmektedir (Lakreb vd., 2023). Genleştirilmiş mantar levhalar, bu kabuklardan elde edilen doğal mantar granüllerinin yüksek sıcaklıkta buharla genleştirilmesi ve kendi doğal polimeri olan suberin ile bağlanması sonucu elde edilen çevre dostu bir yalıtım malzemesidir. Üretim sürecinde, mantar granülleri tamamen doğal reçine ile bağlanmakta, şekillendirilmekte ve siyah aglomereler olarak adlandırılan genleştirilmiş mantar elde edilmektedir. Dolayısıyla, ECB'ler tamamen biyo-bozunur yapılarıyla sürdürülebilir yapı malzemeleri arasında önemli bir yere sahiptir. Şekil 2.15.'te ECB ve diğer biyokütle esaslı yalıtım malzemelerine örnekler verilmiştir. Şekilde; a) mineralize ağaç lifini, b) genleştirilmiş mantar levhayı, c) keteni ve d) kenevir malzemeleri temsil etmektedir.



Şekil 2.15. ECB ve biyokütle esaslı yalıtım malzemeleri (Insapedia, 2026).

Mantarların viskoelastik yapısı hem sıvılara hem de gazlara karşı yüksek geçirimsizlik, iyi termal, akustik ve elektriksel yalıtım özellikleri kazandırmaktadır (Lakreb vd., 2018). ECB levhalar, düşük ısı iletken değerleri (0,036-0,065 W/(m.K)), 65-240 kg/m<sup>3</sup> arasında değişen yoğunlukları ve homojen hücresel yapıları sayesinde yalnızca etkin bir ısı yalıtımı değil, aynı zamanda yüksek düzeyde ses yalıtımı da sağlamaktadır (Ali vd., 2024). Küçük, kapalı gözenekli hücresel yapısı konveksiyon yoluyla iletimi azaltırken, hücre duvarları tekrarlanan emilim ve yansıma yoluyla radyasyonu en aza indirerek yalıtım özelliklerini artırmaktadır (Schiavoni vd., 2016).

ECB'lerin yangın tepki sınıfı E olduğundan "yanıcı malzeme" olarak kabul edilmektedir. Bununla birlikte hücre duvarı bileşimi, daha düşük sıcaklıklarda bozulan polistiren ve poliüretan gibi sentetik polimerlere göre daha yüksek termal kararlılık sunmaktadır. Mantar, 350 °C civarındaki sıcaklıklara kadar hücresel bütünlüğü, 2000 °C'yi aşan sıcaklıklara kadarsa iskelet yapısını koruyabilmektedir. Bu özellik, mantarları yangın yalıtım katmanları için uygun hale getirmektedir. Mekanik açıdan değerlendirildiğinde; iyi basınç dayanımı ve neredeyse sıfıra yakın Poisson oranı ile deformasyona karşı direnç göstermektedir (Lakreb vd., 2023). Ayrıca nem ve biyolojik etkenlere karşı yüksek direnci ile uzun ömürlü ve güvenilir bir yalıtım çözümü sunmaktadır. Bu özellikleri sayesinde ECB'ler hem enerji verimli hem de çevresel sürdürülebilir yapılarda tercih edilen yenilikçi yalıtım malzemeleri arasında öne çıkmaktadır.

#### **2.6.16. Biyokütle esaslı yalıtım malzemeleri**

Poliüretan, polistiren ve mineral yünü gibi geleneksel yalıtım malzemeleri mükemmel termal ve akustik performans sunsa da bu malzemeler yenilenemeyen kaynaklardan elde edilmektedir. Ayrıca yüksek karbon salınımı (yaklaşık 7,3 kg CO<sub>2</sub>-eq/kg) oluşturmakta ve kullanım ömrü sonundaki bertarafında zorluklar oluşturmaktadır (Ouda vd., 2025). Bu durum, sürdürülebilir inşaat ilkeleriyle uyumlu, geri dönüştürülmüş ürünlerden veya doğal liflerden elde edilen çevre dostu malzemelerin geliştirilmesine öncülük etmektedir.

Biyokütle esaslı yalıtım malzemeleri kökenlerine göre; bitkisel, hayvansal ve mineral lifler şeklinde sınıflandırılmaktadır. Bu malzemeler; düşük yoğunluklu, düşük maliyetli, kolay temin edilebilen ve biyolojik olarak parçalanabilen özellikleriyle ön plana çıkmaktadır (Gorur Avsaroglu, 2025). Bunlar; selüloz, keten, kenevir, odun lifi, pirinç kabuğu, mısın koçanı ve geri dönüştürülmüş kâğıt gibi hammaddelerin doğal reçinelerle bağlanması şeklinde elde edilmektedir (Şekil 2.15.). Üretim süreçleri çevreye zararlı kimyasal bağlayıcılar kullanılmadan gerçekleştirildiğinden sürdürülebilir ve geri dönüştürülebilir malzemeler olarak değerlendirilmektedir. Biyokütle esaslı yalıtım malzemelerinin ısı iletkenlik katsayıları

genellikle 0,037-0,045 W/(m.K) aralığında olup bu değerler geleneksel EPS ve XPS ile benzerlik göstermektedir. Bununla birlikte, yangın direnci, haşere ve küf kontrolü gibi biyolojik etkilere dayanım açısından ek işlemlerden geçirilerek kullanıma alınması gerekmektedir. Lif yapıları sayesinde hem ısı hem de ses yalıtımı sağlamakta, ayrıca higroskopik özellikleri ile iç mekan nem dengelemesine katkıda bulunmaktadır. Bu malzemelerin uygulama alanları arasında bina kabukları, iç mekan bölme elemanları ve ahşap yapı sistemleri öne çıkmaktadır.

Koyun yünü, kenevir, keten ve jüt gibi doğal elyaflar; 0,031–0,046 W/(m.K) aralığında değişen ısı iletkenlik değerleriyle iyi yalıtım performansına ek olarak zamanda düşük karbon emisyonu, biyolojik bozunabilirlik ve bölgesel bulunabilirlik avantajları da sunmaktadır. Değişken yangın direnci ve kalınlık gereksinimleri bakımından bazı sınırlamalara rağmen bu biyo-bazlı yalıtkanlar yeşil bina çözümlerine iyi bir alternatif olarak değerlendirilmektedir (Ouda vd., 2025).

Endüstriyel kenevir (*Cannabis sativa*), kuru iklimlerde yetiştirilmeye uygun, düşük düzeyde psikoaktif madde içeren bir bitkidir. Bitkinin dış lifleri, iç odunsu çekirdeği ve tohumları çeşitli amaçlarla kullanılmaktadır. Dış lifler agregasyon, sıkıştırma ve ısıl işleme tabi tutularak inşaat sektöründe değerlendirilmektedir. Kenevir; kireç, kil veya nişasta ile karıştırılarak yüksek kaliteli yalıtım malzemeleri üretiminde kullanılmakta; genellikle panel veya yün formunda iç ve dış duvarların kaplamasında tercih edilmektedir. Kenevir liflerinin ısıl iletkenliği genellikle 0,038-0,060 W/(m.K) arasında değişmektedir (Cosentino vd., 2023).

Odun lifi; ağaçlardan, kereste fabrikası artıkları veya orman bakım işlemleri atıklarından elde edilen doğal bir yalıtım malzemesidir. Bileşimi genellikle pestisit görevi gören ve böcek saldırılarına karşı koruma sağlayan lignin ve alüminyum sülfat içermektedir (Schiavoni vd., 2016). Ahşap liflerin ısıl iletkenliği yoğunluğuna bağlı olarak değişmektedir. Yangın tepki sınıfı “E” olarak bilinen bu malzemelerde alev geciktirici katkıların kullanılması ile yanma direnci geliştirilebilmektedir (Kumar vd., 2020).

Doğal malzemeler daha yüksek yoğunluk değişkenliği ve düşük yangın direnci gösterse de yenilenebilir olmaları, düşük karbon emisyonu değerleri ve yeterli termal ve akustik performansları, onları hem konut hem de ticari binalarda kullanım için güçlü ve sürdürülebilir alternatifler haline getirmektedir. Biyokütle esaslı ve nanoteknoloji destekli malzemeler gibi yeni çözümler, geleneksel seçeneklere kıyasla daha düşük çevresel ayak izi ve üstün performans sunmaktadır. Bu gelişmeler; sera gazı emisyonlarının azaltılması, enerji tüketiminin optimize edilmesi ve küresel sürdürülebilirlik hedeflerinin desteklenmesinde önemli bir rol oynamaktadır. Akıllı ve uyarlanabilir yalıtım teknolojilerinin entegrasyonu, bu malzemelerin sürdürülebilir

inşaat uygulamalarını yeniden şekillendirme potansiyelini daha da vurgulamaktadır (Erzen vd., 2025).

## 2.7. Isı yalıtım malzemelerinin teknik özellikleri

Isı yalıtım malzemeleri; ısı kayıpların azaltarak enerji verimliliğini arttıran, minimum kalınlıklarda dahi yüksek ısıl direnç gösterebilen heterojen yapılı özel malzemelerdir. Avrupa standartlarına göre, ısı iletkenlik katsayısı 0,070 W/(m.K) değerinin altında olan malzemeler “*ısı yalıtım malzemesi*” kategorisinde değerlendirilirken, bu değer üzerinde olanlar “*yapı malzemesi*” olarak sınıflandırılmaktadır (Mazur vd., 2025). Bu malzemelerin ısıl performansı; termal direnç ( $m^2K/W$ ), ısıl iletkenlik ( $W/(m.K)$ ) ve termal geçirgenlik ( $W/m^2K$ ) gibi teknik değerlerinin tespiti ile belirlenmektedir. Isı yalıtım malzemelerinin termo-fiziksel özellikleri arasında ayrıca özgül ısı kapasitesi, yoğunluk ve ısıl difüzyon gibi özellikleri yer almaktadır. Etkin bir yalıtım malzemesi; düşük ısıl iletkenlik katsayısına ( $<0,05 W/(m.K)$ ), hafif yapı malzemeleriyle uyumlu olacak şekilde düşük yoğunluğa, yüksek özgül ısı kapasitesine, yangına karşı dayanım açısından A1 ve A2 sınıfına ve buhara karşı yüksek dirence ( $\mu$ ) sahip olmalıdır (B. M. Rocha vd., 2025). Tüm bu özellikler bir malzemenin ısıyı emme, aktarma ve tutma yeteneği açısından verimliliğini belirlemektedir. Bu özellikler bir binanın enerji verimliliği ve konforlu iç mekan sıcaklığını koruma yeteneğine katkıda bulunmaktadır. Böylece yapay ısıtma veya soğutma ihtiyacı azalmaktadır (Petcu vd., 2023).

Günümüzde yaygın kullanılan ısı yalıtım malzemelerinin teknik ve mekanik özellikleri Tablo 2.2.’de verilmiştir. Tablodaki veriler (Al-Homoud, 2005; Erzen vd., 2025; Hung Anh & Pászatory, 2021; Kumar vd., 2020; Papadopoulos, 2005; Schiavoni vd., 2016; B. Zhao, 2022) tarafından yapılan çalışmalardan derlenerek elde edilmiştir.

**Tablo 2.2.** Isı yalıtım malzemelerinin teknik ve mekanik özelliklerinin karşılaştırması.

Malzeme Türü	Isıl İletkenlik (W/m.K)	Yoğunluk ( $kg/m^3$ )	Basınç Dayanımı (kPa)	Yangın Sınıfı	Kimyasal Dayanım
Taş Yünü	0,029–0,046	13-240	15-80	A1-A2	Yüksek
Cam Yünü	0,032–0,046	8-150	15-80	A1-A2	Yüksek
Perlit	0,035–0,060	10-150	100-200	A1	Orta
EPS	0,029–0,041	10–50	60-300	E	Düşük
PUR	0,022–0,046	30–100	40-500	D-F	Düşük
XPS	0,025–0,040	25–80	100-700	E	Düşük
Fenolik Köpük	0,018–0,040	40–160	100-300	B-C	Düşük
PIR	0,018–0,030	30-45	25-100	B	Orta

**Tablo 2.2.** Isı yalıtım malzemelerinin teknik ve mekanik özelliklerinin karşılaştırması (Devamı)

Ahşap Lifi	0,040–0,050	100–200	50–150	B2	Orta
Kenevir Lifi	0,038–0,123	25–100	50–150	E	Orta
Keten Lifi	0,030–0,045	20–80	50–150	E	Orta
ECB	0,040–0,045	90-160	131-205	B	Orta
PCM	0,020–0,050	100-830	50-150	A, B, E	Orta
Aerojel	0,013–0,020	50-150	100-300	A1	Yüksek
VIP	0,002–0,008	65-300	200-500	A1	Yüksek

Isı yalıtım malzemelerinin performansını etkileyen teknik parametreler; malzemenin mikro yapısal özelliklerinden başlayarak, uygulama alanındaki fiziki ve çevresel koşullar da dahil olmak üzere geniş bir alanda bütüncül olarak ele alınmalıdır. Bu parametreler; ısıl iletkenlik katsayısı, yangına dayanım, mekanik dayanım, buhar geçirgenliği gibi çok yönlü performans göstergelerini içermektedir. Bununla birlikte, yalıtım malzemesinin yoğunluğu, su emme oranı, termal kütlesi gibi fiziksel özellikleri ile malzemenin ekonomik sürdürülebilirliği, montaj kolaylığı, teknik yeterliliği gibi kriterler de dikkatle değerlendirilmelidir. Bu özellikler, malzemenin çeşitli çevresel koşullarda yalıtım verimliliğini ve yapısal bütünlüğü koruma konusundaki genel performansını tanımlamaya yardımcı olmaktadır (B. M. Rocha vd., 2025). Bu kapsamda, ısı yalıtım malzemelerinde bulunması gereken teknik özellikler, ilgili başlıklar altında sistematik biçimde açıklanmıştır.

### 2.7.1. Isıl iletkenlik katsayısı ( $\lambda$ )

Homojen bir numunenin birim alanından, numune üzerindeki birim sıcaklık farkından kaynaklanan ve izotermal düzlemlere dik yönde geçen sabit durum ısı akışının zamana oranı “*ısı iletkenlik*” olarak tanımlanmaktadır. Isıl iletkenlik, malzemenin ısı transfer kabiliyetinin bir ölçütü olarak birim kalınlık ve birim sıcaklık farkı başına ilettiği ısı miktarını ifade etmektedir. Bu değer, bir ısı yalıtım malzemesinin performansını belirleyen en temel parametrelerden biridir (Hung Anh & Pásztor, 2021). Literatürde genellikle “ $\lambda$ ” veya “ $k$ ” sembolleriyle ifade edilmekte, birimi ise watt/metre.Kelvin (W/m.K) olarak tanımlanmaktadır (Cai vd., 2024).

Termodinamiğin ikinci yasası gereği ısı transferi, bir cisim içindeki sıcaklık farkına bağlı olarak yüksek sıcaklıklı bölgeden düşük sıcaklığa doğru gerçekleşmektedir. Bu bağlamda malzemenin  $\lambda$  değeri ne kadar düşükse, sıcaklık gradyanı altında ısı transferi o kadar sınırlı olacağından malzemenin yalıtım performansında artış meydana gelmektedir (Sánchez-Calderón vd., 2022). Bu nedenle düşük ısıl iletkenlik katsayısına sahip malzemeler; enerji verimliliği

teknolojileri, inşaat sektörü, otomotiv, uzay teknolojileri ve kriyojenik uygulamalar dahil olmak üzere pek çok alanda tercih edilmektedir.

Isıl iletkenlik katsayısı sabit bir değer olmayıp; hücre boyutu, liflerin çapı, düzeni, kullanılan gazın türü ve basıncı, bağlayıcı malzeme türü, ortalama sıcaklık, nem içeriği, yoğunluk ve eskimeye bağlı olarak değişmektedir (Y. Wang vd., 2023). Malzemenin ısı iletkenlik değerlerinin bilinmesi, farklı ısı yalıtım malzemelerinin etkinliği arasında nicel bir karşılaştırma yapılmasına olanak tanımaktadır. ASTM-C518 standardına göre, ısı iletkenlik genellikle 24 °C sıcaklık ve %50 ± 10 bağıl nem koşullarında ölçülmektedir (ASTM, 2021). Bu değerler genellikle deneysel araştırmalardan ve laboratuvar çalışmalarından elde edilen ürünlerin ölçümüyle elde edilmektedir (Koru, 2016). Gerçek saha uygulamalarında hava koşulları, dış sıcaklıklar ve nem değerleri gün boyunca değişiklik gösterdiğinden yalıtım malzemelerinin ısı iletkenliğini ve bunların sıcaklığa bağlı performans değişimlerini belirlemek gerekmektedir. Isıl iletkenlik katsayısına etki eden en önemli parametreler arasında şunlar yer almaktadır:

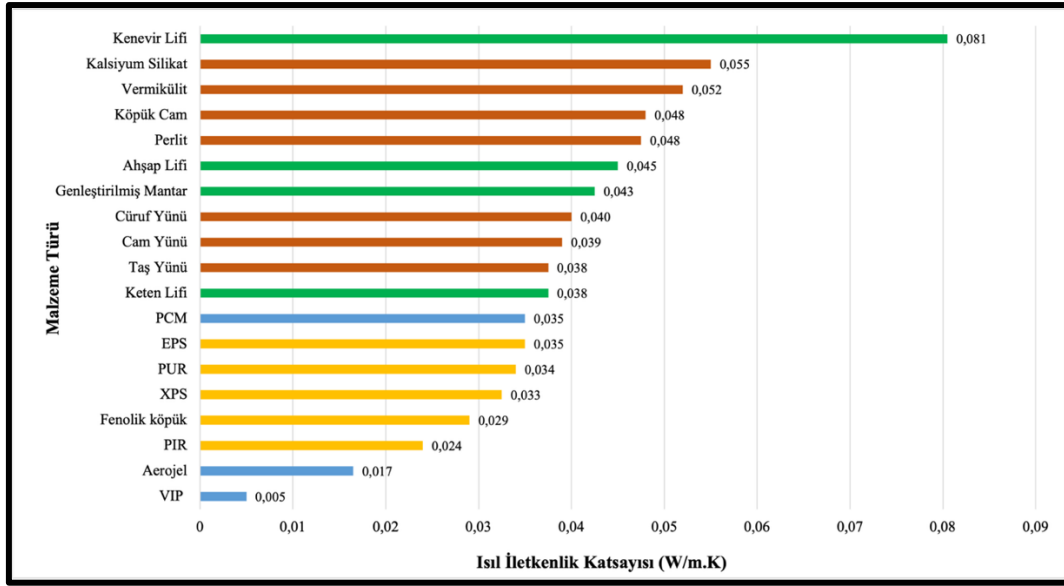
Malzeme sıcaklığı: Sıcaklık değişimleri ısı iletkenlik katsayısını doğrudan etkilemektedir. Genel kabule göre sıcaklığın artmasıyla birlikte ısı iletkenlik değeri artmaktadır (Hung Anh & Pászory, 2021). Polimer esaslı malzemelerde sıcaklığın artması molekül hareketliliğini artıracığından  $\lambda$  değeri de çoğunlukla artma eğilimi gösterirken, bazı seramik malzemelerde ise daha düşük sıcaklıklarda fonon saçılmaları sebebiyle  $\lambda$  değeri azalabilmektedir. İnorganik elyaf yalıtım malzemesi ve bazı petrokimyasal yalıtım malzemeleri için çalışma sıcaklığının artması, ısı iletim hızını ve dolayısıyla  $\lambda$  değerini yaklaşık %20–30 oranında artırmaktadır (Koru, 2016).

Yoğunluk: Yoğunluğun belli bir seviyeye kadar artması ısı iletkenliği düşürebilmektedir. Bunun sebebi, gözenekli yapıdaki hava boşluklarının yalıtım etkisinin yüksek olmasıdır. Ancak malzeme yoğunluğunun optimum değeri aştığı durumlarda gözenekliliğin azalması nedeniyle  $\lambda$  değeri yükselmektedir (Bodin vd., 2025).

Gözeneklilik: Gözenek yapısının, ısının taşınımıyla transferini sınırlayarak ısı iletkenliği azalttığı bilinmektedir. Bu nedenle yüksek poroziteye sahip aerojeller, köpük betonlar ve perlit esaslı malzemelerde düşük  $\lambda$  değeri elde edilmektedir.

Nem içeriği: Suyun ısı iletkenlik değeri (0,6 W/(m.K)), havanın ısı iletkenlik değerinden yüksek olduğundan, malzemenin nem oranındaki artış ısı iletkenlik katsayısını yükseltmektedir. Bu durumda özellikle açık hücreli malzemelerin yalıtım performansı azalmaktadır.

Günümüzde yaygın kullanılan yalıtım malzemelerinin ısı iletkenlik katsayıları Şekil 2.16.'te verilmiştir.



Şekil 2.16. Yaygın kullanılan ısı yalıtım malzemelerinin ısı iletkenlik katsayıları.

Sonuç olarak; ısı iletkenlik katsayısı, yalıtım malzemeleri için temel fiziksel özellik olmanın yanı sıra enerji verimliliği politikaları, sürdürülebilir yapı tasarımları ve çevresel etkinin azaltılması stratejileri bakımından da stratejik öneme sahiptir. Bu nedenle yalıtım malzemelerinin elde edilmesinde, ısı iletkenlik katsayısının optimize edilmesi temel hedeflerden biri olmaktadır.

### 2.7.2. Isıl direnç (R-değeri)

Isıl direnç, bir malzemenin ısı geçişine karşı gösterdiği direncin uluslararası birim sisteminde  $m^2.K/W$  (metrekare-Kelvin/watt) biriminden ifadesi olup genellikle  $R$ -değeri olarak adlandırılmaktadır. Bu değer özellikle yapı fiziği, yalıtım teknolojileri ve enerji verimliliği bakımından kritik öneme sahiptir. Isıl direnç; iletim, konveksiyon ve radyasyonla ısı transferinin engellenmesi sonucu oluşan ısı akışı direncinin bir ölçüsü olup malzemenin ısı iletkenliği, kalınlığı ve yoğunluğunun bir fonksiyonudur (Al-Homoud, 2005). Matematiksel olarak ısı direnç  $D.6'$ da gösterildiği gibi; malzemenin kalınlığı ( $d$ ) ile ısı iletkenlik katsayısının ( $\lambda$ ) oranı olarak hesaplanır.

$$R = \frac{d}{\lambda} \quad (D.6)$$

Bağıntıdan da açıkça görüldüğü üzere; bir malzemenin kalınlığı arttıkça veya ısı iletkenlik katsayısı azaldıkça  $R$ -değeri yükselmekte ve yalıtım kabiliyeti de artmaktadır. Bu nedenle yüksek kalınlık ve düşük ısı iletkenlik değerine sahip malzemeler enerji tasarruf çözümlerinde daha iyi sonuçlar alınmasını sağlamaktadır.  $R$ -değeri yalnızca malzeme kalınlığı

ve ısı iletkenlik katsayısı gibi teknik parametrelere bağlı olmayıp, fiziksel ve çevresel parametrelerden de etkilenmektedir. Bu parametreler Şu Şekildedir:

Kalınlık ( $d$ ): Aynı malzeme için kalınlık arttııa  $R$ -değeri doğrusal olarak artmaktadır. Yalıtımın kalınlığı arttııa yalıtımdan geçen ısı transferinin azaldığı genel bir kabuldür. Ancak ısı iletkenlik değeri yalıtımın kalınlığına bağlı olmayıp bunun yerine ısı direnci etkilemektedir (Asdrubali vd., 2015).

Isı iletkenlik katsayısı ( $\lambda$ ): Malzemenin bileŐimi ve yapısal özelliklerine bağlı olarak deęiŐen  $\lambda$  değeri, ısı direnci doğrudan etkilemektedir. PUR, XPS ve arojel gibi dűŐük ısı iletkenlik katsayısına sahip malzemeler, aynı kalınlıktaki mineral yűn veya beton gibi malzemelere kıyasla çok daha yűksek  $R$ -değeri sunmaktadır.

Gűzeneklilik: Malzemenin gűzenek boyutu, Őekli, miktarı ve daęılımı ısı transfer mekanizmasına doęrudan etki eden parametrelerdendir. Gűzenekli malzemeler, yűksek miktarda hava boŐluęu içerdiklerinden, gűzeneklerde hapsolmuŐ hava ısı transferini sınırlayarak malzemenin toplam ısı iletkenlik katsayısını dűŐűrmektedir (F. Lou vd., 2023).

Yoęunluk: Gűzeneklilik ve yoęunluk ters orantılıdır. Malzeme yoęunluęu arttııa gűzenek oranı azaldıęından katı faz ısı iletimi artmakta, malzemenin  $\lambda$  deęeri yűkselmekte ve  $R$ -deęeri azalmaktadır. Malzeme yoęunluęunun çok dűŐűk olduęu durumda ise gűzenekler arası baęlantı azalacaęından mekanik dayanım olumsuz etkilenmektedir. Optimum yoęunluklu malzeme için hem mekanik kararlılıęın korunacaęı hem de  $\lambda$  deęerinin dűŐűk olacaęı koŐulların saęlanması gerekmektedir (Soloveva vd., 2022).

Nem içerięi: Yalıtım malzemesinin nem içerięi arttııa  $\lambda$  deęeri artmakta,  $R$ -deęeri azalmaktadır. Özellikle dıŐ cephe uygulamalarında nem kontrolű bűyűk önem taŐıymaktadır.

Sıcaklık: Malzemenin  $R$ -deęeri, doęrudan ısı iletkenlik katsayısı ile iliŐkili olduęundan ısı direnç, çalıŐma sıcaklıęına baęlı olarak deęiŐmektedir. Bu sebeple malzeme tűrűne gűre sıcaklıęa baęlı ısı deęiŐimini anlamak ve kontrol etmek için doęru bir ısı direnç deęeri belirlenmelidir. EPS, XPS, PUR ve PIR gibi polimerik yalıtım malzemelerinde sıcaklıęın artması fonon hareketini kolaylaŐtırarak ısı iletkenlik deęerinin artmasına sebep olmaktadır (Merillas, Villafaęe, vd., 2022). Buna ek olarak polimer malzemeler yűksek sıcaklıklarda yapısal bozulma, yumuŐama veya erime durumuna gelebileceęinden, ısı performansına ek olarak mekanik dayanımın da azalmasına yol açmaktadır. Seramik, taŐ yűnű ve cam kűpűęű gibi inorganik malzemelerde ise dűŐűk sıcaklıklarda yoęun fonon saçılımı etkisiyle dűŐűk ısı iletkenlik deęeri ve yűksek  $R$ -deęeri gűzlenmektedir (J.-H. Kim vd., 2024). Yűksek sıcaklıklarda gűzeneklere su buharı difűzyonu kolaylaŐacaęından  $\lambda$  deęeri artmakta ve  $R$ -deęeri azalmaktadır. Dolayısıyla,

malzemenin uzun vadeli performans değerlendirmesinde sıcaklık ve nem etkileşimi dikkate alınmalıdır.

### 2.7.3. Isıl geçirgenlik katsayısı (U-değeri)

Yapı fiziğinde; cam, duvar, çatı ve zemin gibi yapı elemanlarından kaynaklanan dış cephedeki ısı alışverişi, yalıtım sistemi bileşenlerinin ısı geçirgenlik katsayısı ( $U$ -değeri) tarafından belirlenmektedir (B. M. Rocha vd., 2025). Isıl geçirgenlik katsayısı, genellikle “ $U$ ” sembolü ile ifade edilir ve  $W/m^2K$  (watt/metre-kare-Kelvin) birimiyle gsterilmektedir.  $U$ -değeri; yapı bileşeninin birim yüzey alanı üzerinden, sabit durum koşullarında geçen ısı akışının, iki ortam arasındaki sıcaklık farkına oranı olarak ifade edilmektedir. Matematiksel olarak D.7’de gsterildiği gibi; ısıl iletkenlik katsayısının ( $\lambda$ ), malzeme kalınlığına ( $d$ ) oranı ile belirlenmektedir.

$$U = \frac{\lambda}{d} \quad (D.7)$$

Aynı zamanda  $U$ -değeri, ısı geçişine karşı gsterilen direnç olan  $R$ -değerinin tersidir (Song vd., 2024).

$$U = \frac{1}{R} \quad (D.8)$$

Isıl geçirgenlik, bir yapı elemanının iç yüzeyinden dış yüzeyine iletilen toplam ısı miktarını ifade etmektedir. Yalıtım malzemeleri için ısı geçirgenliği ve ısı direnci ters orantılı bir ilişki içindedir; ısı geçirgenliği ne kadar düşükse, ısı direnci o kadar yüksek olur ve sonuç olarak duvar yapısının ısı yalıtımı da o kadar yüksek olmaktadır. Bu nedenle, özellikle tavan, çatı, dış duvar ve döşeme gibi dış ortamla temas eden yapı elemanlarında ısıl geçirgenlik katsayısının düşük olması önemlidir (Gupta & Deb, 2023).

Uygun bir ısıl direnç katsayısı yani ısıl geçirgenlik performansı elde edebilmek için, kullanılan malzemenin düşük ısıl iletkenliğe sahip olmasının yanında yeterli kalınlıkta uygulanması gerekmektedir. Böylelikle hem  $R$ -değeri yükseltilmekte hem de  $U$ -değeri düşürülerek etkin bir yalıtım ve konfor ortamı sağlanmaktadır. Ayrıca düşük  $U$ -değeri ile enerji tasarrufuna ek olarak iç mekan sıcaklığında kararlı ortam koşulu sağlanarak ısıl konfor artırılmış olur.

$U$ -değerini etkileyen başlıca parametreler şunlardır:

Malzeme özellikleri: Malzemenin ısıl iletkenlik katsayısı,  $U$ -değerini belirleyen temel unsurlardan biridir. Düşük  $\lambda$  değerine sahip olan mineral yünler, EPS, XPS, PUR ve aerojeller daha iyi yalıtım sağlar ve  $U$ -değerini düşürmektedir (J. Yu vd., 2024).

Malzeme kalınlığı:  $U$ -değerini etkileyen en önemli geometrik parametre, malzeme kalınlığıdır. Kalınlığın artmasıyla birlikte ısının transfer yolu uzayacağından,  $U$ -değeri azalmakta ve  $R$ -değeri artmaktadır. Pratik yalıtım uygulamalarında optimum kalınlığın seçimi enerji tasarrufu, mekanik dayanım, maliyet ve kullanılabilir alan gibi parametreler dikkate alınarak belirlenmektedir.

Katmanlı yapı elemanları: Sıva, tuğla, yalıtım tabakası, kaplama gibi farklı yapı malzemelerinin bir araya gelmesiyle oluşan çok katmanlı yapı elemanlarında toplam ısıl direnç, her bir katmanın ısıl direncinin toplamına eşit olmaktadır. Bu durumda ısıl direnç D.9'da gösterildiği şekilde ifade edilmektedir.

$$U = \frac{1}{\Sigma R_i} \quad (D.9)$$

Isıl köprüler: Yapı bileşenlerinde sürekli yalıtım tabakasının kesintiye uğradığı veya malzeme yoğunluğunun değiştiği bölgelerde ısı köprüleri meydana gelmektedir. Kolon-kiriş birleşimleri, pencere kenarları, çatı-duvar kesişim noktaları ısı köprüsü meydana getiren alanlar olarak bilinmektedir.

Isı köprülerinde  $U$ -değeri yükselir, enerji kaybı artar ve iç bölgede yoğunlaşma ve küf oluşumu gibi dayanıklılık sorunları meydana gelir. Mevcut araştırmalar, ısı köprülerinden kaynaklanan toplam enerji kaybının %15-30 seviyelerine kadar ulaşabileceğini ortaya koymaktadır (M.-Y. Kim vd., 2022). Bu sebeple ülkeler, bina enerji verimliliği yönetmeliklerinde  $U$ -değeri için maksimum sınır değerleri belirlemiştir. Isı köprülerinin azaltılması için kesintisiz ve sürekli yalıtım uygulaması, köprü bölgelerinde ek yalıtım malzemesi kullanımı, termal kırıcı elemanların uygulanması, pencere ve kapılarda ısı yalıtımlı doğrama sistemlerinin kullanımı gibi stratejiler önerilmektedir.

#### 2.7.4. Termal kütle

Termal kütle; bir malzemenin ısıyı emme, depolama ve serbest bırakma yeteneği olan “ısı depolama kapasitesinin” bir ölçütüdür. Termal kütlesi yüksek olan malzemeler, gündüz saatlerinde güneşten aldığı ısıyı bünyesinde depolamakta, gece bu ısıyı kademeli bir şekilde serbest bırakarak iç ortam sıcaklığının stabil olmasını sağlamaktadır (Kumar vd., 2020). Bu özellik; malzeme yoğunluğu, kalınlığı ve özgül ısı ile doğrudan ilişkilidir.

Bir malzemenin ısı depolama kapasitesi matematiksel olarak D.10'da gösterildiği şekilde ifade edilmektedir:

$$Q = m \cdot c \cdot \Delta T = \rho \cdot V \cdot c \cdot \Delta T \quad (D.10)$$

Burada; depolanan ısı miktarı  $Q$  (Joule), malzeme kütlesi  $m$  (kg), özgül ısı kapasitesi  $c$  (J/kg.K), sıcaklık değişimi  $\Delta T$  (K), malzemenin yoğunluğu  $\rho$  (kg/m<sup>3</sup>) ve malzeme hacmi  $V$  (m<sup>3</sup>) olarak ifade edilmektedir (Torres Sevilla & Radulovic, 2021).

Yoğunluk, hacim, özgül ısı kapasitesi ve sıcaklık farkı arttıkça malzemenin depolayabileceği enerji miktarı da artmaktadır. Kalınlık artışı ile birlikte ısının malzeme içinde ilerlemesi için gerekli süre olan gecikme zamanı da uzamaktadır. Bu durumda dış ortam sıcaklık dalgalanmaları iç mekana daha geç ulaşacaktır.

Yoğunluk ( $\rho$ ) D.11'de gösterildiği gibi; birim hacim başına düşen kütle miktarı olarak ifade edilmektedir.

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (D.11)$$

Yüksek yoğunluklu malzemeler, aynı hacimde daha fazla kütleyle sahip olduğundan daha fazla ısı depolama potansiyeline sahiptir. Yüksek termal kütle, binalarda ısıtma ve soğutma yüklerini önemli ölçüde azaltabilmektedir. Özellikle yaz aylarında gündüzleri depolanan fazla ısı, gece doğal havalandırma sayesinde atılarak soğutma ihtiyacı azaltılır. Kış aylarında ise gündüz saatlerinde güneşten kazanılan ısı enerjisi depolanarak gece ısıtma gereksinimi azaltılır. Bu sebeple, düşük enerjili bina tasarımları ve yenilenebilir enerji stratejilerinde termal kütlelerin enerji tasarrufunu artırıcı etki sunmaktadır.

### 2.7.5. Özgül ısı (ısı kapasitesi)

Tanım olarak; ısı kapasitesi, bir malzemenin hacminin bir fonksiyonu şeklinde depolayabileceği ısı miktarı veya malzemenin sıcaklığını 1 Kelvin ( $K$ ) artırmak için gereken toplam enerjisini temsil etmekte ve SI sisteminde J/kg.K (joule/kilogram-Kelvin) birimiyle ifade edilmektedir (Burger vd., 2016). Bu özellik, bir malzemenin ısı depolama kapasitesini tanımlamak açısından önemlidir. Yüksek özgül ısıya sahip malzemelerin, belli bir sıcaklık değişimi karşısında daha fazla enerji depolamaları mümkündür. Bu tür malzemeler, düşük yoğunluklarda bile genellikle düşük termal difüzyon performansı sergileyerek, sıcaklık değişimlerine yavaş tepki vermektedir (Ali vd., 2024). Bu durum özellikle iç ortam sıcaklığının dengelenmesine, dolayısıyla ısı konforun sağlanmasına yardımcı olmaktadır. Termal difüzyon katsayısı; D.12 bağıntısından yola çıkılarak hesaplanmaktadır. Burada  $\lambda$  ısı iletkenlik (W/m.K),  $\rho$  yoğunluk (kg/m<sup>3</sup>) ve  $c$  özgül ısı kapasitesini ifade etmektedir (J/kg.K).

$$a = \frac{\lambda}{\rho \cdot c} \quad (D.12)$$

Yüksek özgül ısı, malzemenin sıcaklık değişimlerine daha yavaş tepki vermesine yol açmaktadır. Bu durumda iç ortam sıcaklığı, ani gelişen dış ortam değişimlerinden korunmuş olur. Bu bakımdan; özgül ısı yüksek, ısı iletkenliği düşük malzemeler ısıl tampon görevi görerek enerji verimliliğinin artırılmasına katkı sağlamaktadır. Özellikle doğal havalandırılmalı sistemlerde, pasif solar tasarıma sahip yapılarda ve günlük sıcaklık farklarının yüksek olduğu iklimlerde mekanik ısıtma ve soğutma sistemlerine olan ihtiyacı azaltarak enerji verimliliğini desteklemektedir.

#### **2.7.6. Buhar difüzyon direnç katsayısı ( $\mu$ )**

Yalıtım malzemelerinin önemli teknik parametrelerinden biri de buhar difüzyon direnç katsayısıdır. Bu katsayı ( $\mu$ ), malzemenin su buharının geçişine karşı gösterdiği direnci ifade etmektedir. Buhar difüzyon direnç katsayısı, malzemenin higroskopik (nem tutma) özellikleriyle doğrudan ilişkilidir (Kumar vd., 2020). Yüksek buhar difüzyon direnç katsayısı, malzemenin nemi emme ve iletme kapasitesinin düşük olduğunu gösterirken, düşük katsayılar daha fazla nem geçişine izin vermektedir (B. M. Rocha vd., 2025). Malzemenin nem içeriği artışı ile ıslak bileşen sıvı film tabakası oluşturmaktadır. Nem oranı daha fazla arttığında sıvı form tüm gözenekleri doldurarak kılcal iletim yoluyla yayılmaktadır. Bu durumda su buharı difüzyonu, buharlaşma, yoğunlaşma ve kılcal akış durumu ısı transferi üzerinde etkili olmaktadır. Su buharı direnci açısından,  $\mu$  değerleri 5 MNs/g'ı aşan malzemeler nemli koşullar için optimal olarak tanımlanmış olup dayanıklılık ve termal performansı tutarlı kabul edilmiştir (B. M. Rocha vd., 2025).

İnorganik kökenli yalıtım malzemeleri (EPS ve XPS gibi) genellikle 20-170  $\mu$  arasında buhar difüzyon direnç katsayısına sahiptir. Bu değerler, nemin malzemeye nüfuz etmesini engelleyerek yalıtım performansının korunmasına katkıda bulunmaktadır. Öte yandan, cam yünü ve mineral yünü gibi lifli inorganik malzemelerde  $\mu$  değeri düşüktür; bu nedenle yüksek nem emilimi gözlenmektedir (Lafond & Blanchet, 2020). Malzemeler, kalınlıklarına bağlı olarak su buharı difüzyonuna karşı farklı derecelerde direnç gösterse de binalarda aşırı nem; konut kalitesinin bozulması, termal direncin azalması, ek mekanik gerilimler, tuz taşınımı ve malzeme bozulması gibi birçok probleme sebep olmaktadır. Özellikle bina cephelerinde, yalıtımlı duvarlarda ve çatılarda nem, mikrobiyal büyümeler termal etkinin azalmasına sebep olmaktadır. Bu durum, iç mekan hava koşullarının bozulması nedeniyle çeşitli sağlık sorunlarına ortam hazırlamaktadır. Uygulama alanına göre, yalıtım uygulanacak yapı elemanı dış duvar olduğunda  $\mu$  değerinin düşük olması istenir. Bunun sebebi dış ortamda buhar basıncının daha düşük olmasıdır. Buna karşılık, yüksek buhar basıncının olduğu iç ortamlarda ise  $\mu$  değeri yüksek olmalıdır (Kumar vd., 2020). İç duvar yalıtımlarında su buharının yoğunlaşması denetlenmelidir. Aksi halde buharın yoğunlaşması, yalıtım malzemesinin ıslanıp yalıtım özelliğini kaybetmesi,

çürümesi ve küf oluşumu gibi istenmeyen durumların gelişmesine sebep olmaktadır. Bu etkileri engellemek için, doğru buhar difüzyon tekniği uygulanmalıdır. Bu teknik, sıcak bölgede kalan yapı elemanında yalıtım malzemesi, soğuk kısımlarda ise buhar kesici konulmaması ile mümkün olacaktır. ASTM C1616-07 standardına göre bir yapı malzemesinin nem içeriği, D.13'te verildiği şekilde; emilen nemin malzemenin kuru ağırlığına oranına göre hesaplanmaktadır (ASTM, 2018).

$$w = \frac{m - m_d}{m_d} \quad (D.13)$$

Denklemden  $w$ , nem içeriğini (%),  $m_d$  örneğin kuru kütle (kg) ve  $m$ , ıslak numune kütle (kg) temsil etmektedir (Hung Anh & Pásztor, 2021).

Binalarda nemi kontrol etmenin en etkili yolu, dikkatli bir tasarım ve doğru malzeme seçimidir. Bunun yanı sıra buhar geciktiriciler, su buharının geçişini azaltan özel malzemelerdir. Bunlar; işlenmiş kağıtlar, boyalar, plastik levhalar ve metalik folyolar olarak bilinmektedir. Malzemelerin geçirgenliği, su buharının malzeme içinden geçebilme derecesini belirlemektedir. Geçirgenlik değeri düşük olan malzemeler, buhar geciktirici olarak daha etkin performans sunmaktadır (Al-Homoud, 2005). İyi yalıtılmış ve hava geçirmez binalarda iç mekan hava kalitesinin düşüklüğü ve nem birikimi gibi sorunların yaşanmaması için yeterli havalandırma sağlanması önemlidir. Havalandırma sistemi, iklimlendirilmiş alanlarda havanın kirlenmesi ve hava kirlenmelerin birikmesini önlemekte, ayrıca ısıtma mevsiminde pencere yüzeylerinde nem yoğunlaşmasına ve duvarlar ile çatılarda gizli yoğuşmaya neden olabilecek yüksek nem seviyelerinin oluşmasını engellemektedir.

#### **2.7.7. Yangına karşı dayanıklılık**

Yangına karşı dayanıklılık; bir malzemenin tutuşmaya direnme, yanmayı geciktirme ve yangın yayılmasını sınırlama yeteneğini ifade etmektedir. Isı yalıtım malzemelerinin yangın anında gösterdikleri davranışın bilinmesi, güvenli yapı tasarımı açısından önemlidir. Bu bağlamda, malzemenin yanıcılığı, tutuşma sonrası alevleri yayma durumu, ısı artış durumu ve zehirli gaz açığa çıkarma gibi faktörler göz ardı edilmemelidir (Ijjada & Nayaka, 2022). Özellikle çatı, cephe kaplamaları ve tesisat yalıtımları gibi yangına açık alanlarda yalıtım amaçlı kullanılacak malzemeler, performans bakımından sınıflandırma kriterine uygun seçilmelidir. Ülkemizde yapı malzemeleri TS EN 13501-1 standardı kapsamında, yanıcılık ve alev yayılımı özellikleri bakımından sınıflandırılmakta olup farklı kullanım alanlarına göre uygunluk kriterleri belirlenmektedir (Ouda vd., 2025).

Tablo 2.3.'te TS EN 13501-1 standardına göre çeşitli malzemelerin yangın dayanım sınıfı ve yanma sırasındaki davranışları yer almaktadır (TS EN, 16 Aralık 2019).

**Tablo 2.3.** Isı yalıtım malzemelerinin yangına dayanım açısından sınıflandırılması

Dayanım Sınıfı	Malzeme Türü	Tanımlamalar
A1 Sınıfı (Yanıcı Olmayan)	Cam Yünü	Yanıcı değildir. Yangın gelişmesine veya alevin yayılmasına katkıda bulunmaz.
	Taş Yünü	Cam yününe benzer davranış sergilemekte olup mükemmel yangın direnci ve termal stabiliteye sahiptir.
A2 Sınıfı (Sınırlı Yanıcılık)	Ahşap Yünü	Neredeyse hiç yanmaz, yoğun yangın koşullarında ihmal edilebilir düzeyde ısı yayabilmektedir.
B Sınıfı (Sınırlı Alev Yayma)	Poliüretan Köpükler	Bir miktar yanıcı olup yangın durumunda duman yayabilmektedir.
	EPS	Yanıcıdır, alevlerin yayılmasına katkıda bulunabilir.
C Sınıfı (Yanıcı)	PUR	Oldukça yanıcı özellikte olup kendi kendine sönebilmektedir.
	Fiberglas	Alevin yayılmasına katkıda bulunabilir.
E Sınıfı (Yanıcı)	Bazı Spreyler, Köpük Yalıtım, Mantar	Yanıcılığı yüksek olup aynı zamanda toksik duman üretebilir. Mantar ürünler yavaş yanar. Yanma sırasında yaydığı gazlar toksik değildir.
F Sınıfı (Yüksek Derecede Yanıcı)	Bazı Düşük Kaliteli Köpük Ürünleri	Kolayca alev alabilir ve yangının yayılmasına önemli ölçüde katkıda bulunabilirler.

Yangına dayanıklılık sınıflandırması A Sınıfı (yanmaz) ile F sınıfı (yüksek derecede yanıcı) arasında değişmektedir. A1 veya A2 sınıfına sahip malzemeler, yangın gelişimine minimum katkıları sayesinde yangın güvenliğini artırmada oldukça etkili kabul edilirken, E veya F sınıfı olarak derecelendirilenler sınırlı direnç göstererek daha büyük riskler oluşturmaktadır (B. M. Rocha vd., 2025). Malzeme bileşimi, alev direncinde önemli bir rol oynamaktadır. Mevcut literatür çalışmaları, inorganik kökenli hammaddelerle üretilen ısı yalıtım malzemelerinin, organik kökenlilere kıyasla daha yüksek yangın dayanımı gösterdiğini ortaya koymaktadır. E veya F sınıfı yangın dayanımına sahip poliüretan ve polistiren gibi organik kökenli yalıtım malzemelerinin yanmaları halinde karbon monoksit ve siyanür gibi zehirli gaz açığa çıkarma potansiyeli bulunmaktadır. Bu durum yangın sırasındaki can güvenliği ve iç mekan hava kalitesi bakımından risk oluşturmaktadır (Kumar vd., 2020). Doğal yalıtım malzemeleri yanıcı olarak kabul edilse de belirli koşullarda geleneksel yalıtım malzemelerinden

daha güvenlidirler. Bu malzemeler yanma sırasında genleştirilmiş polistirene kıyasla daha az duman çıkarırlar. Genleşmiş polistiren ise ahşap yalıtım malzemelerinden 32 kat daha fazla duman üretebilmektedir (Lafond & Blanchet, 2020). Alev dirençli malzemeler geliştirmek amacıyla organik kökenli yalıtım malzemelerde çeşitli alev geciktirici katkıların kullanımı mümkündür. Ancak özellikle halojenli alev geciktiriciler uzun vadede çevresel riskler oluşturmakta, toksik atık oluşumu ve geri dönüşümsel zorlukları da beraberinde getirmektedir. Ayrıca yangın güvenliği için, polistiren ve poliüretan gibi plastik köpük yalıtımların iç yüzeylerine en az 1,3 cm kalınlığında alçıpan kaplama yerleştirilmesi önerilmektedir (Al-Homoud, 2005). Özellikle nüfus yoğunluğunun yoğun olduğu ve yüksek riskli bölgelerde yangıcılığı ve duman yoğunluğu düşük, toksik gaz salınımı az olan malzemelerin tercih edilmesi hem kullanım güvenliği hem de yapı bütünlüğünün korunması bakımından dikkate alınmalıdır. Özellikle yanmaya meyilli veya yüksek riskli ortamlarda yanmaya dayanıklı yalıtım malzemelerinin seçilmesi, yapının yangın koşullarında göstereceği performansı belirlemede büyük önem taşımaktadır.

### **2.7.8. Birim hacim ağırlık (BHA)**

Birim hacim ağırlık (BHA); malzemenin birim hacimdeki kütlesi olarak ifade edilmekte ve ısıl iletkenlik, mekanik dayanım, uygulama kolaylığı ve servis ömrü gibi parametreleri doğrudan etkilemektedir. Düşük yoğunluklu ve yüksek boşluk hacmine sahip bir malzeme boşluklarında daha fazla hava hapsederek ısı transferini azaltmaktadır. Bu durumda malzeme düşük ısıl iletkenlik katsayısına sahip olacağından etkili bir yalıtım sağlamaktadır (Ijjada & Nayaka, 2022). Yoğunluk değeri malzemenin üretim yöntemine, hammadde yapısına ve gözenek dağılımına bağlı olarak değişmektedir. Isı yalıtım malzemelerinde birim hacim kütlenin genellikle 20-100 kg/m<sup>3</sup> arasındaki değerlerde olması beklenmektedir.

Günümüzde üretilen ısı yalıtım malzemeleri, farklı BHA değerine sahiptir. Fiberglas (10-96 kg/m<sup>3</sup>) ve EPS (15-35 kg/m<sup>3</sup>) gibi düşük yığın yoğunluğuna sahip malzemeler, tavan araları ve duvarlar gibi hafif yalıtım uygulamaları için ideal bir tercihtir. Buna karşılık, mineral yünü (30-200 kg/m<sup>3</sup>) ve XPS (28-45 kg/m<sup>3</sup>) gibi daha yüksek yığın yoğunluğuna sahip malzemeler, beton levhaların altında veya endüstriyel ortamlarda, daha fazla mekanik dayanım ve dayanıklılık gerektiren uygulamalarda sıklıkla kullanılmaktadır (Ouda vd., 2025). Genel ifade ile düşük yoğunluklu, hafif ve gözenekli malzemelerin ısıl iletim katsayıları da düşüktür. Aerojel gibi ileri teknolojiye sahip yalıtım malzemelerinde ise arojel oranının artması, birim hacim ağırlığı daha da azaltır ve ısı iletim performansı artmaktadır (Ali vd., 2024). Malzeme yoğunluğu, ısıl performansa ek olarak mekanik dayanım ve yangın davranışı açısından da önemli bir konumdadır. Çok düşük yoğunluk değerine sahip malzemeler iyi yalıtkan özellikte olsalar da

dayanım ve dayanıklılık bakımından birtakım kısıtlılıklara sahiptir. Bu sebeple malzemenin birim hacim ağırlığı, kullanım amacına uygun olarak optimize edilmelidir.

### **2.7.9. Su emme oranı**

Isı yalıtım malzemelerinin su ile etkileşimi, malzemenin performansını doğrudan etkileyen önemli bir parametredir. Su ile temas eden yalıtım malzemeleri, bünyelerine su alarak zamanla ısı iletkenlik değerini artırır ve yalıtım özelliğini kaybederek ısıyı iletmeye başlamaktadır. Bu nedenle bünyesine su emen malzemelerin ısı yalıtımında kullanılmaları uygun değildir. Bir malzemenin su emme oranı, öncelikle boşluk yapısına bağlıdır (Erzen vd., 2025). Gözenekli ve lifli yapıya sahip inorganik kökenli yalıtım malzemelerinde su emme oranı yüksektir. Buna karşılık, XPS gibi kapalı hücre yapısına sahip malzemeler neredeyse hiç su emmez. Bu özelliği sayesinde zemin suyuna temas eden yerlerde ek tedbir alınmasına gerek kalmadan uygulanması mümkündür. Yalıtım malzemelerinin nem içeriği arttıkça, yoğunluğu da artacağından ısı direnç azalır ve dolayısıyla ısı iletkenlik değeri artmaktadır. Bu etki özellikle aerjel gibi düşük yoğunluklu ve yüksek gözenekliliğe sahip malzemelerde daha belirgindir. Bu nedenle bir yalıtım malzemesinin su emme direnci, kılcal etki özellikleri ve donma-çözünme döngüsüne dayanım gibi parametreleri sürekli kontrol altında tutulmalıdır (Ali vd., 2024).

### **2.7.10. Basınç dayanımı**

Isı yalıtım malzemelerinin basınç dayanımı, uygulanacağı yapı elemanının taşıyıcı özelliklerine ve maruz kalacağı yükün türüne bağlı olarak önem kazanmaktadır. Özellikle zemin, döşeme ya da ters çatı gibi ağır yük altındaki kesitlerde kullanılacak yalıtım malzemesinin yüksek basınç dayanımına sahip olması gerekmektedir (C. Jin vd., 2025). Yalıtım malzemelerinin basınç dayanımı genellikle malzeme yoğunluğu ile ilişkilendirilmektedir. Malzeme yoğunluğunun artması malzemenin basınç altında şekil değiştirmesini sınırlandırarak uzun vadede yapı kararlılığını destekleyici rol oynamaktadır. Buna bağlı olarak ısı iletkenlik azalacağından, malzeme daha iyi bir yalıtım performansı sergilemektedir (Ali vd., 2024). EPS ve doğal liflerden elde edilmiş kompozitlerin basınç ve eğilme dayanımı açısından değerlendirildiği bir çalışmada EPS, dayanım açısından beklenen değerler sergilerken, doğal lifli malzemeler değişken değerler sergilemiştir (Cosentino vd., 2023). Bu bağlamda, yalıtım malzemelerinin basınç dayanımı, kullanılan malzeme türü ve kullanım alanına bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Malzemenin dayanımı, hem yapı elemanlarının taşıma kapasitesi ve uzun ömürlülüğü hem de ısı yalıtım performansının iyileştirilmesi açısından kritik bir parametre olarak ele alınmalıdır.

### 2.7.11. Ekonomiklik

Bir yalıtım malzemesinden beklenen performans, yalnızca mekanik ve fiziksel özelliklere göre değil, aynı zamanda ekonomik açıdan uygulanabilir olması ile de değerlendirilmektedir. Ekonomik açıdan avantaj sunacak bir malzemenin, hem ilk yatırım maliyeti düşük olmalı hem de uzun vadede bakım-onarım ve enerji tasarrufu potansiyeli gibi özellikleriyle de toplam maliyeti minimize etmelidir. Yalıtım malzemesinin ekonomik değerlendirilmesi; malzemenin başlangıç maliyeti, enerji tasarrufu ve işletme maliyeti, dayanıklılık ve çevresel etkilere direnci ile bakım masraflarını ifade eden bakım ve ömür maliyetleri gibi bileşenler üzerinden gerçekleştirilmelidir. Doğal ve geri dönüştürülmüş malzemeler daha düşük maliyetli olmalarına rağmen ısı yalıtım performansı açısından bazı kısıtlılıklara sahip olabilmektedir. Yalıtım malzemesinin doğru ve etkili bir şekilde uygulanması, maliyetleri etkileyen önemli bir faktördür. Uygun malzeme seçimiyle sağlanan enerji tasarrufu yüksek ilk yatırım maliyetlerini kolaylıkla telafi edebilmektedir. Buna ek olarak yalıtım malzemelerinin yerel kaynaklardan tedarik edilmesi ve üretimi; ekonomik fizibilitiyi, çevresel etkiyi ve tedarik zinciri verimliliğini olumlu yönde etkilemektedir. Yerel olarak üretilen malzemeler lojistik maliyetlerini azaltacağından, bölgesel endüstrileri desteklemekte ve sürdürülebilirlik hedeflerine katkıda bulunmaktadır (B. M. Rocha vd., 2025). Yalıtım malzemesi seçilirken sadece ekonomik olması diğer teknik kriterleri sağlamadığı sürece yalıtım açısından anlamlı bir tercih olmayacaktır. Bu nedenle öncelik, ekonomik bir malzeme olmasından ziyade diğer kriterleri karşılaması olmalıdır. Yalıtım malzemelerinin ekonomik maliyetleri ve çevresel etkilerine ilişkin veriler Tablo 2.4.'te yer almaktadır. Tablodaki veriler (Abden vd., 2022; Al-Homoud, 2005; E. Cuce vd., 2014; Erzen vd., 2025; Kumar vd., 2022; Pfundstein vd., 2008; Villasmil vd., 2019) tarafından yapılan çalışmalardan derlenmiştir.

**Tablo 2.4.** Isı yalıtım malzemelerinin ekonomik ve çevresel özelliklerinin karşılaştırması

Malzeme Türü	Kalınlık (mm)	Maliyet	YDD Performansı	Üretim Formları	Kullanım Alanları
Taş Yünü	25-75	Orta	Orta	Levha, rulo, boru	Çatı, duvar, boru ve endüstriyel tesisler.
Cam Yünü	12-100	Orta	Orta	Levha, rulo, boru	Çatı, duvar ve boru sistemleri.
Perlit	13-51	Düşük	Orta	Gevşek dolgu, levha ve panel	Çatı, döşeme, hafif beton katkısı.
EPS	13-305	Orta	Orta	Levha, panel ve blok	Çatı, duvar, döşeme ve temeller.

**Tablo 2.4.** Isı yalıtım malzemelerinin ekonomik ve çevresel özelliklerinin karşılaştırması (Devamı)

PUR	30-100	Orta	Orta	Levha, sprey ve panel	Çatı, duvar ve borular.
XPS	19-102	Orta	Orta	Levha, panel ve blok	Çatı, döşeme ve duvarlar.
PIR	25-100	Orta	Orta	Levha, sprey ve panel	Çatı, cephe kaplamaları ve depolar.
Fenol Köpüğü	25-100	Orta	Orta	Levha, panel ve blok	Çatı, boru ve endüstriyel tesisler.

### 2.7.12. Dayanıklılık (durabilite)

Yalıtım malzemesi seçiminde bir başka önemli faktör de durabilite (dayanıklılık), yani uzun ömürlülüktür. Malzemeler; yüksek sıcaklık, nem, UV radyasyonu ve kirlilik gibi çevresel etmenlere maruz kaldıklarında performanslarında bozulmalar meydana gelebilmektedir (Ali vd., 2024). Bu etkiler özellikle organik bazlı yalıtım malzemelerinde yapısal bozulmalara, ısı iletkenlik katsayısında artışa ve mekanik dayanımda azalmaya yol açabilmektedir. Bu nedenle yalıtım malzemesi seçiminde durabilite özellikleri; uygulama koşulları ve alınabilecek koruyucu önlemlerle birlikte değerlendirilmelidir.

Yalıtım malzemelerinin mekanik ve termal özellikleri zamanla önemli ölçüde değişir. Genel olarak, yaşlanma sürecinde sıcaklık, nem ve yoğunluk gibi etkenlerin ısı iletkenliğe olan etkisinin değerlendirilmesi, gerçek çevre koşulları altındaki bir binanın, yaşam döngüsü boyunca yalıtım malzemelerinin nasıl performans gösterdiğini anlamak açısından önemlidir (Hung Anh & Pásztor, 2021). Bu bağlamda, yaşlanmanın sıcaklık, nem ve görünür yoğunluk üzerindeki etkileri analiz edilerek ısı iletkenlik değişimleri açıklanmaktadır (Reynoso vd., 2021). Yalıtım malzemelerinin dayanıklılığını test etmek, uzun vadeli performanslarını ve güvenilirliklerini sağlamak için çok önemlidir. Bu amaçla, çekme, eğilme, basınç ve aşınma testleri gibi mekanik testlerle dayanım ölçülürken; UV maruziyeti, nem, hızlandırılmış iklim koşullarına maruz kalma, sıcaklık ve kimyasal direnç testleri gibi çevresel testler de malzemenin zorlu koşullara dayanma kabiliyetini tespit etmektedir. Ayrıca mikroskobik analizler, nem geri kazanım testi ve renk haslığı testi gibi ek testler, malzemenin karakterizasyonu hakkında daha fazla bilgi sağlamaktadır. Yalıtım malzemesinin türü, uzun vadeli dayanıklılığa etki eden en önemli faktörlerden biridir. Bu malzemeler genellikle hücreler, gözenekler ve boşluklar içinde rastgele veya düzenli olarak dağılmış gazlar içeren katı bir matris malzemesinden oluşmaktadır (Reignier vd., 2021). Özellikle köpük yalıtım malzemelerinde ısı iletkenlik, hücrelerin inceliği ve dağılımı ile içerdiği gazların türü tarafından belirlenmektedir. Bu malzemeler üretildikten sonra hücrelerde kalan şişirme maddesi zamanla hava ile yer değiştirmektedir. Yaşlanmanın ilk

aşamasında, hücre yapısı içindeki havanın difüzyonu, üfleme gazının difüzyonundan daha hızlı gerçekleşmekte ve bu da termal iletkenliğin hızla azalmasına neden olmaktadır. Zamanla gaz dengesi sağlandığında ısı iletkenlikte çok yavaş bir azalma gözlemlenmektedir (Yarahmadi vd., 2017). Oda sıcaklığına yakın koşullarda, yaşlanma süreci onlarca yıl sürebilir ve bu süre, kullanılan polimer türü ile gaz ve köpük dolgu koşullarına bağlıdır (Bae vd., 2022). Köpük malzemelerde görünür yoğunluğun düşük olması, hücreleri dolduran gazın yüzdesini artıracığından yaşlanmanın etkisi de artmaktadır (Hung Anh & Pásztor, 2021).

VIP'ler için ana yaşlanma mekanizması, nem penetrasyonu ve hava etkisidir. Bu durum, iç basıncın artmasına ve nemin çekirdek yapıya nüfuz etmesine neden olmaktadır. Doğal lif içerikli kompozitler, organik bileşimleri nedeniyle çevresel bozulmaya karşı daha hassastır. Nem, sıcaklık dalgalanmaları, mikrobik etkiler ve radyasyon maruziyeti lif yapısının bozulmasına, dolayısıyla kompozit malzemenin ömrünün kısalmasına neden olabilmektedir (Ouda vd., 2025). Plastik esaslı malzemeler, katran, çatı kaplama keçesi veya yapıştırıcılarda bulunan kimyasal reaktiflere maruz kaldığında bozulabilmektedir. Ayrıca aşırı sıcaklıklar polistiren ve PVC gibi yaygın malzemelerin yumuşama sıcaklığını aşarak deformasyona neden olabilmektedir. Fırtına veya yağmur gibi ani soğuma etkisi, hızlı büzülmeye neden olarak sıva tabakasının çatlamasına ve yüzey ayrılmalarına yol açabilmektedir. Bu koruyucu tabaka zarar gördüğünde, altındaki yalıtım malzemesi çevresel faktörlere açık hale gelmekte ve bozulma hızlanmaktadır. Su buharı geçirgenliği, ısı yalıtım malzemelerinin performansını ve iç ortam koşullarını doğrudan etkilemektedir. Mantar ve mineral yün gibi geçirgenliği yüksek malzemelerde, nemin bina zarfından geçebiliyor olması, iç ortam nemini dengelemeye ve hapsolmuş nemin birikimini önlemeye yardımcı olmaktadır. Ancak XPS ve kapalı hücreli köpük levhalar gibi geçirgenliği düşük yalıtım malzemelerinde nem seviyelerini kontrol etmek, binanın kuru ve sağlıklı kalmasını sağlamak için buhar bariyerleri veya uygun havalandırma sistemleri gibi ek önlemler alınması gerekmektedir. Dayanıklılık, performans açısından önemli bir faktör olmanın yanı sıra yalıtım malzemelerinin çevresel etkisinin değerlendirilmesinde de etkin rol oynamaktadır. Uzun ömürlü ve zaman içinde yalıtım performansını koruyan malzemelerin yenileme sıklığı azalacağından binanın ömrü boyunca atık üretimi ve çevresel maliyetleri de azalacaktır (Klemczak vd., 2024). Sonuç olarak, yalıtım malzemelerinin hizmet ömrü; çevresel koşullar, malzeme özellikleri, tasarım seçimleri ve bakım uygulamalarının karmaşık etkileşimi ile belirlenir. Bu faktörlerin doğru anlaşılması ve dayanıklılık göz önünde bulundurularak malzeme seçimi yapıldığında, bina yalıtım sistemlerinin uzun vadeli performansını sağlamak mümkündür. Gelişmiş, uygun maliyetli, yüksek performanslı yalıtım malzemeleri kullanımı,

binalardaki yalıtım ömrünü uzatmak ve genel sürdürülebilirliğini artırmak için oldukça önemlidir.

### **2.7.13. Yeniden kullanılabilirlik**

Sürdürülebilir yapı tasarımlarının teşvik edilmesinde yalıtım malzemelerinin yaşam döngüsü sonunda çöplüklerde veya yakma fırınlarında bertaraf edilmesi gerekmektedir. Bunun dışında mümkün olan bir başka yaklaşım ise yeniden kullanılabilirliktir. Yalıtım malzemelerinin yeniden kullanılması, atıkları azaltmaya ve kaynakları korumaya yardımcı olan başka bir sürdürülebilir seçenek sunmaktadır. Taş yünü, binada 75 yıl dayanması beklenen sürdürülebilir bir yalıtım malzemesi olsa da büyük hacimlerde taş yünü, bozunma, yenileme veya yıkımlar sebebiyle 20 yılın sonunda atık olarak ortaya çıkmaktadır. Bu durum, mineral yünü atık miktarında ciddi artışlarla sonuçlanmakta, bunun sonucunda gömülü enerjide sistematik ve geri döndürülemez bir kayıp meydana gelmektedir (Väntsi & Kärki, 2014). Özellikle cam yünü ve taş yünü gibi sert yalıtım levhaları kullanım ömrü sonunda çoğunlukla panel formunu koruyarak sökülebilmekte ve diğer projelerde yeniden kullanılabilir. Bu uygulama, atıkları ve çevresel zararı en aza indirmek için malzemelerin mümkün olduğunca uzun süre kullanımda tutulduğu döngüsel ekonomi ilkeleriyle uyumludur. Spesifik bir örnek olarak, düz çatılarda kullanılan taş yününün performans analizleri, malzemenin kuru kaldığı sürece 28 yıl sonra bile yoğunluk ve ısı iletkenlik özelliklerinin korunduğunu ortaya koymaktadır. Bu bağlamda, performans kriterlerini korumaya devam eden eski yalıtım malzemelerinin yeniden kullanımı mümkün olabilmektedir. Geri dönüştürülmüş malzemelerin kullanımı, çöplüklere gönderilen atık miktarını en aza indirmek, çevresel etkileri hafifletmek ve bertarafıyla ilgili masrafları düşürmek gibi çok sayıda fayda sağlamaktadır (Cavagnoli vd., 2024). Mineral yünü gibi bir yalıtım malzemesinin geri dönüşüm süreci, sökülmüş levhaların parçalanması, sıkıştırılması ve tekrar eritilmesi gibi yoğun enerji gerektiren işlemlerden oluşmaktadır. Ayrıca kirlilik durumu geri dönüştürülmüş ürün veriminde ve kalitesinde kısıtlılıklara sebep olmaktadır. Bu ve benzeri durumlar göz önüne alındığında, yeniden kullanım seçeneği her zaman geri dönüşümden daha makul sonuçlar vermektedir. Uygun koşullar oluşturulduğunda yalıtım malzemelerinin yeniden kullanılması, yeni malzeme talebini de azaltarak kaynakları korumakta, üretimle ilişkili enerji tüketimini ve emisyonları azaltmaktadır.

### **2.7.14. Çevresel etkiler**

Yalıtım malzemelerinin çevresel etkileri kullanım amacına, maliyet etkinlik dengesine ve çevresel etki hedeflerine göre farklı ölçütlerde değerlendirilmektedir. Bu bağlamda YDD çalışmaları, malzeme kullanımının sağladığı faydalar ile başlangıçtaki çevresel etkilerin

bütüncül olarak ele alınmasına olanak tanıyarak daha bilinçli malzeme seçilmesini mümkün hale getirmektedir (Klemczak vd., 2024). Cam yünü ve taş yünü gibi mineral bazlı malzemeler üretim aşamasında önemli miktarda enerji gerektirdiğinden bu ürünler sera gazı emisyonlarının artmasına sebep olmaktadır. Ancak bu malzemelerin kullanımıyla ısıtma ve soğutma ihtiyacındaki azalmanın sağladığı enerji tasarrufu, çoğu zaman üretimden kaynaklanan emisyonları uzun vadede telafi edebilmektedir.

Literatürde farklı yalıtım malzemeleri için GWP (Global Warming Potential- Küresel Isınma Potansiyeli) hesaplamaları bulunmaktadır. Örneğin; EPS için hesaplanan GWP değeri yaklaşık 3,69 kgCO<sub>2</sub>eq, yalıtım malzemesi emisyonu ise 249,813 kgCO<sub>2</sub>eq olarak belirtilmiştir (P. M. Cuce & Cuce, 2025). 140 kg/m<sup>3</sup> yoğunluklu mineral yünü için kilogram başına GWP değeri 0,9 kgCO<sub>2</sub>eq, metrekare başına GWP değeri 3,78 kgCO<sub>2</sub>eq olarak hesaplanmıştır (Michalak vd., 2020). Silika aerojellerde ise birim yüzey başına öngörülen GWP değeri 12,5 kgCO<sub>2</sub>eq olarak belirtilmiştir (Thie vd., 2023). Fiberglas, mineral yün, EPS ve poliüretan köpük gibi geleneksel yalıtım malzemeleri, yaygın kullanılmasına rağmen bu malzemelerin tam yaşam döngüsü ciddi çevresel sorunlara sebep olmaktadır. Bu yenilenemeyen malzemelerin geri dönüştürülmesi zor ve ayrışma süreleri oldukça uzundur. Bu nedenle toksik kirleticileri ekosisteme ve besin zincirlerine olumsuz etki etmektedir (Ouda vd., 2025). YDD açısından; EPS, cam yünü ve mineral yünü benzer etki gösterirken, PUR ve XPS en az çevre dostu malzeme olarak tanımlanmaktadır. Bunun yanı sıra çevresel etki bakımından kenevir ve selüloz gibi yenilenebilir malzemelerin XPS, PUR, mantar ve taş yününden daha pozitif etki sunduğu belirtilmiştir (Füchsl vd., 2022). Gelişmiş malzeme olarak nitelendirilen aerojeller ise üretim süreci ve kullanılan sentez malzemelerine bağlı olarak çevresel etki bakımından değişiklik göstermektedir. Yeni nesil malzeme türü olan aerojellerin karbon emisyonlarını yılda metrekare başına 8,169 kg azaltma potansiyeline sahip olduğu ve bu da onu daha çevre dostu hale getirdiği bilinmektedir. Mevcut durumda aerojeller için çevresel etkilerin tamamı laboratuvar sentezi ile ilişkilendirilmektedir. Üretimin endüstriyel anlamda gelişmesi ile bu değer azalacağı öngörülmektedir (Szabó & Lakatos, 2024). Ayrıca aerojellerin son derece hafif olmaları nakliye sırasında harcanan enerji miktarını azaltacağından bu durum daha düşük karbon ayak izi sağlamaktadır. Bu bağlamda aerojellerin geleneksel yalıtım malzemelerine kıyasla daha sürdürülebilir bir alternatif olabileceğini söylemek mümkündür. Yalnızca ekonomik değil, aynı zamanda dayanıklı, çevresel koşullara uygun ve teknik açıdan yeterli bir yalıtım malzemesi seçimi, sürdürülebilir ve etkin bir yalıtım performansının sağlanmasını mümkün kılmaktadır (H. Li vd., 2025). Bu nedenle yalıtım malzemesi seçimi bütüncül olarak ele alınması gereken bir

yaklaşım olmalıdır. Optimum seçimle etkin bir yalıtım performansı elde edilirken aynı zamanda çevresel sürdürülebilirlik ve maliyet etkinliği de sağlamak mümkün olacaktır.

Bir malzemenin ısı yalıtımı amacıyla etkin bir şekilde kullanılabilmesi için öncelikle ısı iletkenliği, birim hacim ağırlığı ve su emme oranı düşük olmalıdır. Dış ortam koşullarına maruz kalacak malzemelerde buhar difüzyon direnci düşük olmalı, iç mekanlarda kullanılacaksa yüksek buhar difüzyon direnci sağlamalıdır. Malzemenin basınç dayanımı kullanılacağı bölgeye ve taşıyacağı yüklere uygun olarak seçilmelidir. Ayrıca yangına karşı direnci yüksek, güvenli ve dayanıklı olması gerekir. Bu özelliklerin yanı sıra düşük maliyet, kolay uygulanabilirlik ve bulunabilirlik gibi kriterleri de sağlaması beklenmektedir. Tüm bu teknik, çevresel ve ekonomik kriterler göz önünde bulundurularak binalarda duvarlar, pencereler, tavan, çatı ve döşemeler ile tesisat hatlarına yönelik ısı yalıtım uygulamaları gerçekleştirilebilmektedir. Böylelikle hem enerji verimliliği artırılmakta hem de yapıların uzun ömürlü ve sürdürülebilir performans sergilemesi sağlanabilmektedir.

## **2.8. Binalarda ısı yalıtım uygulamaları**

Bilindiği gibi enerji verimliliği; bir binanın aynı işlevleri yerine getirirken, verimsiz binalara kıyasla daha az enerji kullanma kabiliyetini ifade etmektedir (Arowoia vd., 2024). Bu bağlamda ısı yalıtımı, sürdürülebilir uygulamalar için bir binanın enerji tüketimini en çok etkileyen faktörler arasında yer almaktadır. Etkin bir ısı yalıtımı, binalarda ısı kaybını önleyerek enerji tüketimini azaltmakta ve iç mekanlarda konforlu sıcaklıkların sağlanmasını mümkün kılmaktadır. Binalardaki ısı ve enerji kaybının %50'sinden fazlası bina zarfından kaynaklanmaktadır (Hagenau & Jradi, 2020). Bir yapının termal, akustik, hava ve ışık geçirgenliği performansını etkileyen; hava, nem, ısı ve ışık geçişini kontrol eden tüm dış sınır yüzeyi bina zarfı olarak tanımlanmaktadır. Geleneksel bina zarfı elemanları; duvarlar, zemin döşemeleri, çatılar, mekanik tesisatlar, kapılar ve pencereler ile ısı köprülerinden oluşmaktadır (Aruta vd., 2025). Yalıtım malzemeleri, yüksek ısı dirence sahip olmaları sebebiyle bina zarfı elemanlardan geçen ısı akışını sınırlandırmakta ve enerji verimliliği sağlamaktadır (Fawaier & Bokor, 2022). Şekil 2.17.'de çeşitli yalıtım uygulaması örnekleri verilmiştir. Şekilde; a) gazbeton kullanımı, b) gevşek dolgu kullanımı ve c) mineral yünü kullanımını temsil etmektedir.



Şekil 2.17. Bodrum ve döşemelerde ısı yalıtım uygulama örnekleri (Ytong, 2026 ve Bysyalıtım, 2026).

Binalarda ısı kayıpları genellikle dış duvar yüzeylerinden, pencerelerden, tavanlardan ve hava sızıntılarından kaynaklanmaktadır. Bu kayıpların boyutu, bina tipi ve yapısal özelliklere göre değişkenlik göstermektedir. Örneğin; tek katlı yapılar, genellikle çatı ve döşeme yüzeylerinden daha fazla ısı kaybederken; çok katlı yapılarda dış cephe duvarları, pencereler ve tesisat hatları ısı kayıpları meydana getirmektedir (Saygın vd., 2025). Ayrıca dış cephe yükünün baskın olduğu yapılarda yalıtım ihtiyacı daha fazladır. Şekil 2.18.'de; bir binanın dıştan yalıtımını temsil eden mantolama uygulamasında a) mineral yünü ve b) XPS kullanımı gösterilmektedir.



Şekil 2.18. Farklı yalıtım malzemeleri kullanılarak gerçekleştirilen mantolama uygulamaları (Hepsiemlak, 2026 ve Mecidoğluyapı, 2026).

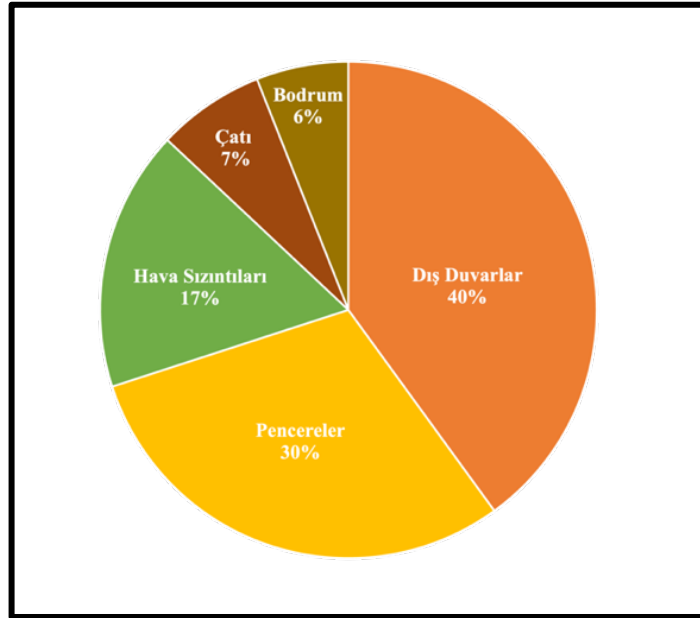
Çatı yalıtımı ise genellikle duvarlar yalıtımından daha önemlidir çünkü yaz aylarında gün boyu doğrudan güneş ışınlarına maruz kalmaktadır. Özellikle sıcak iklimlerde, çatılar ve duvarlar toplam ısı transferinin yaklaşık %60'ını oluşturan ısı kazancını kontrol etmede kritik öneme sahiptir. Yüksek performanslı yalıtım, yansıtıcı kaplamalar ve termal yenileme gibi uygulamalar, soğutma yüklerini ve enerji kullanımını %40'a kadar azaltabilmektedir (Asadi vd., 2012). Bu yöntemler; kış aylarında ısınmak, yaz aylarında da serinlemek için harcanan enerjiyi azaltmayı

ve yaşam alanlarında ısı konfor sağlamayı amaçlamaktadır. Şekil 2.19.'da çatı yalıtımında a) PUR ve b) mineral yünü kullanımı gösterilmektedir.



Şekil 2.19. Farklı yalıtım malzemeleri kullanılarak gerçekleştirilen çatı yalıtımı (Gunogluizolasyon, 2026 ve Elveren, 2026).

Isı yalıtımının etkinliği, yalnızca kullanılan malzemenin teknik özelliklerine değil, aynı zamanda yapı elemanlarına nasıl uygulandığıyla da doğrudan ilişkilidir. Bina kabuğunu oluşturan her yapı elemanı kendine özgü yapısal özelliklere ve birbirinden farklı ısı kaybı potansiyeline sahiptir (Şekil 2.20.). Bu nedenle, her bir yapı elemanı için özel olarak geliştirilen yalıtım çözümleri enerji verimliliğinin sağlanmasına ek olarak iç mekan konforunun korunmasında da etkin rol oynamaktadır.



Şekil 2.20. Yapı bileşenlerine göre ısı kayıplarının dağılım grafiği.

Isı yalıtım uygulamaları ilk yatırım maliyeti açısından yüksek harcama olarak görülse de yapı ömrü boyunca kullanım süresine sahip bir uygulamadır. Ayrıca fosil yakıtların kullanımını azaltması ve dolayısıyla çevre kirliliğinin önüne geçilmesi, enerji tasarrufu, betonarme yapıyı

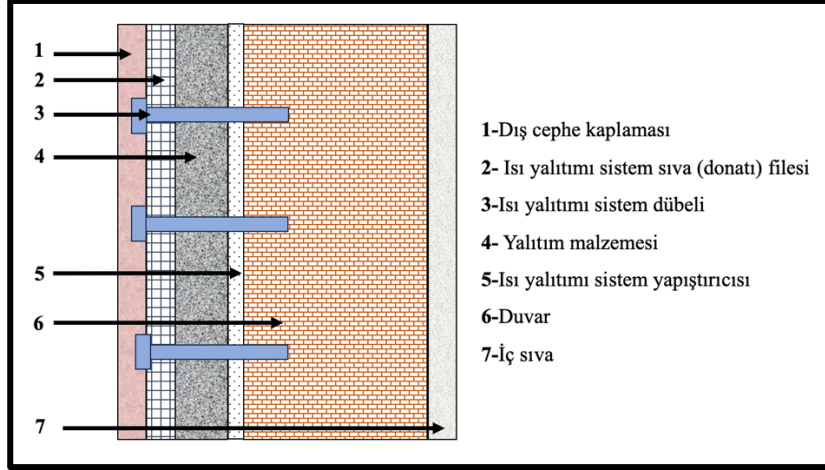
atmosferik koşulların etkisi ile oluşacak hasarlardan koruması gibi olumlu yönleri ile oldukça verimli uygulamalardır (Saygın vd., 2025).

Doğru malzeme seçimi ve kaliteli işçilik ile uygulanmış bir ısı yalıtımı istenen ölçüde enerji verimliliği ve performans sağlayabilmektedir. İklimsel verilerin dikkate alındığı bir mimari tasarımda doğru uygulama ve kaliteli işçilikle yapılmış bir ısı yalıtımı istenmeyen ısı kayıp ve kazançlarını engelleyebilmektedir. Bu noktada, ısı yalıtımında kullanılması planlanan malzemelerin teknik özellikleri ve sergiledikleri performans kriterleri dikkate alınmalıdır (Al-Homoud, 2005). Etkin ısı yalıtımı için doğru malzeme seçimine ek olarak doğru montaj tekniklerinin uygulanması da büyük önem arz etmektedir. Doğru montaj uygulamaları ve ısı yalıtımının etkinliği için hava sızdırmazlık, nem kontrolü ve ısı köprülerinin engellenmesi önemlidir. Bulgular, tek tip bir yalıtım çözümünün olmadığını ortaya koymakta ve çevresel koşullar, ısıtma kaynakları, maliyetler, ekonomik parametreler ve kullanılan malzemeler gibi belirli faktörleri dikkate alan, özel koşullara uyarlanmış yaklaşımların gerekliliğini vurgulamaktadır. Doğru yalıtım uygulamalarının karbon emisyonlarını %90 oranında azaltma ve yıllık ısıtma maliyetlerini yaklaşık %65 oranında düşürme potansiyelinin olduğu tahmin edilmektedir (Saygın vd., 2025). Bu enerji verimliliği iyileştirmeleri hem hane halkları hem de işletmeler için ekonomik ve çevresel açıdan büyük önem arz etmekte, karlılığı ve rekabet gücünü artırmaktadır. Bu nedenle, uygun yalıtım çözümlerini teşvik eden iş birlikleri ve politika girişimlerinin kaynakları etkin kullanarak yeniliği desteklemesi ve uzun vadede sürdürülebilirliğe katkıda bulunması beklenmektedir.

### **2.8.1. Duvarlarda ısı yalıtımı**

Bina zarfı, iç ortamın korunmasında bariyer görevi görmekte ve enerji tasarrufu açısından büyük önem taşımaktadır. Bina kabuğunun en geniş yüzey alanını oluşturan dış duvarlar, binalardaki ısı transferinin en yoğun olduğu yapı elemanlarıdır (Axaopoulos vd., 2015). Bu nedenle, duvarlarda uygulanan yalıtım sistemleri yapının toplam ısı kaybı ve kazancı üzerinde belirleyici rol oynamaktadır. Gün içerisinde güneş ışınları sebebiyle yaşanan ısınma ve gece meydana gelen soğuma, ısı akışının zamanla değişmesine neden olmaktadır. Yalıtım malzemesinin bu geçici ısı akışına karşı gösterdiği performans, malzemenin duvarda hangi konumda bulunduğu ile doğrudan ilişkilidir. Isı geçişinin en yoğun olduğu bölgeler uygun yalıtım malzemesi ile yalıtıldığında ısı kayıp ya da kazancı etkin bir şekilde sınırlandırmaktadır. Binalarda ısı kayıplarının yaklaşık %25-30 kadarı bina dış duvarlarından kaynaklanmaktadır (Lakatos, 2023). Bu nedenle, dış duvarlara uygulanan yalıtım, yapı fiziği yönünden en uygun çözümlerden biri olarak kabul edilmektedir.

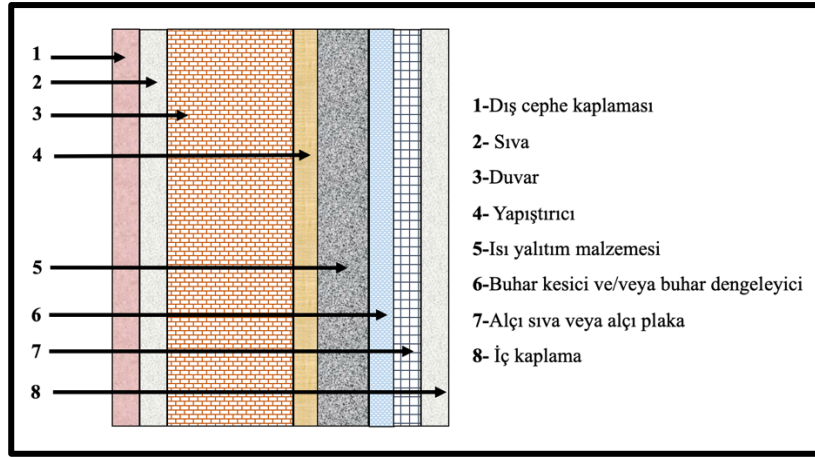
Dış duvarlara; mantolama ile dıştan yalıtım, duvar arası yalıtım ve içten yalıtım uygulanabilmektedir. Dışarıdan yalıtım sistemi, yeni yapılara uygulanabileceği gibi, mevcut binalara da kolayca uygulanabilmektedir. Şekil 2.21.'de örnek bir dış cephe yalıtım katmanı verilmiştir.



Şekil 2.21. Dış duvar yalıtım uygulaması.

Özellikle eski binalarda sonradan uygulanan duvar yalıtımı, binayı bir manto gibi dışardan sararak duvar kesitinde yoğuşmayı ortadan kaldırmakta, ısı köprülerinin oluşumunu engellemekte ve aynı zamanda binayı dış etkilere karşı korumaktadır. Bu sayede ısıl değişimlerin neden olduğu gerilme ve çatlak oluşumları engellenmektedir (Al-Homoud, 2005). Mineral yünü kullanılarak yapılmış mantolamada, malzeme binayı yangına karşı korumaktadır. Uygulama ısı yalıtımı amacıyla gerçekleşse de aynı zamanda belli seviyeye kadar ses yalıtımı da sağlanmaktadır. Dış duvarlarda yaygın olarak tercih edilen bir diğer sistem ise havalandırmalı dış duvar yalıtımı, diğer adıyla giydirme cephe sistemidir. Bu sistemde, yapının mevcut duvar yüzeyine uygulanan ısı yalıtım malzemesi ile dış cephe kaplaması arasında hava boşluğu bırakılmaktadır. Bu uygulama, özellikle iş merkezleri ve çok katlı konut yapılarında sıklıkla tercih edilmekte ve yoğuşmayı engellemek amacıyla tasarlanmaktadır (P. M. Cuce & Cuce, 2025).

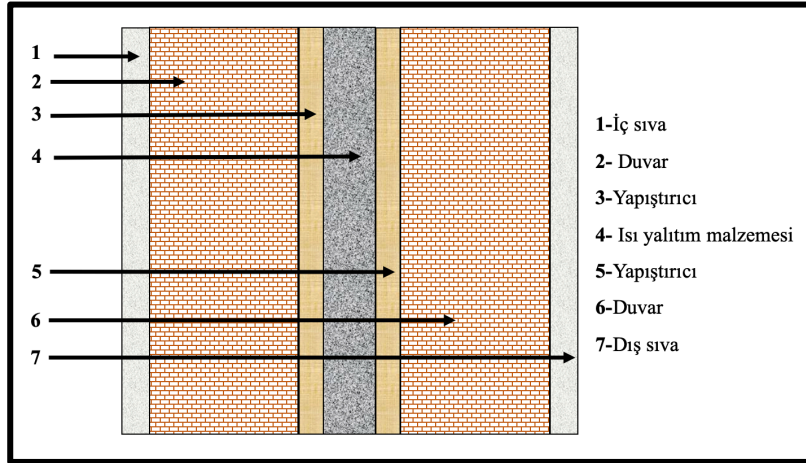
İç duvar yalıtımı da günümüzde konutlarda sıklıkla uygulanan bir sistemdir. Dış duvar yalıtımı olmayan binalarda bireysel tercihe bağlı olarak uygulanabilmektedir. İçten yalıtım uygulaması dış duvar yalıtımına benzer şekilde gerçekleştirilmektedir. Uygulamalarda döşemelerin, kolon, kiriş ve perdelerin dış duvara bağlandığı kısımlarda meydana gelen ısı köprülerini ortadan kaldıracak önlemlerin alınması gerekmektedir (Şekil 2.22.).



Şekil 2.22. İç duvar yalıtım uygulaması.

Dış duvar yalıtımında uygulama tekniğinin zor ve maliyetli olması gibi olumsuzluklar, içten yalıtımda söz konusu değildir. Özellikle kısa süreli ısıtılan yapılarda avantajlı bir uygulamadır. Uygulama; bina dış görünüşünü değiştirmez, iskele kurulmaya ihtiyaç duyulmaz ve uygulama esnasında dış koşulların etkisi önemsizdir. Ayrıca dış duvar yalıtımından daha ekonomiktir.

Bir diğer yöntem olan sandviç yalıtım, yani duvar arası yalıtım ise ekonomikliği ve uzun ömürlü performansı nedeniyle tercih edilmektedir (Şekil 2.23.).



Şekil 2.23. Sandviç duvar yalıtım uygulaması.

Çift duvar arası yalıtımda iki duvar arasına EPS, XPS gibi sert köpük levhalar yerleştirilerek yalıtım sağlanmaktadır. Kolay uygulanan bir yöntemdir. Sandviç duvarda kullanılan yalıtım levhaları, yapı ömrü boyunca yalıtım işlevini devam ettirebilmektedir. Dış cephe mimarisini etkilemeyen bu yöntem genellikle sanayi alanında tercih edilmektedir. Ancak bu yöntemde uygun detaylar sağlanmazsa yoğuşma ve ısı köprüsü oluşabilmektedir (Y. Chen vd., 2025).

Pratikte; uygulama kolaylığı ve yapısal sınırlamalar sebebiyle yalıtım malzemeleri çoğunlukla duvar boşluklarının içine veya boşluklar arasına battaniye, rulo veya spreycöpük şeklinde yerleştirilmektedir. Bu tür uygulamalar, termal performans açısından dıştan yalıtım kadar etkili olmasa da uygulama kolaylığı nedeniyle yaygın olarak kullanılmaktadır. Binalarda enerji performansının iyileştirilmesinde dışarıdan yalıtım en iyi çözüm olmakla birlikte, bazı durumlarda içten yalıtım tek uygulanabilir seçenek olabilmektedir. Her iki durumda da mevcut yapının ve taşıyıcı sistemlerin işlevsel gereksinimleri ile teknik özelliklerine uygun malzemeler seçilmelidir.

### 2.8.2. Çatılarda ısı yalıtımı

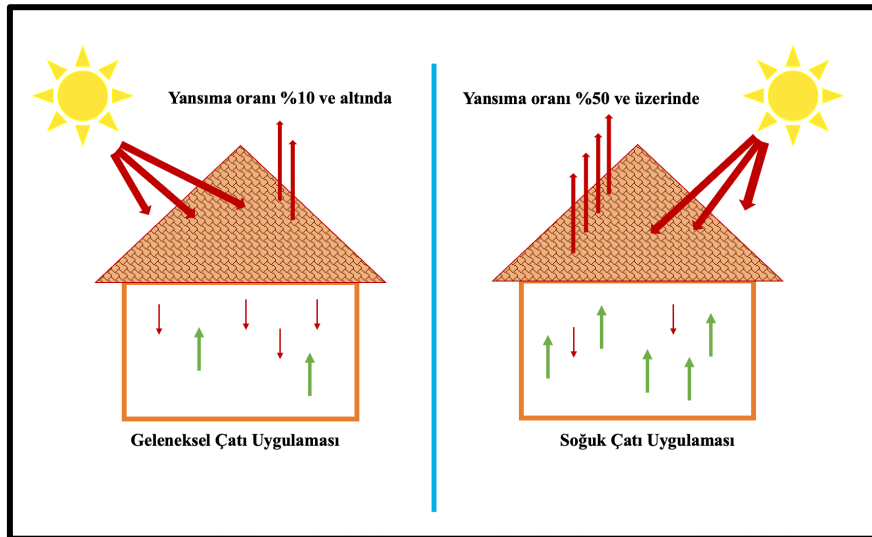
Çatılar; duvarlar ve pencerelerden sonra binalarda en fazla ısı kaybı ve kazancına neden olan yapı elemanlarıdır. Çatıların enerji tüketimi üzerindeki etkisi fazla olduğundan, çatı yalıtımında kullanılan kaplama çözümleri enerji verimliliğinde etkin rol oynar. Yapının yatay yüzey alanının %32'sine kadarını oluşturabilen çatılar, gün boyunca doğrudan güneş ışınlarına maruz kaldıkları için önemli ölçüde radyatif ısı kazancına sebep olmaktadır (P. F. Rocha vd., 2023). Bu durum, özellikle yaz aylarında iç mekanda aşırı ısınmalara neden olarak soğutma ihtiyacını artırmaktadır. Isı yalıtımı, çatının kullanım amacına ve tipine göre değişkenlik göstermektedir. Isıtılmayan çatılar, teraslar ve kullanılan çatı sistemlerinde farklı detay uygulamaları ve yalıtım çözümleri uygulanmaktadır. Çatılarda uygulama sırasında yalıtım malzemeleri döşemenin üstüne, altına veya asma tavanın üstüne yerleştirilebilmektedir. Bu amaçla, çatı ve döşemelerde ihtiyaca göre tasarlanmış, farklı detaylar için çeşitli ısı yalıtım malzemeleri tercih edilmektedir (Al-Homoud, 2005).

Çatılarda ısı transferini azaltmak için başlıca iki temel yöntem kullanılmaktadır. Bunlar; termal kütle yalıtımı ve yansıtıcı yalıtım sistemleridir. Termal kütle yalıtımında beton veya tuğla gibi yüksek ısı kapasitesine sahip yapı malzemeleri kullanılmaktadır. Bu malzemeler ısıyı emerek depolar, ısı akışını geciktirir ve böylece iç mekan sıcaklık dalgalanmalarını azaltır. Aynı zamanda, gecikmeli ısı transferi sağlayarak ısı yalıtım vazifesi yapar. Bu yöntem; çatılarda kullanımına ek olarak duvarlarda, zeminde ve yapı çekirdeğinde uygulanabilmektedir.

Çatı yalıtım kaplamalarının etkinliği; bina geometrisi, konumu ve iklim koşulları gibi faktörlere bağlı olarak değişmektedir. Mevcut çalışmalar, çatı kaplaması ve dış duvar yalıtımının birlikte kullanılmasıyla, ısıtma yakıt tüketiminde yaklaşık %37 ve soğutma sistemleri için elektrik enerjisinde %51'in üzerinde tasarruf sağlamanın mümkün olduğu ortaya koymaktadır. Kaplama uygulamasının geri ödeme süresi ise 20 yıl olarak tespit edilmiştir (Venturelli vd., 2023). Yansıtıcı yalıtım ise düşük emicilik ve yüksek yansıtıcılık özelliği gösteren malzemelerin

kullanımı ile mümkündür (Ashhar & Lim, 2020). Özellikle alüminyum folyo kaplı levhalar güneşten gelen termal radyasyonu kaynağa geri yansıtarak yapının ısı kazanımını azaltmaktadır. Bu malzemeler çatı boşlukları, çatı arası yüzeyler ve dış cephe kaplamalarında uygulanabilmektedir. Yansıtıcı yalıtım, ısıtma gereksiniminin daha elzem olduğu soğuk iklimlerde ekonomik açıdan verimli değildir. Ayrıca yansıtıcı yalıtım kullanımı nedeniyle kış aylarında güneşten gelen ısının azalması, çatı ve tavan arasının daha serin tutulması sonucu altındaki ısıtılmış alanlardan daha fazla ısı kaybı meydana gelmektedir. Bu nedenle bu tür iklimlerde yansıtıcı yalıtım kullanmak yerine yüksek seviyede ısı yalıtımı kullanmak daha uygun maliyetli bir çözümdür (Ghazwani vd., 2025).

Kaplamalara ek olarak; güneş yansıtıcı yüzeyler özellikle yalıtımı yetersiz eski binalarda enerji iyileştirmede ekonomik ve etkili bir yöntem olarak kullanılmaktadır. Ancak yansıtıcı yüzey kaplamalarının verimliliği zamanla kademeli olarak azalmakta ve özelleştirilmiş çözümlere ihtiyaç duyulmaktadır. Çatı yalıtım uygulamaları arasında son yıllarda yaygınlaşan bir diğer yöntem ise serin çatılardır. Çözücü bazlı veya akrilik esaslı serin çatı boya ile yapılan uygulamalar güneş ışığını yansıtarak ısı kazanımını ve kaybını azaltırken çatı ömrünü de uzatmaktadır. Bu tür boya uygulamaları ile çatı yüzey sıcaklığı önemli ölçüde azaltılırken aynı zamanda çatı kaplamasının yapı ömrü de uzamaktadır (Koşny vd., 2020). Şekil 2.24.'te (Sedaghat vd., 2023) kaynağından değiştirilerek yeniden çizilen geleneksel çatı ve soğuk çatı uygulaması verilmiştir.



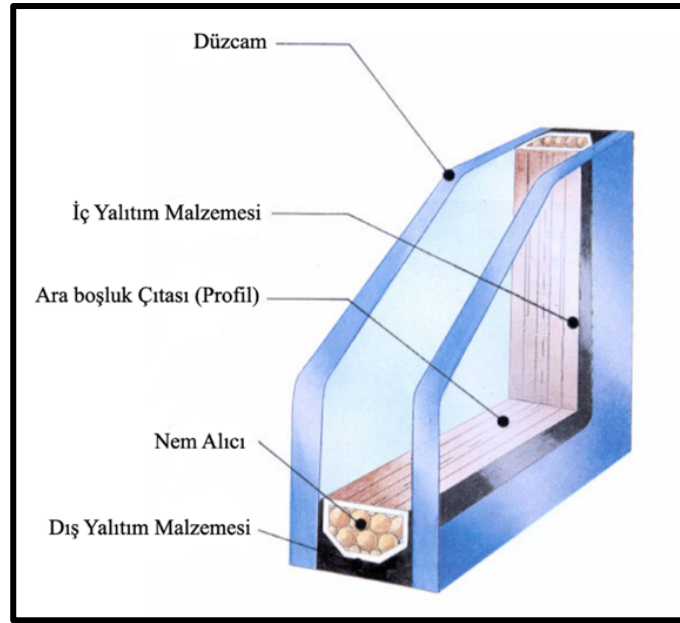
Şekil 2.24. Geleneksel çatı ve soğuk çatıların yansıtma özelliği.

Uygulama koşullarında geleneksel koyu çatılar, güneşten gelen ısının %90'ından fazlasını emerek yüzey sıcaklığının 66 °C'nin üzerine çıkmasına sebep olurken, serin çatılar bu enerjinin %50'den daha azını emerek çatı sıcaklığını 38 °C'nin altında tutabilmektedir. Bu

durumda yaz aylarında soğutma amaçlı klima kullanımı azalacağından enerji verimliliğinin artması da mümkün olmaktadır (Sedaghat vd., 2023).

### 2.8.3. Pencereerde ısı yalıtımı

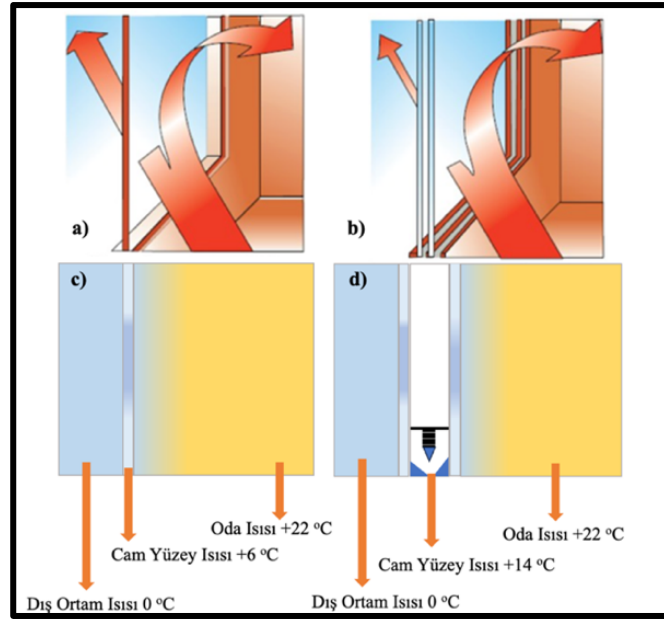
Pencereler, toplam ısı kaybının yaklaşık %15'inden sorumludur (Rashidi vd., 2018). İyi yalıtılmış binalarda pencereler, ısı kayıp ve kazançları bakımından oldukça kritik öneme sahip elemanlardır. Şeffaf yüzeyleri sayesinde güneş ışınlarını geçirerek iç mekanda ısı kazancı sağlarlar ancak çevresel etmenlere açık olduklarından ısı kayıpları da fazladır. Yüksek performanslı sistemler ve uygun yalıtım çözümleri ile pencerelerden kaynaklanan ısı transferi minimize edilebilmektedir (Şekil 2.25.).



Şekil 2.25. Yalıtım camı kesiti (İzoder, 2026).

Son yirmi yılda pencere yalıtımı gibi uygulamaları, birçok ülkede yapıların standart enerji koruma önlemleri arasında yerini almaktadır. Pencere bileşenlerinde yapılan iyileştirmeler, düşük emisyonlu kaplamalar, argon gazlı boşluklar ve termal kırılma çerçeveler binalarda enerji performansını artırarak enerji verimliliğine katkı sunmaktadır (Aruta vd., 2025).

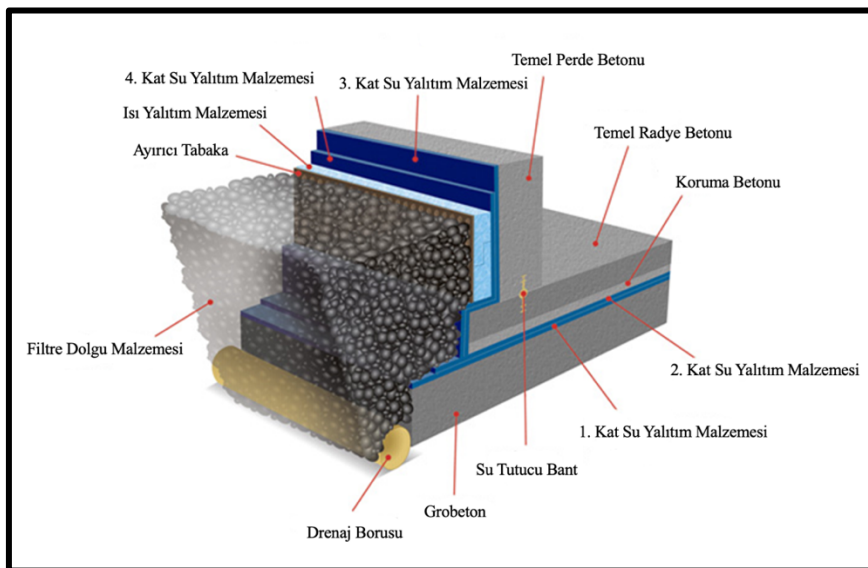
Ayrıca pencere koruması ve sızıntı yönetimi gibi önlemler çift cam, gölgeleme cihazları ve uygun sızdırmazlık gibi uygulamalarla birleştirildiğinde enerji verimliliği daha da artarak enerji talebinde %20'ye kadar azalma sağlanabilmektedir (Aziz vd., 2012) (Şekil 2.26.).



Şekil 2.26. Tek camlı pencere sistemi (a, c) ve çift camlı pencere sistemi (b, d) (Gursanglass, 2026).

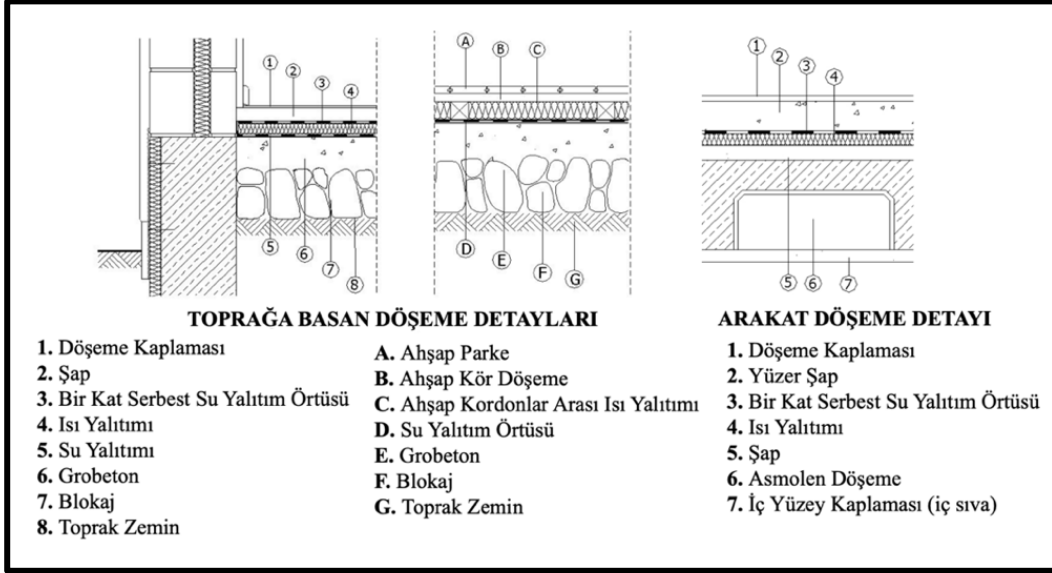
#### 2.8.4. Zeminde ısı yalıtımı

Isıtılmayan temel çevresi ve beton zeminlerin yalıtımı, enerji verimliliği ve ısı kaybını önlemek açısından önemlidir. Yalıtım uygulaması genellikle temel levhasının çevresine yerleştirilmektedir. Ancak dış ortamla teması olmayışı ve toprağa temas etmeleri sebebiyle bodrum katlardaki zemine uygulanan yalıtım etkisi yetersizdir (Aditya vd., 2017). Bu sebeple yalıtım uygulamasında dış çevre ile doğrudan teması olan yapı elemanlarının yalıtımına öncelik verilmesi daha uygun bir yaklaşım olacaktır. Şekil 2.27.'de bir yapının temelinde uygulanan yalıtımın tüm katmanları detaylandırılmıştır.



Şekil 2.27. Yapı temellerinde yalıtım uygulaması kesiti (Cevikizolasyon, 2026).

Bodrum ve temelerde nem birikimini önlemek amacıyla uygun drenaj sağlanmalıdır. Zemin döşemelerinde ısı kaybının azaltılması için kirişlerin arasına battaniye veya rulo formunda yalıtım malzemeleri yerleştirilmektedir. Beton zeminde döşeme altına ya da temel duvarının dış yüzeyine sert köpük levhalar uygulanmaktadır. Tavan ve döşemeler de çatılar gibi ısı yalıtımı yapılabilecek alanlardır. Şekil 2.28.'de bir yapının toprağa basan döşemeleri ve arakat döşeme detaylarında yalıtımın nasıl uygulandığı detaylandırılmıştır.

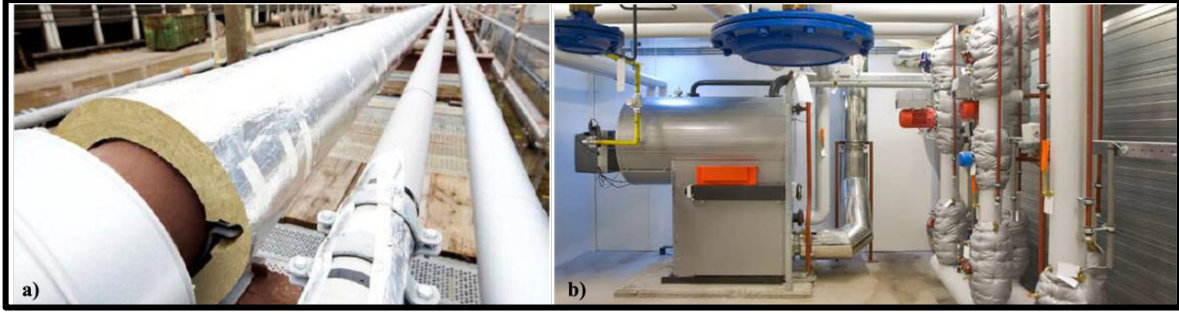


Şekil 2.28. Toprağa basan döşeme ve arakat döşemelerde yalıtım uygulaması (İzoder, 2026).

Isı kaybeden tavanlar için çatının kullanım durumu, eğimi, konstrüksiyonu dikkate alınması gerekirken döşemelerde ise uygulama yapılan döşeme türü ve malzemelerin yük taşıma kapasitesi gibi faktörler göz önüne alınarak ısı yalıtımı uygulanmalıdır.

### 2.8.5. Tesisatlarda ısı yalıtımı

Binaların ısıtma ve soğutma ihtiyacını karşılamaya yönelik kullanılan mekanik tesisatlarda gerçekleştirilen yalıtım uygulamaları, yüksek enerji verimliliği sağlamaktadır. Vanalar, borular, depolar ve tanklar gibi tesisat elemanları kullanım amacına uygun nitelikte yalıtım malzemeleri ile kaplandığında hem sistem performansı artırılabilecek hem de işletme sisteminde güvenlik sağlanmış olacaktır (D. Huo vd., 2025). Şekil 2.29.'da su boruları ve tesisatlarda uygulanan yalıtım örnekleri verilmiştir.



**Şekil 2.29.** Su boruları (a) ve tesisatlarda yalıtım uygulamaları (b) (İzoteknik, 2026 ve Ihouses, 2026).

Tesisatlarda standartlara uygun şekilde gerçekleştirilen ısı yalıtımı, özellikle soğuk iklim koşullarında suyun donmasını önleyerek sistem bütünlüğünü korumakta, ayrıca buhar ve sıcak su tesisatlarında yüksek sıcaklıklı yüzeylerin yalıtımı yoluyla kazaların önlenmesine katkıda bulunmaktadır. Buna ek olarak, yalıtım sayesinde kazan dairesinde ortaya çıkan yüksek sıcaklıkların çevredeki diğer sistemleri olumsuz etkilemesi ve ısı köprülerinin oluşumu engellenecektir (C. Lou vd., 2025). Binalarda ısıtılmayan veya soğutulmasına gerek duyulmayan bölgelerden geçen tesisat elemanları, vanalar veya armatürler uygun kalınlıkta ve kriterlerdeki malzeme ile yalıtılmalıdır. Tesisat yalıtımında yanmazlık özelliğiyle ön plana çıkan cam yünü, esnek elastomerik kauçuklar köpükler, polietilen köpük ve cam köpüğü yaygın kullanılmaktadır. Bu bağlamda, tesisatlarda gerçekleştirilen yalıtım uygulamaları, enerji tasarrufuna ve sürdürülebilir bina performansına büyük ölçüde katkı sağlamaktadır (Akhmetova vd., 2025).

#### **2.8.6. Isı yalıtım malzemelerinin ekonomik açıdan değerlendirilmesi**

Geleneksel yalıtım malzemeleri; düşük ilk yatırım maliyetleri ve yaygın bulunabilir olmaları nedeniyle inşaat sektöründe en çok tercih edilen ürünlerdendir. Bununla birlikte, başlangıç maliyeti yüksek olan alternatiflerine oranla kullanımları sınırlanabilmektedir. Bunun nedeni, bazı yalıtım malzemelerinin kullanım ömrü boyunca sağladıkları yüksek enerji tasarrufunun, ilk yatırım maliyetini hızlıca telafi etmesidir. Uygun malzeme seçimi ve doğru yalıtım uygulamaları, binaların enerji verimliliğini artırarak işletme giderlerinin azaltılmasına, dolayısıyla ekonomik fayda sağlanmasına olanak tanımaktadır. Bu malzemelerden EPS, piyasa koşullarında ilk yatırım maliyeti en düşük yalıtım malzemesi olup geri ödeme süresinin kısa olmasıyla öne çıkmaktadır. Kullanım ömrü ortalama 30 yıl kadar olup bakım gereksinimleri düşüktür. Yangın dayanımı sınırlı olması nedeniyle ilave güvenlik önlemlerine ihtiyaç duyulacağından, toplam maliyetleri artabilmektedir (Bae vd., 2022). XPS ise EPS'ye kıyasla daha yüksek maliyetli olup su emme oranı düşük olduğundan suyla temas eden ortamlarda uzun vadeli ekonomik avantaj sağlamaktadır. Taş yünü ve cam yünü, EPS ve XPS'ye oranla daha yüksek ilk yatırım maliyetine sahip olsa da yangın dayanımı ve akustik performansı sayesinde

ekonomik açıdan rasyonel çözüm olarak değerlendirilmektedir. Özellikle yüksek katlı yapılarda, doğru detaylandırılması durumunda en düşük maliyetli çözüm niteliğindedir (Tang vd., 2025).

PUR/PIR, ısı iletkenlikleri düşük olması sebebiyle daha ince kalınlıklarla hedef ısı geçirgenlik katsayısına ulaşılması mümkün olup ekonomik avantaj sağlayabilmektedir. Ancak ilk yatırım maliyeti bakımından EPS ve XPS'ye göre belirgin bir oranda yüksektir. Hizmet ömrü yaklaşık 25 yıl olup yenileme maliyeti ortaya çıkabilmektedir (Torres-Regalado vd., 2025).

Fenolik köpük, PUR/PIR'a benzer olmakla birlikte ona kıyasla daha iyi yangın performansı sergilemektedir. Hizmet ömrü ortalama 25 yıl olup yenileme ihtiyacı söz konusu olmaktadır. Ekonomik açıdan değerlendirildiğinde EPS veya XPS kadar avantajlı olmadığı düşünülebilmektedir (Tingley vd., 2017).

Kompozit yalıtım malzemeleri yüksek maliyetli olup; yüksek performanslı malzemelerle, sürdürülebilir ve ekonomik malzemelerin birleştirilmesiyle elde edilmektedir. Bunun yanında, kompozit yalıtım malzemeleri atık yönetimiyle bütünleşmiş bir yaklaşımla ele alındığında döngüsel ekonomi hedeflerine direkt olarak katkı sunmaktadır.

Son yıllarda geliştirilen selüloz, odun lifi, mantar ve kenevir gibi biyo-bazlı yalıtım malzemeleri yenilenebilir kaynaklardan elde edildiklerinden uzun vadede enerji tasarrufu ve düşük karbon emisyonu sayesinde ekonomik olarak daha avantajlı hale gelmektedir. Ancak literatür çalışmalarına göre biyo-kompozitlerden elde edilen yalıtım malzemelerinin maliyeti, günümüzde yaygın kullanılan yalıtım malzemelerine göre halen yüksektir (J. Zhao & Li, 2022).

Malzemelerin yüksek maliyetlerin sebebi deneysel araştırmalar için laboratuvar ortamında, küçük ölçekte üretilmeleridir. Literatürde biyo-bazlı aerojellerin üretim maliyetlerinin 20-30 US\$/m<sup>2</sup> seviyelerinde olduğu belirtilmiştir. EPS ve mineral yünü ile karşılaştırıldığında (5-10 US\$/m<sup>2</sup>) oldukça yüksek olduğu anlaşılmaktadır. Ayrıca bazı polimer esaslı yalıtım malzemelerinin maliyetleri; polipropilen için 1,32 US\$/m<sup>2</sup>, polivinil klorür için 0,97 US\$/m<sup>2</sup> ve polistiren için 1,44 US\$/m<sup>2</sup> olarak belirtilmiştir (Sergi vd., 2024). Aerojeller gibi ileri teknoloji yalıtım malzemelerinin maliyetlerinin yüksek olması ve üretim süreçlerinin karmaşıklığı, ticarileşmesini ve daha ekonomik alternatiflerinin tercih edilmesini zorunlu kılmaktadır. Aerojel üretimi için özellikle yüksek enerji gerektiren ve üretim güvenliği bakımından risk oluşturan işlemlere çeşitli alternatiflerin geliştirilmesi gerekmektedir. Son yıllarda yapılan çalışmalar, üretimde karşılaşılan bu kısıtlılığı ortadan kaldırmak için daha basit üretim süreçleri ve düşük maliyetli aerojel türleri üzerinde yoğunlaşmaktadır (Y. Zhang vd., 2025).

VIP'lar mevcut yalıtım malzemeleri arasında oldukça düşük ısı iletkenlik katsayısına sahiptir. Ancak üretim maliyetlerinin yüksek ve mekanik dayanımlarının düşük olması nedeniyle ilk yatırım maliyetleri oldukça fazladır. Ortalama ömürleri 25 yıl olup Yaşam Döngüsü Maliyeti (YDMA) (Life Cycle Cost-LCC) değerlendirmesinde mevcut maliyete yenileme maliyeti de eklenmelidir. Bununla birlikte, net kullanım alanının korunmasının ekonomik açıdan önemli olduğu kentsel projelerde avantaj olabilmektedir (Resalati vd., 2021).

Malzeme maliyetleri; üretim, nakliye ve uygulama sırasında gerçekleştirilen harcamaların bütününden meydana gelmektedir. Buna ek olarak, yalıtım malzemelerinin uzun vadeli ekonomik katkıları, bakım ve yenileme masrafları ile hizmet ömrü boyunca sağladıkları enerji tasarrufları dikkate alınarak YDMA bakımından kapsamlı bir değerlendirmeye tabi tutulmalıdır. YDMA yaklaşımı, yüksek ilk yatırım maliyetine sahip bazı malzemelerin uzun vadeli enerji tasarrufları sayesinde yatırım açısından avantaj sağlayabileceğini ortaya koymaktadır. Böylelikle sektör temsilcilerinin yeşil bina sertifikalarına uyumlanmasını kolaylaştırmaktadır (Moura vd., 2025). Yalıtım sistemlerinin ekonomik analizinde malzeme kalınlığı belirleyici rol oynamaktadır. Bu bağlamda; optimum yalıtım kalınlığı kavramı, toplam yaşam döngüsü maliyetini en düşük seviyede tutan noktayı ifade etmektedir. Yalıtım kalınlığının artması, kurulum maliyetini artırıp, enerji giderlerini azaltırken optimum kalınlığın aşılması toplam maliyetleri artırmaktadır. Bu nedenle, optimum yalıtım kalınlıklarının belirlenmesinde YDMA gibi finansal analiz yöntemlerine başvurulmaktadır (Akan, 2021). Sonuç olarak, ısı yalıtım malzemelerinin ekonomik olarak değerlendirilmesi çok boyutlu bir yaklaşımı gerektirmektedir. Bu nedenle yalıtım malzemesi seçiminin; proje türüne, kullanım koşullarına ve sürdürülebilirlik hedeflerine göre stratejik bir biçimde yapılması, ekonomik ve çevresel açıdan en makul sonucu verecektir.

### **2.8.7. Isı yalıtım uygulamalarında karşılaşılan güçlükler**

Enerjinin verimli kullanımı; iklim değişikliğiyle küresel mücadelede, enerji güvenliğinin artırılmasında ve sürdürülebilir ekonomik büyümenin teşvik edilmesinde hayati önem taşımaktadır. Bu hedefe ulaşmada hükümetler, şirketler ve sivil topluluklar gibi çeşitli paydaşları içeren çok boyutlu stratejilere ihtiyaç vardır (Bera vd., 2025). Isı yalıtımı, enerji verimli stratejilerin temel taşlarından biri olup binalarda enerji tüketiminin azaltılmasında önemli rol oynamaktadır. Ancak bu uygulamaların hayata geçirilmesi sırasında birtakım güçlüklerle karşılaşılmaktadır. Binalarda kullanılan enerji verimli teknolojiler; ısıtma ve soğutma ihtiyacını azaltmakta, sıcaklık kontrolünü iyileştirmekte ve yüksek enerji tüketimini engellemektedir. Bina sakinleri; yüksek ilk yatırım maliyetleri, sınırlı farkındalık ve tutarsız politika uygulamaları gibi nedenlerle enerji verimli teknolojilerin uygulanmasında çeşitli

zorluklar yaşamaktadır. Konutlarda enerji verimliliği teknolojilerinin başarılı bir şekilde hayata geçirilmesi ve sürdürülebilmesi için finansal süreçleri, teknik kapasite geliştirmeyi ve standartlaştırılmış düzenlemeleri aynı anda ele alan entegre bir strateji esastır. Bu sorunlara ek olarak, çoğu eski binalar enerji verimli sistemlerin entegre edilmesine engel olmakta, bu binaların iyileştirilmesi için nitelikli profesyoneller tarafından yenileme gerekmektedir (Bruck vd., 2022).

Küresel senaryolarla karşılaştırıldığında; Türkiye’de sosyal, ekonomik ve politik anlamda iç içe geçmiş karmaşık bir etkileşim gözlenmektedir. Bu bağlamda, enerji verimli dönüşümünün önündeki yapısal engeller arasında; düzenleyici çerçeveler, finansal kısıtlamalar, teknolojik engeller ve sosyokültürel faktörler yer almaktadır (Mollo & Chomey, 2025). Yenilenebilir teknolojiye yapılan yatırımlar, piyasa koşullarındaki değişkenlikler ve belirsizlik ortamı; paydaşların yatırım yapma tercihini kısıtlamaktadır. Buna ek olarak kültürel anlamda enerji kullanımına ilişkin yerleşik uygulamalar da sürdürülebilir tercihlerin benimsenmesini yavaşlatmaktadır. Bu konudaki eksikliklerin giderilmesi için kamusal ve toplumsal anlamda yüksek katılımlı eğitimlerin planlanması faydalı olacaktır (Chmutina & Goodier, 2013).

Yenilenebilir enerji ve enerji verimliliği politikalarının, 2035 yılına kadar yenilenebilir kaynakların payının %65'e çıkarabileceği ve karbon emisyonlarını %50 oranında azaltacağı beklenmektedir. Yenilenebilir enerji tesislerinin artması ve fosil yakıtlı santrallerin kapatılması, azot oksit ve partikül madde emisyonlarını önemli ölçüde azaltarak hava kalitesinde belirgin bir iyileşme sağlayacaktır (Akiner, 2025). Enerji verimliliği yatırımları ve yenilenebilir kaynaklara geçiş, çevre ve insan sağlığı açısından sağlayacağı yararları ek olarak enerji tüketim maliyetlerinde de önemli ölçüde azalma sağlayacaktır. Bunun sonucunda hem ulusal düzeyde hem de bireysel harcamalarda tasarruf sağlanabilmektedir. Tüm bunlara ek olarak sürdürülebilir enerjiye geçiş ile Türkiye, ulusal ve küresel enerji piyasalarında daha güçlü hale gelebilecektir. Enerji dönüşüm stratejileri; ulusal kalkınma hedefleri, iklim değişikliği ile mücadele ve düşük karbonlu çevrenin oluşturulması açısından kritik öneme sahiptir. Türkiye'nin yenilenebilir enerji yatırımlarındaki artış ve enerji verimliliğine verdiği destek, uzun vadede çevresel ve ekonomik kazançlar sağlayacaktır.

## **2.9. Nano malzemeler ve aerojel sistemleri**

Nanoteknoloji; maddenin atomik veya moleküler düzeyde kontrol edilmesi, şekillendirilmesi ve uygulanmasına olanak tanıyan yeni nesil yaklaşımdır. Bu yaklaşımın bir ürünü olan nano malzemelerin yüzey enerjisi, yüksek yüzey/hacim oranı ve kuantum etkileri nedeniyle fiziksel, kimyasal ve optik özellikleri benzersizdir. Bu özellikleri onlara geniş

kullanım alanlarında uygulama potansiyeli sağlamaktadır (Bozsaky, 2016). Yapısal özelliklerine ve bileşimine göre; nano parçacıklar, metal oksit nano malzemeler, karbon nano tüpler, nano filmler, nano fiberler, kompozit ve hibrit nano malzemeler şeklinde sınıflandırılmaktadır. Nanoteknolojinin temel hedefleri; daha az maliyet ve enerji tüketimiyle daha fonksiyonel malzeme üretimi, malzemelerin fiziksel ve kimyasal etkenlere karşı dayanıklılık performanslarını iyileştirmek, bakım onarım masraflarında tasarruf edilmesini ve kolay taşınabilir malzemelerin üretilmesini sağlamaktır (Meng & Yuan, 2021).

### 2.9.1. Nano malzemelerin tanımı ve özellikleri

“Nano” terimi, Yunanca “nanos” (cüce) kelimesinden türetilmiş olup çok küçük nesnelere tanımlayan bir ifadedir (Mekuye & Abera, 2023). Uluslararası Birim Sisteminde (SI) ise “nano” ön eki, bir birimin milyarda birini belirtmek için kullanılmaktadır. Bu kavram, çeşitli alanlarda giderek artan bir şekilde kullanılmaya başlanmış ve günümüzde modern bilimin büyük bir kısmında popüler hale gelmiştir. Nano parçacıkların temel tanımlayıcı özelliği, 1 ila 100 nm arasındaki boyutlarıdır (C. S. C. Santos vd., 2015).

Nano malzeme terimi ilk olarak 1959’da Kaliforniya Teknoloji Üniversitesi’nde yaptığı bir konuşmada Richard Feynman’ın atomları tek tek ayırmak ve kontrol etmekten bahsetmesi ile gündeme gelmiştir. Bilim dünyasında bir devrin açılmasını sağlayan bu konuşma, 1974’te Norio Taniguchi’nin ‘nanoteknoloji’ tanımını yapması ile daha da dikkat çekmiştir. Nano malzemeler en az bir boyutu 1-100 nm ( $1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$ ) olan malzemelere verilen genel bir tanımlamadır. Aynı malzemenin mikro veya makro ölçekteki nitelikleri nano ölçeğe indirildiğinde birçok değişikliğe uğramaktadır. Endüstriyel sektörlerin neredeyse tamamında; tıp ve sağlık alanında, malzeme bilimi ve uygulamalarından askeri alana, enerji sistemlerinden bilimsel araştırmaların birçoğunu kapsayacak kadar oldukça geniş bir araştırma ve uygulama alanına sahiptir (Balaji vd., 2022).

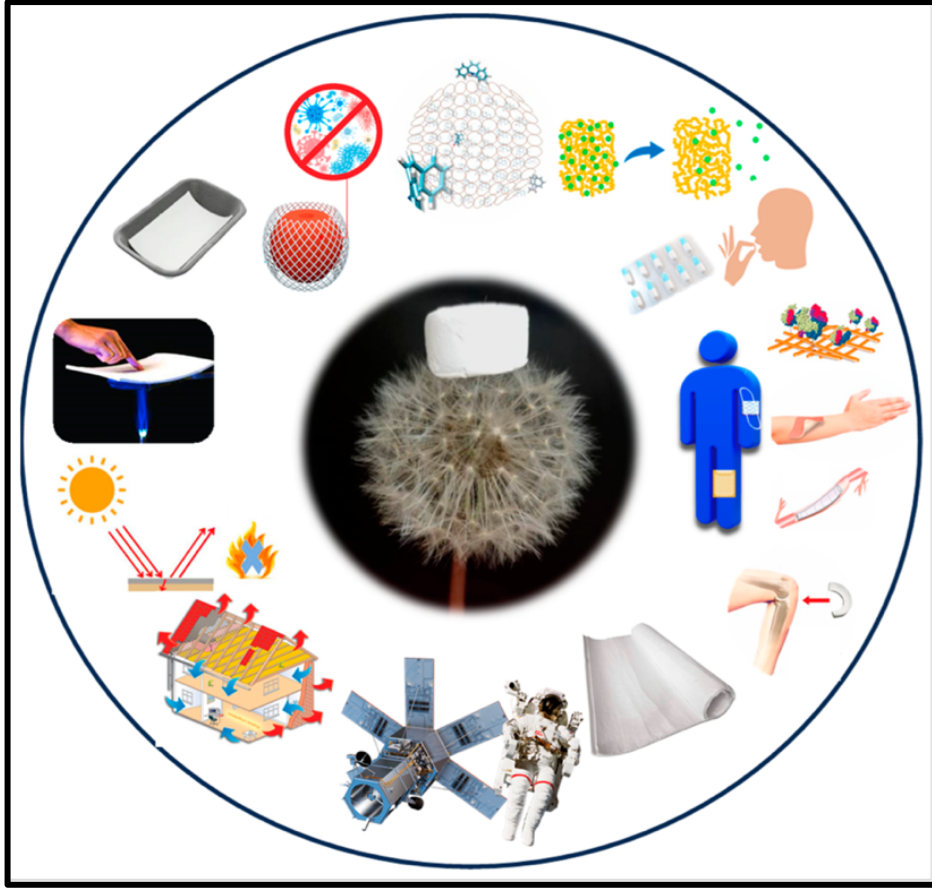
Nano ölçekli malzemeler yapı sektörüne sunduğu çığır açıcı olanaklarla ön plana çıkmakta; olağan ölçekte sergilediklerinden çok farklı mekanik, termal, elektriksel ve kimyasal özellikler göstermektedir. Bu amaç doğrultusunda, inşaat sektörü son zamanlarda nanoteknoloji ile üretilen çeşitli materyalleri kullanarak geleneksel malzemelerde iyileştirmeler elde etmiştir. Söz konusu iyileştirmelerden bazıları; kendi kendini onaran betonlar, ısı yalıtımı sağlayan malzemelerin eldesi, UV ve IR ışınlarından koruyan ince film kaplamalar, antibakteriyel-yansımaya önleyici-kendi kendini temizleyen-parmak izi tutmayan yüzeylerin eldesi, yangından koruma gibi benzersiz özelliklerdir (J. Zhang vd., 2023).

## 2.9.2. Aerojellerin tanımı, yapısı ve özellikleri

Son yıllarda, nano ölçekteki mezo gözenekli malzemeler fizik, kimya ve malzeme bilimlerinde büyük ilgi görmüş ve hızla disiplinler arası araştırma alanlarının odak noktalarından biri haline gelmiştir. Uluslararası Temel ve Uygulamalı Kimya Birliği (IUPAC-International Union of Pure and Applied Chemistry) sınıflamasına göre; nano boyutlu gözeneklerden oluşan bir ağ yapısı ve geniş bir iç yüzey alanıyla karakterize edilen malzemelerden biri de arojellerdir (Alemán vd., 2007). Aerojeller, düzensiz ancak birbirine bağlı olan gözenekli yapılarıyla tipik mezo gözenekli malzemelerdir. Bu malzemeler; en hafif katı olmaları, küçük gözenek boyutlarına sahip olmaları, yüksek gözeneklilikleri ve ultra düşük ısı iletkenlikleri nedeniyle "*21. yüzyılın mucize malzemesi*" olarak kabul edilmektedir (Linhares vd., 2019).

"*Aerojel*" terimi; bir jelin sıvı bileşeninin, ağırsı jel yapısı bozulmadan gaz ile yer değiştirilmesi sonucu elde edilen malzemeleri ifade etmektedir. Aerojeller; katı ama jelimsi görünüm, yarı saydam bir yapı, düşük bir kırılma indisi ve olağanüstü yüksek bir özgül yüzey alanı sergilemektedir. Tipik olarak yaklaşık 0,003-0,5 g/cm<sup>3</sup> yoğunluk, 500-1200 m<sup>2</sup>/g özgül yüzey alanı ve %80-99,8 yüksek gözeneklilik değerleriyle tanınmaktadır (Sai vd., 2014).

Arojeller; ısı iletkenlik, biyolojik olarak parçalanabilirlik veya mekanik dayanım gibi istenen özellikler göz önünde bulundurularak farklı hammaddelerden sentezlenebilmektedir. Kendine özgü gözenek yapısı, havayı etkili bir şekilde hapsetmeyi ve böylece ısı transferini önemli ölçüde azaltmayı mümkün kılmaktadır. Bu özellik; malzemenin gözenekliliğini korumakla kalmayıp, aynı zamanda yapısal bütünlüğünü de garanti altına almaktadır. Bu sayede arojeller; ısı yalıtımı, kataliz, sensörler, mikrodalga emilimi, biyomedikal, havacılık ve enerji depolama gibi çeşitli uygulamalar için ideal bir aday olarak kullanılmaktadır. Son yirmi yılda arojeller; kontrol edilebilirlikleri, mükemmel fiziksel özellikleri ve geniş uygulama alanları nedeniyle hem akademik hem de endüstriyel topluluklarda küresel ilgi görmüştür. Aerojel teknolojisindeki sürekli gelişmeler, bilimsel ve mühendislik uygulamalarında artan önemini yansıtmakla kalmayıp, aynı zamanda sürdürülebilir teknolojik çözümlerin geliştirilmesindeki rollerini de ortaya koymaktadır (Parale vd., 2024). Şekil 2.30.'da arojellerin çeşitli uygulama alanları gösterilmiştir (Boccia vd., 2023).

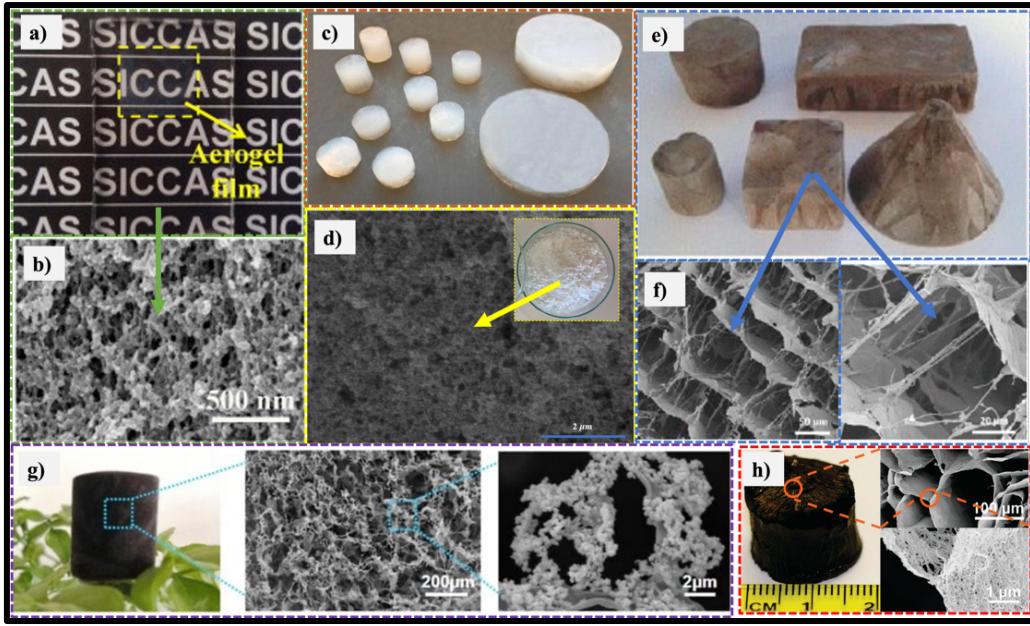


Şekil 2.30. Aerojellerin çeşitli uygulama alanları.

### 2.9.3. Aerojel çeşitleri

Aerojeller, olağanüstü kimyasal ve fiziksel özellikleri sayesinde çok sayıda uygulama için önemli bir potansiyele sahiptir. Bu malzemeler hazırlama yöntemlerine bağlı olarak; aerojel, kserojel, kriyojel ve alternatif aerojel benzeri malzemeler şeklinde gruplandırılırken görünümlerine göre monolitik, toz ve film olarak sınıflandırılabilir. Aerojeller ayrıca hibrit, inorganik veya organik kökenli olabilmektedir. Bunlar metal oksitler, polimerler ve biyopolimerler gibi çok çeşitli malzemelerden sentezlenebilmektedir (Takeshita vd., 2019).

Şekil 2.31.'de farklı formlarda ve yöntemlerde hazırlanan aerojel örnekleri gösterilmektedir. a) aerojel film, b) silisyum dioksit ( $\text{SiO}_2$ ) aerojel filminin SEM görüntüsü, c) monolitik silika aerojel numuneleri, d) toz formda silika aerojel ve aerojelin SEM görüntüsü, e) farklı kalıplardan elde edilen grafen nano aerojel görünümü, f) grafen aerojelde gözenekli yapıyı gösteren SEM görüntüleri, g) hibrit aerojelin dijital fotoğrafı, hibrit aerojelin SEM görüntüsü ve hibrit aerojelin büyütülmüş SEM görüntüsü yer alırken, h) ultra hafif çok duvarlı karbon nanotüp aerojel ve SEM görüntüsünü ortaya koymaktadır (Balci vd., 2025; P. He vd., 2014; Merli vd., 2018; Wei vd., 2019; Xiao vd., 2018; Zou vd., 2010).



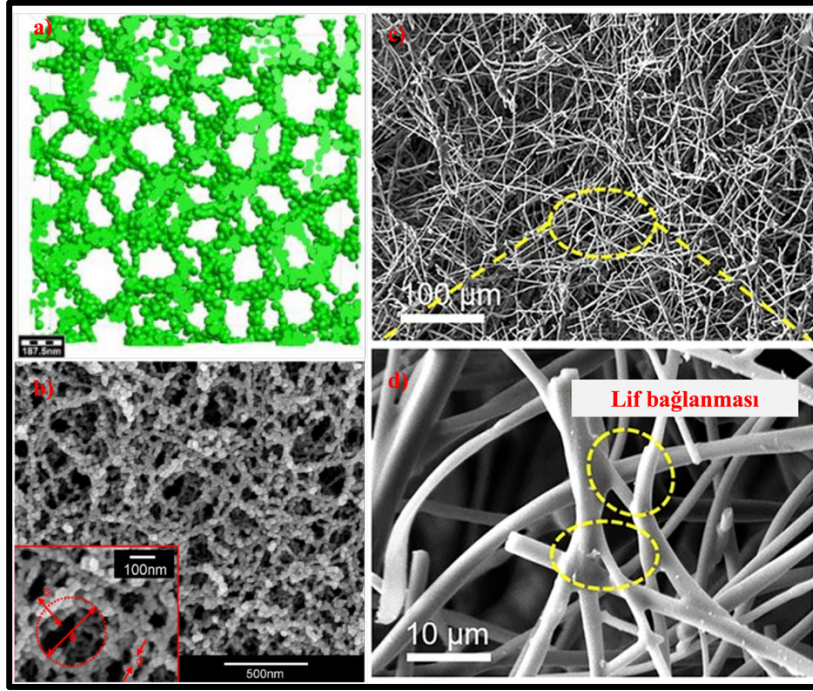
Şekil 2.31. Farklı türlerde ve formlarda üretilen aerogel örnekleri.

Monolitik aerogeller; yüksek yüzey alanı, çok sayıda gözenek yapısı, düşük yoğunlukları ve üstün yapısal özellikleri sayesinde hava arıtımı ve çevre temizliği gibi alanlarda potansiyel uygulamalara sahiptir. Bu malzemeler, doğrusal çapraz bağlı olmayan polimerler tarafından oluşturulan fiziksel jellerin kontrollü kurutulmasıyla elde edilmektedir. Ayrıca mekanik sağlamlık, dayanıklılık, kolay kullanım ve geri dönüşüm özellikleri bakımından avantajlıdır. Homojen yapıları sayesinde kolay işlenebilir ve istenen boyutlarda şekillendirilebilir olmaları; enerji sistemleri, bina yalıtımı, ses emilimi ve kirlilik adsorpsiyonu gibi alanlarda yenilikçi uygulama olanağı sağlamaktadır (Chemere vd., 2025).

Aerogel filmler; yüksek gözenekliliğe, düşük yoğunluğa, geniş yüzey alanına, ayarlanabilir mekanik ve elastik özelliklere sahiptir. Bu sayede özellikle elektronik uygulamalar, enerji depolama sistemleri, piller, filtrasyon ve biyosensör uygulamalarında yaygın kullanılmaktadır. Aerogel filmlerin hazırlanmasında sol-jel, kendi kendine montaj (self-assembly), dondurarak döküm (freeze-casting) ve kimyasal buhar biriktirme (CVD) gibi çeşitli yöntemler kullanılmaktadır. İnorganik, organik ve hibrit aerogeller; filmler, grafen, karbon nanotüp, selüloz ve silika şeklinde sentezlenebilmektedir (Gu vd., 2024).

Toz formundaki aerogeller; malzemelerin güvenlik ve yalıtım performansını iyileştirmek amacıyla sıklıkla tercih edilmektedir. İnşaat malzemeleri, elektronik ekipmanlar, yangına dayanıklı yelekler ve uzay giysilerinde dolgu maddesi olarak kullanılmaktadır. İnşaat sektöründe özellikle betonda çimento ya da ince agrega yerine ikame edilmektedir. Ayrıca toz aerogellerin polimerik, seramik veya metalik matrislere entegre edildiği aerogel bazlı kompozit malzemeler oldukça yaygındır. Şekil 2.32.'de toz ve lif şeklindeki aerogellerin mikroskobik görüntüleri

verilmiştir. Şekilde; a) silika aerogelin gözenek yapısı simülasyonunu b) silika aerogelin SEM görüntüsünü, c-d) lif şeklindeki aerogelin farklı büyütmelerdeki SEM görüntülerini temsil etmektedir (H. Ma vd., 2018; J. Yin vd., 2026).



Şekil 2.32. Toz ve lif (fiber) formlarda sentezlenen silika aerogellerin mikro yapı farklılıkları.

Tek boyutlu lifli aerogeller ise farklı yöntemlerle üretilen, oldukça esnek malzemelerdir. Bu esnek yapıları sayesinde özellikle tekstil yalıtımına uygundur (P. Hu vd., 2024). Günümüzde aerogel liflerin hazırlanması ve şekillendirilmesinde elektrostatik eğirme ve ıslak eğirme teknikleri kullanılmaktadır. Aerogel lifleri; ısı yalıtımı, akıllı ve işlevsel giyilebilir cihazlar, süper kapasitörler ve elektromanyetik girişim koruması gibi geniş uygulama alanına sahiptir (D. Kang vd., 2024).

Mikro yapı özellikleri bakımından aerogeller; mikro, mezo veya makro gözenek boyutlarına sahip olabilmektedir. Mikro gözenekli aerogeller; esas olarak sol-jel tekniği ve uygun bir kurutma yöntemi kullanılarak, ıslak kimyasal yaklaşımla sentezlenmektedir. Bu malzemeler; ultra düşük yoğunluk, yüksek özgül yüzey alanı ve ayarlanabilir yüzey kimyası gibi üstün fiziksel özelliklere sahiptir. Kontrollü mikro yapıları sayesinde ısı yalıtımı, CO<sub>2</sub> yakalama, kirletici azaltma, ses emilimi ve enerji depolama cihazları gibi çeşitli ileri teknoloji uygulamalarında etkili bir biçimde kullanılmaktadır (S. Ma vd., 2024).

Mezo gözenekli aerogeller; 2 ila 50 nm arasında değişen gözenek boyutlarına sahip malzemelerdir. Bu malzemeler, gözenek boyutunun kolay kontrol edilebilir olması ve homojen yapısal özellikleri ile diğerlerinden kolayca ayırt edilmektedir. Genellikle sol-jel tekniği

kullanılarak hazırlanmakta olup bununla birlikte, elektrospinning ve solvotermal sentez gibi diğer tekniklerin kullanılması da mümkündür. Mezo gözenekli aerojeller; ısı yalıtımı, elektromanyetik dalga soğurma, CO<sub>2</sub> yakalama, elektro kataliz, enerji depolama sistemleri, petrol rafinasyonu ve boya giderimi dahil olmak üzere birçok uygulama alanına sahiptir (Nasri vd., 2024).

Makro gözenekli aerojeller; gözenek boyutu 50 nm üzerinde olan, genellikle dondurarak kurutma tekniğiyle sentezlenen malzemelerdir. Kurutma aşamasında suyun donması, buz kristallerini büyüttüğü için makro gözenekli malzemeler elde edilmektedir. Makro gözenekli aerojeller yüksek geçirgenlikli olması ve hızlı kütle transferi sağlaması nedeniyle sorpsiyon bazlı atmosferik su hasadı, ilaç salım sistemleri ve hemostatik malzeme uygulamaları gibi farklı alanlarda kullanılabilir (S. Yu & Budtova, 2024).

Aerojel sentezi sırasında kullanılan öncüllere bağlı olarak çeşitli türden aerojeller elde edilebilmektedir. Bunlardan en yaygın olan inorganik aerojeller; yüksek özgül yüzey alanına, düşük yoğunluğa ve üstün mekanik özelliklere sahip olup; biyomedikal, termal kontrol, kataliz ve diğer birçok alanda uygulama örnekleri bulunmaktadır (Cheng vd., 2024). Başlıca türler arasında silisyum dioksit (SiO<sub>2</sub>), çinko oksit (ZnO), titanyum dioksit (TiO<sub>2</sub>) gibi yarı iletken bazlı aerojeller yer almaktadır. Bunlar arasında açık ara en popüler olanı silika aerojellerdir. Bir diğer yaygın tür olan grafen aerojeller ile karşılaştırıldığında, silika aerojeller daha düşük maliyetli ve daha çevre dostu kurutma süreçleriyle elde edilebilmektedir (Hasanpour vd., 2024).

Organik aerojeller; kimyasal yapılarına göre polisakkarit, fenolik, poliol, protein ve karbon bazlı olarak sentezlenebilmektedir. Bu aerojeller kimyasal kararlılık, esneklik, düşük yoğunluk ve güçlü kovalent bağ yapılarına sahiptir. Bu sayede inorganik aerojellere göre daha az kırılabilir ve daha fazla mekanik dayanım göstermektedir. Buna ek olarak düşük toksisiteleri, bol miktarda bulunabilmeleri ve gözenekli yapıları sayesinde sürdürülebilir malzeme teknolojilerinde etkin rol oynamaktadır. Bu önemli özellikler organik aerojellerin elektrokimya, kataliz, atık su arıtımı ve havadan kirliliği kontrolü dahil olmak üzere birçok farklı sektörde yaygın olarak kullanımını mümkün kılmaktadır (Hasanpour vd., 2024).

Hibrit aerojeller; farklı malzemelerin üstün özelliklerini bir araya getirerek, saf aerojellerin dezavantajlarının üstesinden gelmek için geliştirilen türlerdir. Aerojel yapısında hiyerarşik gözeneklilik ağlarının kontrol edilmesiyle termal, optik, elektriksel ve yüzey özelliklerinin iyileştirilmesi mümkün olmaktadır. Bu aerojeller; organik-inorganik, organik-organik veya inorganik-inorganik kombinasyonlar yoluyla elde edilebilmektedir (Fijalkowski vd., 2023). Son yıllarda yüzey sililasyonu gibi yöntemlerle hidrofobik yapının iyileştirilmesi,

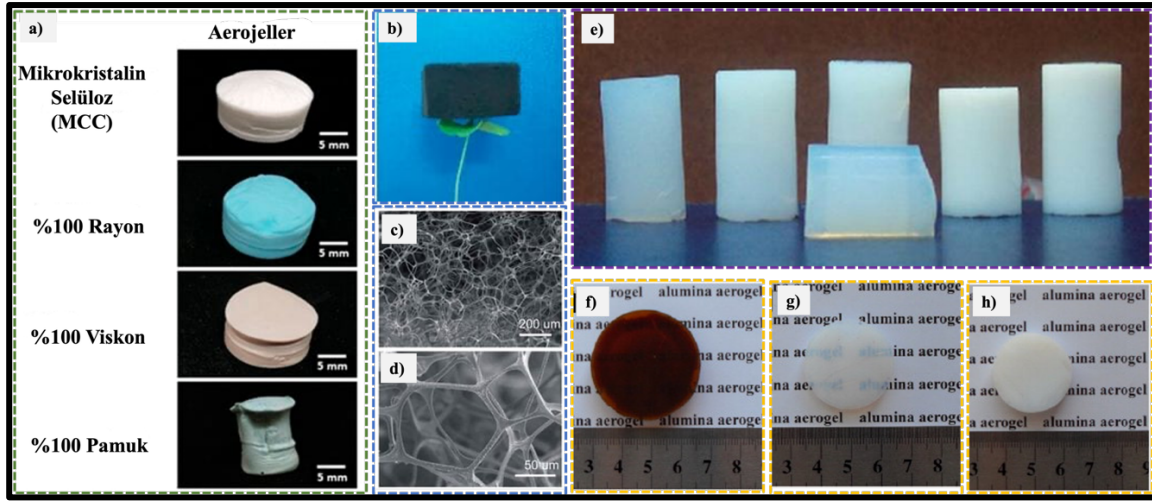
termal kararlılık ve optik geçirgenlik gibi özelliklerin geliştirilmesine yönelik ilerlemeler, uygulama alanlarını genişletmiştir. Bunlar arasında çok işlevli hibrit malzemeler, ilaç salınımı, enerji depolama, gaz sensörler gibi çok yönlü uygulamalar potansiyel seçenek olarak giderek daha cazip hale gelmektedir (Meti vd., 2022).

Aerojeller başlangıçta silika kaynağı kullanılarak sentezlense de günümüzde birçok hammadde kullanılarak üretilebilmektedir. Farklı hammaddeler seçilerek; silika arojeller, karbon arojeller, polimer arojeller, metal oksit arojeller, metal arojeller ve biyo-bazlı arojeller geliştirilebilmektedir.

Günümüzde yaygın olarak kullanılan arojel türleri şu şekildedir:

*Karbon arojeller;* genellikle resorsinolformaldehit, melamin, krezol, polimerik izosiyanat ve fenol gibi öncüllerle hazırlanmış organik arojellerin pirolizi ile elde edilen; kovalent bağlı malzemelerdir. Alternatif olarak monolitler, grafen ve karbon nano tüpler gibi karbon bazlı malzemeler kullanılarak da hazırlanabilmektedir. Yüksek gözeneklilik, geniş yüzey alanı, kimyasal inertlik, toksik olmama ve çevre dostu özellikleri sayesinde çevresel uygulamalarda etkili bir şekilde kullanılabilir. Ayrıca elektrolitik kapasitörler, elektrosorpsiyon sistemler, giyilebilir piezorezistif sensörler, atık su arıtma, iyon giderimi ve organik kirleticilerin bertaraf edilmesi gibi birçok alanda yaygın olarak uygulanmaktadır (K. Wu vd., 2022).

*Alümina arojeller;* hammadde olarak alümina bakımından zengin kaynaklar tercih edilerek, sol jel yöntemi ile sentezlenmektedir. Alümina metali ile sentez sırasında metal oksit arojeller elde edilmektedir. Hidroliz sırasında alüminyum hidroksit (Al-OH) yapısı oluşmakta ve reaksiyon ilerledikçe proses sonunda metal-oksit-metal yapısı (Al-O-Al) ortaya çıkmaktadır. Alümina arojeller yüksek yüzey alanı, yüksek mekanik dayanım ve hammadde kaynaklarının bolluğu gibi nedenlerle son zamanlarda ilgi çeken bir diğer arojel türü durumundadır. Şekil 2.33.'te günümüzde yaygın olarak kullanılan arojel türlerine ait örnekler verilmiştir. Şekilde; a) selüloz arojellerin görünümünü, b) 15 cm<sup>3</sup>'lük bir karbon arojeli, c-d) farklı büyütmelerde karbon arojelin SEM görüntülerini, e) silika-titanyum arojellerin fotoğraflarını ve f-h) farklı bileşimde sentezlenen alümina arojel örneklerini temsil etmektedir (Gan vd., 2019; Gurav vd., 2010; Négrier vd., 2023; Zu vd., 2011).



Şekil 2.33. Farklı bileşimlerle sentezlenen aerogel örnekleri.

*Polimer bazlı aerogeller*; sentetik veya doğal kökenli olarak üretilebilmektedir. Sentetik polimer bazlı aerogeller; fenolik reçineler, poliüretan, polivinil alkol ve polistiren gibi farklı polimer türlerinden elde edilebilmektedir. Bu malzemeler düşük sıcaklık koşullarında güçlü termal yalıtım özelliklerine ve mekanik dayanıma sahiptir. Bu nedenle, özellikle havacılık ve uzay teknolojileri gibi çok çeşitli uygulamalarda kullanılmaktadır. Sürdürülebilirlik ve çevresel etkinin azaltılması hedefleri doğrultusunda ortaya çıkan biyopolimer bazlı aerogeller ise selüloz, kitosan, aljinat, nişasta, pektin ve agar gibi polisakkarit kaynaklı hammaddelerden elde edilmektedir. Bu tür aerogeller yarı sentetik ve sentetik kaynaklardan elde edildiğinden biyouyumlu, biyolojik olarak parçalanabilir ve toksik olmayan özelliklere sahiptir (Rawson vd., 2022).

Doğal selülozdan üretilen selülozik nanofiberler ise geleneksel odun lifi ile aynı yaklaşım kullanılarak üretilmektedir. Bu malzemelerin geliştirilmiş mekanik özellikleri, optik şeffaflığı ve düşük termal genişmesi çeşitli uygulama alanlarında kullanımının önünü açmaktadır. Jelatin, peynir altı suyu proteini, soya, yumurta akı ve ipek fibroini gibi protein bazlı aerogeller ise yaşam bilimi ve biyomedikal uygulamalarda umut verici gelişmeler göstermektedir (Takeshita vd., 2019).

Geleneksel polimer-aerogel sistemlerinde çoğunlukla petrol türevi öncüller kullanılmaktadır. Biyopolimer aerogellerde ise daha sürdürülebilir öncüllerin kullanımı, karbon ayak izini ve çevresel etkilerini en aza indirmektedir. Sonuç olarak polimer ve biyopolimer kökenli aerogeller; yüksek elastikiyet, ayarlanabilir gözeneklilik ve çevre dostu bileşenlerin varlığı sayesinde geleneksel silika aerogellere alternatif olarak değerlendirilebilmektedir (Josefsson vd., 2008).

*Silika aerogeller*; benzersiz nanoyapıları ve olağanüstü termal yalıtım yetenekleri nedeniyle araştırmacıların yoğun ilgisini çeken ileri teknoloji malzemelerdir. %95'i aşan gözenekliliğe sahip bu nano gözenekli yapılar, süper termal yalıtım ve ısı düzenleme uygulamaları için en umut verici adaylardan biridir (Vareda vd., 2024). Knudsen etkisi ile açıklanan olağanüstü düşük ısı iletkenlikleri (0,013 W/m.K), poliüretan köpük (0,030–0,040 W/m.K) gibi geleneksel yalıtım malzemelerinininkinden önemli ölçüde daha düşüktür. Ayrıca silika aerogeller ultra düşük yoğunlukları (0,120 g/cm<sup>3</sup>), 700-900 m<sup>2</sup>/g yüzey alanı ve amorf yapısı sayesinde havacılık ve taşınabilir elektronik cihazlar ile uzay teknolojileri gibi ağırlığa duyarlı uygulamalar için ideal çözümlerdir. Bu malzemelerde çapraz bağ yapısı ve 50 nm den küçük gözenek boyutlarının varlığı, gaz fazdaki iletimi sınırladığından mükemmel ısı yalıtım özelliği göstermektedir (Cho vd., 2024).

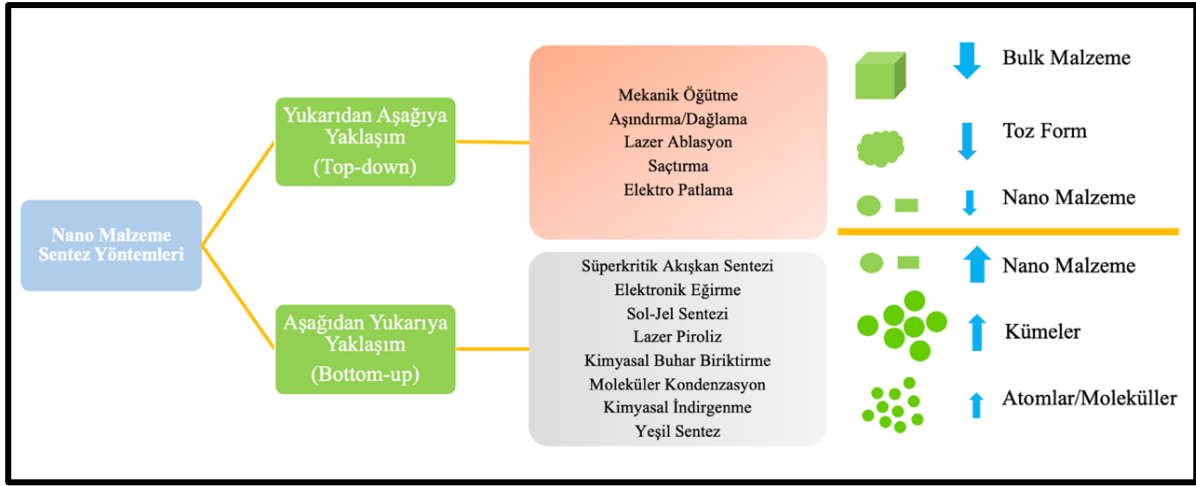
Son yıllarda elde edilen gelişmelerle birlikte silika aerogellerin toz formlarının kompozit sistemlere entegre edilmesi mümkün olmuştur. Bu aerogel tozlarının polimerik veya lifli matrislere dahil edilmesi; aerogellerin ısı yalıtım özelliklerini korurken, mekanik kırılabilirlik ve şekillendirme sınırlamalarının üstesinden gelinmesine de olanak tanımaktadır (X. Li vd., 2025).

Silika aerogellerde mekanik dayanımın artırılmasında kovalent çapraz bağlama ve lif takviyesi gibi teknikler ön plana çıkmaktadır. Ancak bu yöntemler silika aerogellerin yoğunluğunda artışa sebep olmaktadır. Bu bağlamda, silika omurgasının hidrofobik yapısını ve termal kararlılığını sağlayan polimer takviyeli hibrit aerogeller; ısı yalıtımı, termal kararlılık, hidrofobiklik ve mekanik dayanımın artırılmasında en etkili yöntemlerden biri olarak kullanılmaktadır (Niculescu vd., 2024).

Bu tür esnek uygulamalar yalnızca aerogellerin kapsamını genişletmekle kalmayıp, aynı zamanda dinamik veya kısıtlı geometrik ortamlarda yeni nesil ısı yönetim sistemlerinin gelişimine de katkı sunmaktadır (X. Hu vd., 2025).

#### **2.9.4. Aerojel sentez yöntemleri**

Nano boyuttaki malzemelerin üretimi; şekil, kararlılık, boyut dağılımı ve ölçeklendirilebilirlik gibi çeşitli özelliklerin kontrol edilmesini mümkün kılmaktadır. Nano malzeme sentezinde genellikle iki temel yaklaşım kullanılmaktadır. Bunlar; yukarıdan aşağıya (top-down) ve aşağıdan yukarıya (bottom-up) yöntemler olarak sınıflandırılmaktadır. Yukarıdan aşağıya yaklaşımda; makro veya mikro ölçekteki katı malzemeler fiziksel, mekanik veya kimyasal işlemlerle nano boyutlu yapılara indirgenmektedir. Buna örnek olarak; mekanik öğütme, litografi, aşındırma ve buhar fazı biriktirme teknikleri gösterilebilmektedir (Sohail, 2025). Nano malzeme sentez yöntemleri Şekil 2.34.'de verilmiştir.



Şekil 2.34. Nano malzeme sentez yöntemleri.

Aşağıdan yukarıya yaklaşımda ise nano malzemeler atom veya moleküler seviyedeki yapı taşlarının çeşitli kimyasal veya fiziksel etkileşimlerle bir araya getirilmesi sonucu oluşmaktadır. Bu yöntemde genellikle hidrotermal, solvotermal, kimyasal buhar biriktirme, kimyasal çökeltme, elektrospinning ve sol-jel gibi yöntemler kullanılmaktadır (Sohail, 2025). Aşağıdan yukarıya yaklaşım, bileşimin homojenliği ve yapısal kontrolün mümkün olması sayesinde avantaj sağlamaktadır.

Aerojeller, nano malzemeler arasında en popüler olanlardan biridir. Aerojel sentezinde kullanılan yöntemlerden ilki; hidrotermal/solvotermal sentez yaklaşımıdır. Bu yöntem, yüksek sıcaklık ve basınç koşullarında, genellikle sulu/susuz kapalı kaplarda gerçekleştirilmektedir. Nanotel, nano rot, nano levha ve nano küreler bu yaklaşımla elde edilebilmektedir (Mekuye & Abera, 2023).

Bir diğer yöntem ise şablon yardımı (template-assisted) sentez yaklaşımıdır. Bu yöntemde nano gözenekli malzeme elde etmek için çeşitli şablonlar kullanılmaktadır. Yumuşak veya sert şablonların gözenekleri çeşitli öncüllerle doldurulmakta ve şablon uzaklaştırılarak aerojel benzeri nano yapılar elde edilmektedir. Yumuşak şablonlama yönteminde polimerler, esnek organik moleküller ve sürfaktanlar kullanılırken; sert şablonlama yönteminde ise katı silika veya karbon yapılar kullanılmaktadır. Yöntem, gözenek boyutu ve hacminin hassas bir şekilde kontrol edilmesine olanak tanımaktadır (Baig vd., 2021).

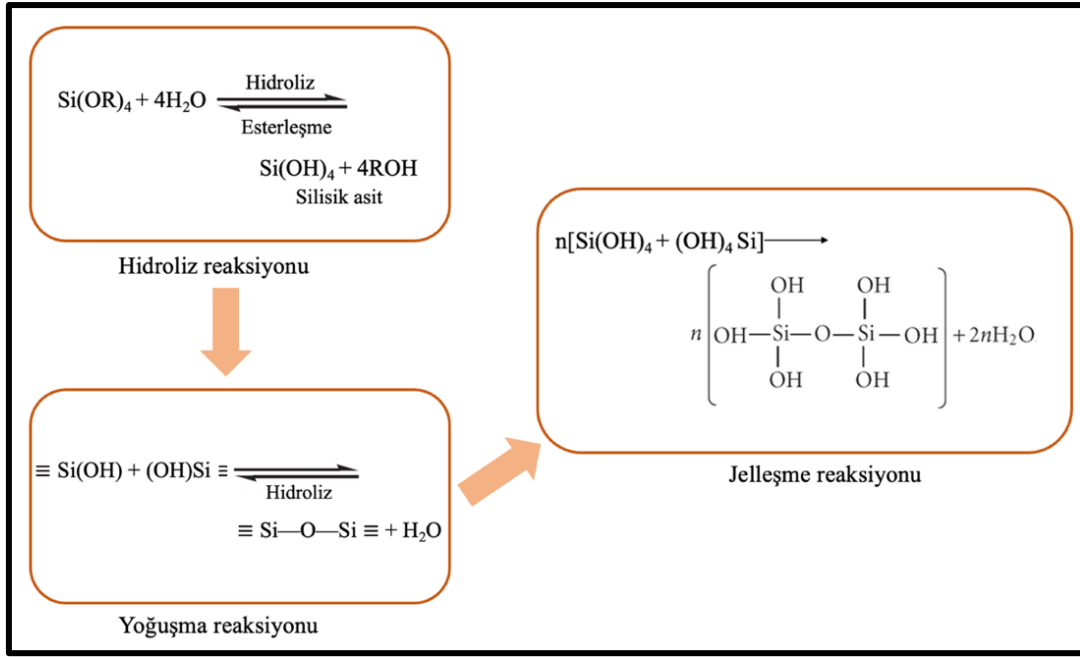
Aerojel sentezinde kullanılan en modern yöntem ise üç boyutlu (3D) yazıcılar aracılığıyla gerçekleştirilen yöntemdir (additive manufacturing). Yöntemde sentezlenen aerojel benzeri malzemenin yüzey alanı artırılarak enerji depolama özellikleri iyileştirilmekte ve yapısal performansı artırılmaktadır.

Aerojellerin üretiminde kullanılan en yaygın yöntem ise *sol-jel* işlemidir. Sol; sıvı bir ortamda 2 nm ile 0,2 µm boyutundaki kolloidal parçacıkların dağıtılmasıyla oluşmaktadır. Su, alkol veya diğer organik sıvılar, sol içindeki bu parçacıkları dağıtmak için “çözücü” olarak kullanılmaktadır (Parale vd., 2024). Aerojellerin üretim süreci; polimerizasyonla başlayan, ardından jelleşme, hidroliz ve yoğunlaşma ile devam eden çok aşamalı bir prosedürdür (Gurav vd., 2010). Bu karmaşık adımlar dizisi, arojellerde benzersiz yapısal özelliklerin geliştirilmesinde büyük önem taşımaktadır.

### 2.9.5. Sol-jel yöntemiyle arojel sentezi

Nano malzemelerin yapı sektöründe kullanımının yaygınlaşması ile alanda yapılan çalışmalar da hız kazanmıştır. Nano malzeme sentezinde kullanılan birçok yöntem olmakla beraber, bunlar arasında en yaygın kullanılan yöntem sol-jel prosesidir. Proses; nano malzemenin tane boyutunu, yüzey özelliklerini ve mekanik performansını denetlemeye uygun bir yöntemdir. Düşük proses sıcaklığı, safsızlıkların giderilmesi için pH değerinin istenen şekilde ayarlanabilmesi ve reaksiyon kinetiğinin denetlenebilir oluşu yöntemin avantajları arasındadır (Hernández-Contreras vd., 2024).

Sol-jel prosesi temelde metal alkoksitler, nitratlar, oksit ve hidroksitler gibi katı inorganik malzemelerin 100 °C'nin altındaki bir sıcaklıkta su ve katalizörler eşliğinde kimyasal tepkimeye sokulmasıyla ilerleyen, aşağıdan yukarıya sentez yaklaşımıdır (Navas vd., 2021). Bu süreçte solüsyon içerisindeki taneciklerin sahip olduğu yükler elektrokimyasal etkileşimlerle jel yapısı meydana getirmekte ve gelişen bu reaksiyon “polimerleşme reaksiyonu” olarak adlandırılmaktadır. Proseste “sol” olarak adlandırılan yapı; sıvı içinde bulunan kolloidal katının süspansiyonunu ifade etmektedir. Jel yapısı ise “hidrojel” olarak adlandırılan, katı ve sıvı arasında yer alan ara faza verilen addır. Bu yapı, kolloidal taneciklerin çöktürülmesi ile elde edilmektedir. Silika kaynağı olarak silisyum alkoksit seçildiğinde jelleşme için bir asit/baz katalizörü gerekliken, geçiş metalleri sadece su ile karıştırıldığında hızla reaksiyona girmektedir (Niculescu vd., 2024). Sol-jel sentezi sırasında gerçekleşen hidroliz ve yoğunlaşma reaksiyonları ile jelleşme reaksiyonu Şekil 2.35.'te verilmiştir (Esposito, 2019).



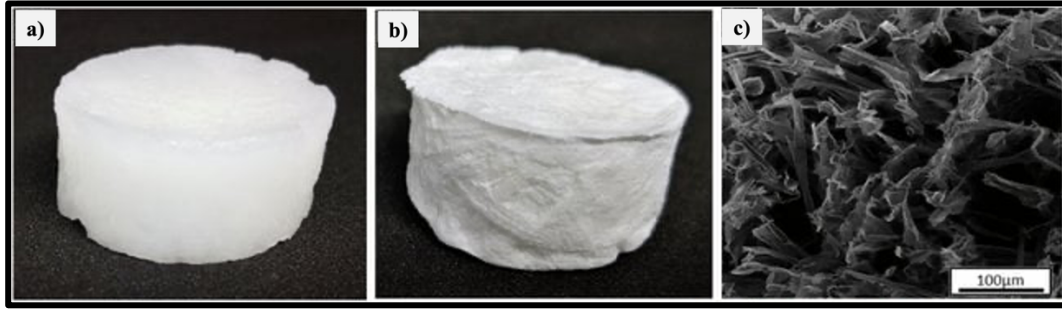
Şekil 2.35. Hidroliz, yoğuşma ve jelleşme reaksiyonları.

Sol çözeltisinin fiziksel ve kimyasal özellikleri; sıcaklık, pH, çözücü türü, suyun molar oranı, katalizör tipi ve konsantrasyonları ile karıştırma süresine bağlı olarak değişmektedir. Aerojel sentezinin temelini oluşturan hidrojin nanoyapısal özellikleri ile polimer ağının kimyasal yapısı; aerojin gözenekliliğini, yüzey alanını, işlevselliğini, kararlılığını ve dayanım özelliklerini etkilemektedir (X. Zhang vd., 2019). Bu nedenle hidrojel sentezinde kullanılan öncüllerin parametrelerini anlamak ve doğru şekilde uyarlamak, optimize edilmiş aerjellerin elde edilmesi açısından çok önemlidir. Genellikle asidik katalizör koşulları, daha yoğun ve düşük gözenekli aerojel oluşumlarına yol açarken, bazik katalizörler daha hafif ve daha yüksek gözenekli yapılar oluşturmaktadır. Gözeneklilik ve yoğunluktaki bu farklılık, aerojin termal ve mekanik özelliklerini doğrudan etkilemektedir. Asidik ortamda hidroliz reaksiyonu yoğunlaşmadan daha hızlı ilerlemekte ve sonuçta sulu ortamda kolayca çözünen, daha az dallanmış bir silika ağı oluşmaktadır (Chiang vd., 2003). Baz katalizli reaksiyonlarda, yoğunlaşma adımı hidroliz aşamasına göre daha baskındır. Bu nedenle, bazik koşullarda daha yoğun ağ yapısı ve daha az sayıda alkoksit ve silanol grubu içeren ürünler elde edilmektedir (Soleimani Dorcheh & Abbasi, 2008).

Ayrıca asidik koşullarda elde edilen daha sıkı çapraz bağlara sahip aerjeller, düşük gözenekli ve yüksek dayanım sergilemektedir. Buna karşın bazik koşullar, daha düşük mekanik dayanıma ancak daha iyi yalıtım özelliklerine sahip gözenekli aerjellerin oluşumuna ortam sağlamaktadır (Douk vd., 2019).

Jelleşme süresine etki eden bir diğer önemli parametre de çözücü miktarıdır. Silika kaynağı oranına göre çözücü miktarı arttıkça, çözeltideki tanecikler arası mesafe büyümekte ve jelleşme süresi lineer olarak artmaktadır. Çözücü miktarı sabit tutulup su oranı artırıldığında su, çözücü olarak görev almakta, hammadde konsantrasyonu azalmakta, yoğunlaşma hızı düşmekte ve jelleşme süresi artmaktadır. Ayrıca sol-jel prosesinin uygulanma sıcaklığı da önemli olmaktadır. Sentez sırasında kullanılan metanol ve etanol gibi çözücüler kaynama noktalarına (60-65 °C) kadar ulaştığında jelleşme süresi kısalmaktadır (Formanek vd., 2021).

Hidrojelden aerojele dönüşüm süreci, üç boyutlu ağ yapısının korunması şartıyla çözücünün uzaklaştırılması esasına dayanmaktadır. Şekil 2.36.'da sol-jel yöntemiyle elde edilen hidrojel (a), hidrojelden liyofilizasyon yoluyla oluşturulmuş aerojel (b) ve aerojelin SEM görüntüsü (c) verilmiştir (Azmi vd., 2021).



Şekil 2.36. Hidrojelden aerojele dönüşüm süreci ve ürünün mikro yapısı.

Kurutma işlemi sırasında kılcal kuvvetlerin neden olduğu ve hassas nano gözenekli yapıyı tehlikeye atabilen yapısal çöküşün azaltılması, en önemli teknolojik zorluklardan biridir. Çapraz bağlama yoğunluğu, kurutma sırasında yapısal bütünlüğün belirlenmesinde önemli bir rol oynamaktadır. Genellikle yüksek çapraz bağlama daha iyi morfolojik kararlılık ve mekanik performans sağlamaktadır (Baimenov vd., 2024).

En yaygın aerojel türü olan silika aerojellerin sentezinde temel bileşen olan silisyum, farklı kaynaklardan elde edilebilmekte ve sentez sırasında kullanılan hammaddenin türüne göre farklı fiziksel, kimyasal ve yapısal özelliklere sahip ürün elde edilmektedir (J. Yang vd., 2023). Geleneksel silika aerojel sentezinde kullanılan en yaygın silika kaynakları, çoğunlukla ticari olarak üretilmiş ve piyasada halihazırda satışı yapılan öncüllerdir. Bu öncüller; tetraetil ortosilikat (TEOS), tetrametil ortosilikat (TMOS), metil trimetoksi silan (MTMS) ve sodyum silikat ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) olarak bilinmektedir (Hardiane vd., 2023). Bunlar alkoksisisilan bazlı olup sol-jel sürecinde yüksek saflık ve homojenlik sağlamakta, dolayısıyla elde edilen aerojellerin gözenek boyutu dağılımı ve yüzey alanı denetlenebilmektedir. Bununla birlikte söz konusu bu kimyasalların yüksek maliyeti ve toksik atıklara sebep olması geniş ölçekli kullanımını

sınırlamaktadır (Birdsong vd., 2024). Bu nedenle, özellikle son yıllarda doğal silika kaynakları ve endüstriyel üretimlerde atık olarak ayrılan ve yüksek silika içeriğine sahip malzemelerin silika aerojel sentezinde kullanılabilirliği ilgi konusu olmuştur. Bu sayede hem maliyet etkinliği sağlanmakta hem de çevresel etkiler minimize edilmektedir.

Doğal hammaddelerden elde edilen silika kaynakları; bol bulunurlukları ve yüksek silika içerikleri nedeniyle aerojel sentezinde önemli bir alternatif oluşturmaktadır. Özellikle perlit, diyatomit, pomza, zeolit, silis kumu, feldspat, kuvars, diyatomit, volkanik tuf ve granitik kayalar yüksek miktarda SiO<sub>2</sub> içermeleri nedeniyle potansiyel silika kaynakları olarak değerlendirilmektedir (Balci vd., 2025). Türkiye gibi doğal silis kaynakları bakımından zengin ülkelerde bu tür hammadde kullanımı maliyet avantajı ve yerli üretim kapasitesi bakımından oldukça önemlidir. Doğal hammadde kökenli silika kaynağı örnekleri Şekil 2.37.'de verilmiştir.



Şekil 2.37. Doğal hammadde kökenli silika kaynakları (Tasisat, 2026; Canerkaraguler, 2026; Sempas, 2026; Volkanatabey, 2026).

Yenilenebilir enerji araştırmaları ve sürdürülebilir inşaatların geliştirme hedeflerinde, katı atıkların geri dönüşümü dünya çapında yaygın bir uygulama haline gelmiştir (Y.-L. Yang vd., 2025). Literatürde; ihtiyaç duymadığımız ve bertaraf ettiğimiz her türlü madde “*atık*” olarak ifade edilmektedir. Nüfus artışı, endüstriyel faaliyetlerin genişlemesi ve değişen tüketim alışkanlıkları, küresel ölçekte katı atık miktarının artmasındaki başlıca faktörlerdendir. Atıkların çeşitli fiziksel ve kimyasal işlemlerden geçirilerek hammaddeye dönüştürülmesi ve üretim sürecine yeniden dahil edilme süreci ise “*geri dönüşüm*” olarak tanımlanmaktadır (Al-Tarbi vd., 2022).

Endüstriyel katı atıkların %80'inden fazlası silika bakımından zengindir (Miao vd., 2022). Çevre kirliliğinin önlenmesi ve sentez sırasında insan sağlığının korunması amacıyla

silika aerojellerin yeşil ve kirlilik içermeyen reaktifler kullanılarak sentezlenmeleri büyük önem taşımaktadır. Bu bakımdan atık cam, uçucu kül, taban külü, pirinç kabuğu külü, mısır koçanı, altın madeni arıtma çamuru, kömür gang minerali, atık döküm kumu gibi atıklar literatürde en fazla çalışma konusu olmuş silisyum kaynaklarıdır (Balci vd., 2025; Grabias-Blicharz & Franus, 2023; Seun Samuel Owoeye vd., 2021). Şekil 2.38.'de çeşitli endüstrilerden elde edilen atık silika kaynaklarına örnekler verilmiştir.



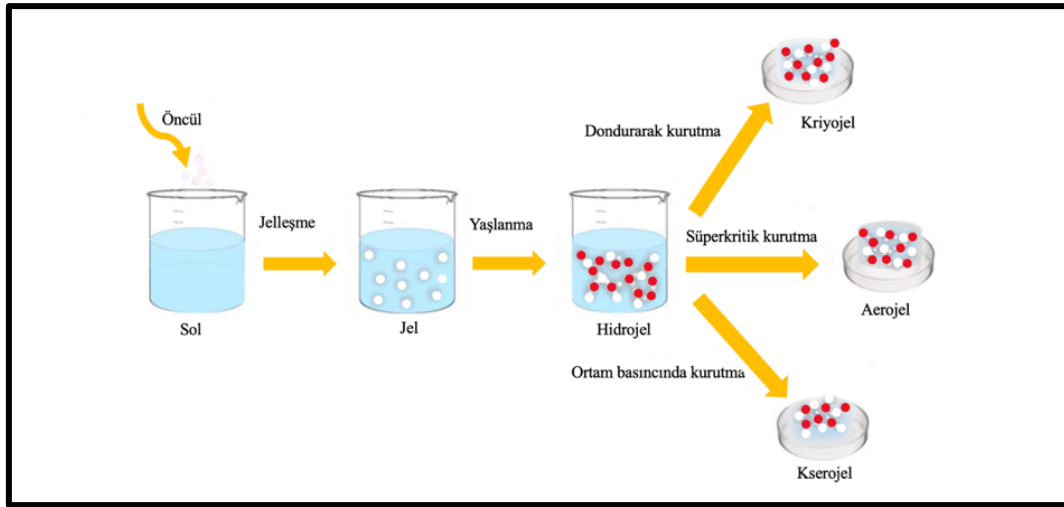
**Şekil 2.38.** Silika açısından zengin endüstriyel kaynaklar (Akerkimya, 2026; Erdoganlargida, 2026; Camkumu, 2026; Vietnam, 2026; Arex, 2026).

Silisyum içeren malzemelerden silika elde etmek amacıyla kalsinasyon, kimyasal ekstraksiyon ve elektrokimyasal yöntemler kullanılmaktadır. Silika içeren doğal kaynaklar genellikle doğrudan çıkartılarak veya işlenerek kullanılırken, endüstriyel atıklardan genellikle geri dönüşüm veya diğer işleme yöntemleri kullanılarak silika elde edilmektedir (Miao vd., 2022). Örneğin; diatomitler, doğal gözenek yapısı ve yüksek silisyum içeriği sayesinde düşük sıcaklıklarda işlem görerek aerjel sentezine uygun hale getirilebilmektedir. Volkanik kökenli kayalar ise asitle muamele sonucu saflaştırılarak sol-jel yöntemine uygun silika elde edilmektedir (Wei vd., 2022). Özellikle termik santrallerden elde edilen ve %50-70 oranında amorf silika içeren uçucu küllerden asit liçi ve alkali aktivasyon gibi uygun ön işlemlerle yüksek saflıkta silika eldesi mümkündür. Atık camlar da benzer şekilde geri dönüşüm potansiyeli yüksek bir silika kaynağı olup aerjel sentezine uygun silika çözeltisi elde etmek mümkündür. Bu yaklaşımla, atık yönetimi problemlerinin azaltılması sağlanırken aynı zamanda düşük maliyetli aerjel sentezi mümkün olmaktadır (Balci vd., 2025).

Bu bölümde genel hatlarıyla özetlenen aerojel sentezindeki işlem basamaklarının ayrıntılı açıklaması devam eden başlıklarda detaylandırılmıştır.

### 2.9.5.1. Jelin oluşturulması

Sol-jel prosesinde ilk adım sıvı fazdaki sol olarak adlandırılan koloidal matrisin hazırlanmasıdır. İşlem; silika bazlı öncüllerin uygun bir katalizörle birlikte suda çözülmesiyle gerçekleşmektedir (Karamikamkar vd., 2020). Bunların arasında en yaygın öncüllerden TEOS ve TMOS'da tetraalkoksi silan ( $(Si(OR)_4)$ ) formülü ortaktır ve bu nedenle silika aerojeller geniş bir "silika" kategorisi altında sınıflandırılmaktadır (Hæreid vd., 1995). Jelleşme aşamasında, asit veya baz katalizli çapraz bağlama reaksiyonları yoluyla jel yapı oluşmakta ve parçacıklar dallanarak birbirleriyle etkileşime girmektedir. Daha yüksek bir çekirdeklenme oranı daha fazla sayıda küçük kümelerin oluşumunu sağlarken, daha düşük bir büyüme oranı daha küçük parçacık boyutlarının korunmasına yardımcı olmaktadır. Şekil 2.39.'da sol-jel yöntemiyle sentezlenen jelin oluşum aşamaları ve elde edilen nihai ürün yapısının şematik gösterimi verilmiştir (Jahed vd., 2023; Niculescu vd., 2024).



Şekil 2.39. Jel oluşumunun aşamaları.

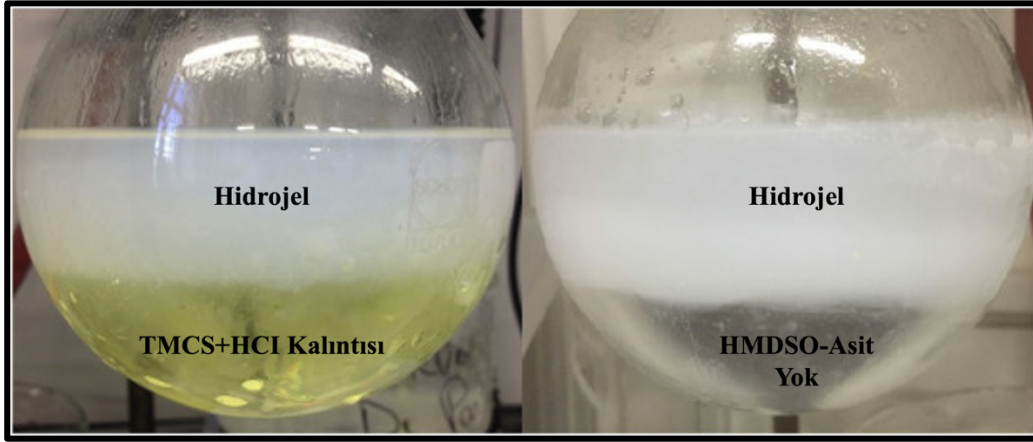
Jelleşme noktasında, sol-jel geçişi tamamlanmakta bu da hidroliz ve yoğunlaşma süreçlerinin sona erdiğini göstermektedir. Bu aşama, sistemin sıvı çözeltiden katı faza geçişi olarak tanımlanan "sol-jel dönüşümünü" ifade etmektedir. Bu süreçte, öncelikle birincil parçacıklar oluşmakta ve bunlar daha sonra inci kolye benzeri bir yapıda (neckle-like) birbirine bağlanarak ikincil parçacıklara (kümeler) dönüşmektedir (Innocenzi, 2019). Oluşan jeller, gözeneklerindeki sıvı çözeltiye göre isimlendirilmektedir. Alkol içerenler alkoljel, su içerenler hidrojel ve organik çözücü içerenler organojel olarak sınıflandırılmaktadır (Salimian vd., 2018). Süreç sonunda oluşan üç boyutlu ağ; hidrojinin gözeneklilik, yoğunlaşma ve hidroliz oranının

dengelenmesiyle ayarlanabilmektedir. Bu denge; pH, sıcaklık ve öncüllerin kimyasal bileşimi gibi farklı parametrelerin değiştirilmesiyle sağlanmaktadır (Jahed vd., 2023).

### 2.9.5.2. Jelin yaşlandırılması ve çözücü değişimi

Hidroliz ve yoğunlaşma süreçleri, jel noktasına ulaşıldıktan sonra da devam etse bile difüzyon kısıtlamaları ve reaktif ürünlerin azalması nedeniyle reaksiyonlar daha yavaş gerçekleşmektedir. Bu süreç “yaşlandırma aşaması” olarak bilinmektedir. Süreç boyunca gelişen reaksiyonlar silika ağının güçlenmesini ve sertleşmesini sağlayarak aerogelin mikro yapısı üzerinde önemli bir etki oluşturmaktadır (Iswar vd., 2017). Yaşlandırma reaksiyonunun temel prensibi, sol parçacıklarının hareketini hızlandırarak çarpışma olasılığını artırmak ve böylelikle siloksan (Si-O-Si) bağ yapısının sayısını çoğaltmaktır. Bu işlemde çözücü ile jel yapı birbirinden ayrılarak, jelin kurutulmadan önce dayanıklılığının artırılması sağlanmaktadır (Zhan vd., 2023).

Aerogel sentezinde yaşlanma aşaması, malzemede optimum fiziksel özelliklere ulaşmak için kritik öneme sahiptir. Çapraz bağlanma derecesini artırmak için silika jelin yaşlandırma aşamasında TMOS veya TEOS gibi silan öncülleri içeren bir çözeltiye daldırılması en yaygın uygulama olarak bilinmektedir (De Pooter vd., 2018) (Şekil 2.40.).



Şekil 2.40. Aerogel sentezinde çözücü değişimi.

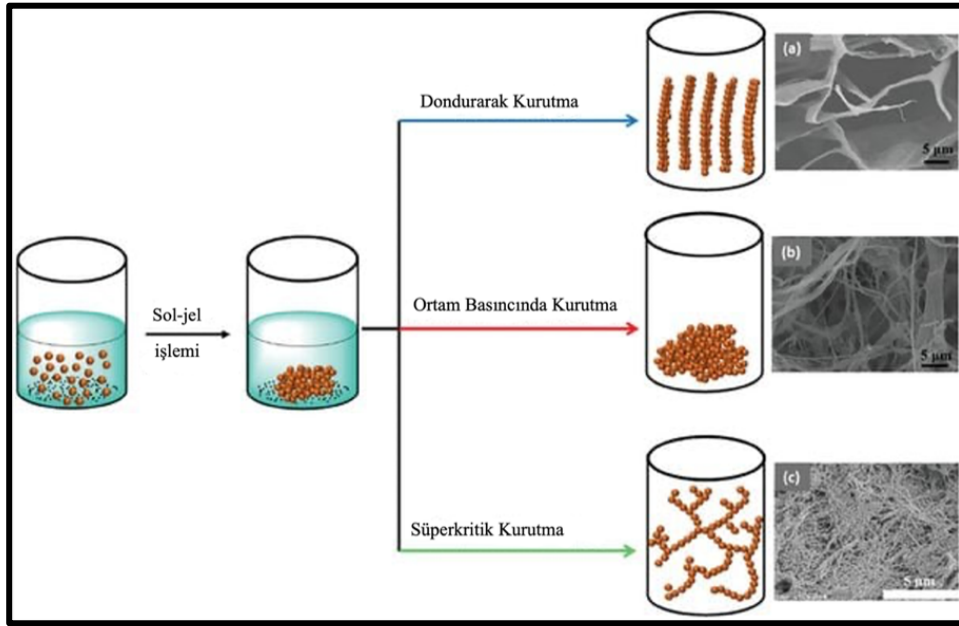
Bu çözelti, aerogel içindeki parçacıkların düzgün büyümesini ve bağlanmasını sağlamak için ideal olan 8 ila 9 arasında kontrollü bir pH değerinde tutulmaktadır. Bu yöntem, yüzey modifikasyonuna benzer etki göstermenin yanı sıra kurutma aşamasında silika malzemenin kırılmasını önlemeye yardımcı olmaktadır. Böylece aerogelin mekanik streslere karşı direncini önemli ölçüde artırarak yapısal bütünlük sağlanmaktadır (Pisarek vd., 2025).

Yaşlanma işleminin ardından; gözeneklerde kalan tüm sıvı, bir sonraki adım olan kurutma işleminden önce uzaklaştırılmalıdır. Bu amaçla jel içinde kalan katalizör, tepkimeye girmemiş öncül bileşenler, yüzey aktif maddeler ve diğer kalıntıları gidermek için genellikle bir

yıkama işlemi gerçekleştirilmektedir. Bu kirleticilerin varlığı, jelin hacim yoğunluğunu artırabilmekte ve opaklaşmasına neden olmaktadır. Yıkama işlemi genellikle jelin saf alkol içerisine batırılması ve gözeneklerdeki sıvının difüzyon yoluyla değiştirilmesi şeklinde gerçekleştirilmektedir (Smitha vd., 2006).

### 2.9.5.3. Jelin kurutulması

Sol-jel yönteminin son ve en önemli adımı “kurutma işlemi” olarak bilinmektedir. Bu uygulama, ilgili kılcal kuvvetlere neden olmadan çözücünün matris çerçevesinden çıkarılmasına ve jelin nano yapısının kısmi veya tamamen kaybına neden olan iki fazlı bir sisteme dayandırılmaktadır. Sıvı fazın uzaklaştırılması tahribatsız bir şekilde gerçekleştirilirse, düzenli şekil ve hacme sahip gözenekli bir katı elde etmek mümkün olmaktadır. Şekil 2.41.’de farklı kurutma yöntemlerinin aerogel ürününün mikro yapısına etkisi gösterilmiş olup şekil (T. Guo vd., 2024) kaynağından değiştirilerek yeniden çizilmiştir.



Şekil 2.41. Farklı kurutma yöntemlerinin aerogelin mikro yapısına etkisi.

Kurutma yöntemlerinin, elde edilen aerogelin yüzey alanı ve gözenekliliği üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu yaygın olarak bilinmektedir. Bu nedenle, nihai ürüne uygun kurutma yöntemi seçilmelidir (S. Zhao vd., 2020).

Sentez sırasında kullanılan çözücünün türüne bağlı olarak farklı kurutma yöntemleri tercih edilebilmektedir. Alkol, aseton ve alkanlar, yüksek basınçlı CO<sub>2</sub> ile karışabilmeleri veya düşük yüzey gerilimleri nedeniyle süperkritik kurutma ve ortam basıncında kurutma yöntemi için uygun çözücülerdir. Su ve t- bütanol ise iyi erime noktaları nedeniyle dondurarak kurutma yöntemine daha elverişlidir (Takeshita vd., 2025).

Aerogellerin kurutulmasında en yaygın kullanılan yöntemlerden biri “*atmosferik kurutma*” olarak da bilinen ortam basıncında kurutmadır. Bu yöntem; oda sıcaklığında ve basıncında veya sabit sıcaklığa ayarlanmış bir fırında, malzeme ağırlığı sabit kalana kadar kurutulması şeklinde gerçekleştirilmektedir. Ortam basıncında kurutma; düşük maliyet, düşük enerji tüketimi ve güvenli işlem basamakları gibi bazı avantajlara sahiptir. Süperkritik kurutma koşullarında olduğu gibi yüksek basınçlı ortam ve ekipmanlar gerektirmediğinden hem daha ucuz hem de daha güvenli bir yöntemdir. Bununla birlikte, ortam basıncında kurutma yöntemi durumunda jel gözeneklerindeki çözücünün heksan gibi yüksek buhar basınçlı (uçucu) susuz çözücülerle değiştirilmesi gerekmektedir. Bu işlemle jelin atmosfer koşulunda kurutulması sırasında büzülmesi de önlenmektedir. Atmosferik kurutma işlemi genellikle 50-120 °C aralıkta, sıcaklığın kademeli olarak artırılmasıyla gerçekleştirilmektedir. Basit bir prosedür olmasına rağmen bu yöntemde kurumanın tamamlanması 48 saatten fazla sürmektedir (Dhua vd., 2022). Bu nedenle kurutma süreci, düşük enerji maliyetli ve kolay olsa da zaman açısından nispeten uzundur.

Bir diğer yöntem olan “*süperkritik kurutma*”; düşük yoğunluklu aerogellerin üretiminde kullanılan en yaygın yöntemdir. Süperkritik sıcaklık, bir maddenin ne kadar basınç uygulanırsa uygulansın artık sıvı hale geçemeyeceği maksimum sıcaklık olarak ifade edilmektedir. Süperkritik kurutma işlemi ise herhangi bir karışımdan istenilen maddenin uygun bir çözücü yardımıyla yüksek ısı ve basınçta çekilerek ayrılması işlemine denilmektedir (Z. Li vd., 2025). Bu dönüşüm, oda sıcaklığına son derece yakın olan kritik bir sıcaklıkta gerçekleşmekte ve bu da aerogel oluşumuyla sonuçlanmaktadır. İşlem sonunda kılcal basınç ortadan kalktığından aerogelin gözenekli ve ağsı yapısı korunabilmektedir. Süperkritik kurutma işleminde, kapalı bir kaba yerleştirilen ve çözücü açısından zengin jel, karbondioksit veya nadiren metan gazına maruz bırakılmaktadır (Chemere vd., 2025). Bu işlem, reaktör içindeki sıcaklığı ve basıncı, jelin gözeneklerinde bulunan çözücünün kritik noktasının üzerine çıkardığında gözeneklerdeki sıvı, süperkritik akışkana dönüşmektedir. Bu aşamada, akışkanın her molekülü serbestçe hareket ettiğinden yüzey gerilimi ortadan kalkmakta ve kılcal kuvvet yok olduğundan gözenek yapısı deformasyona uğramadan korunmaktadır (Lázár & Fábıán, 2016). Kurutmanın ardından reaktördeki basınç yavaşça düşürülerek çözücü dışarı atılmakta ve aerogel dışarı alınmaktadır. Süperkritik kurutmada çözücü olarak etanol veya karbondioksit tercih edilmektedir. Ancak kullanılan organik çözücüler, süperkritik koşullarda patlayıcı ve yanıcı özellik sergilediğinden endüstriyel ölçekli üretimlerde güvenlik riskleri oluşturabilmektedir (Ubeyitogullari & Ciftci, 2017). Süperkritik kurutma yöntemi yüksek kalitede aerogel sentezi için en etkili yöntem olarak kabul edilmektedir. Ancak yüksek basınçlı reaktörlere ve hassas sıcaklık kontrolüne olan ihtiyaç

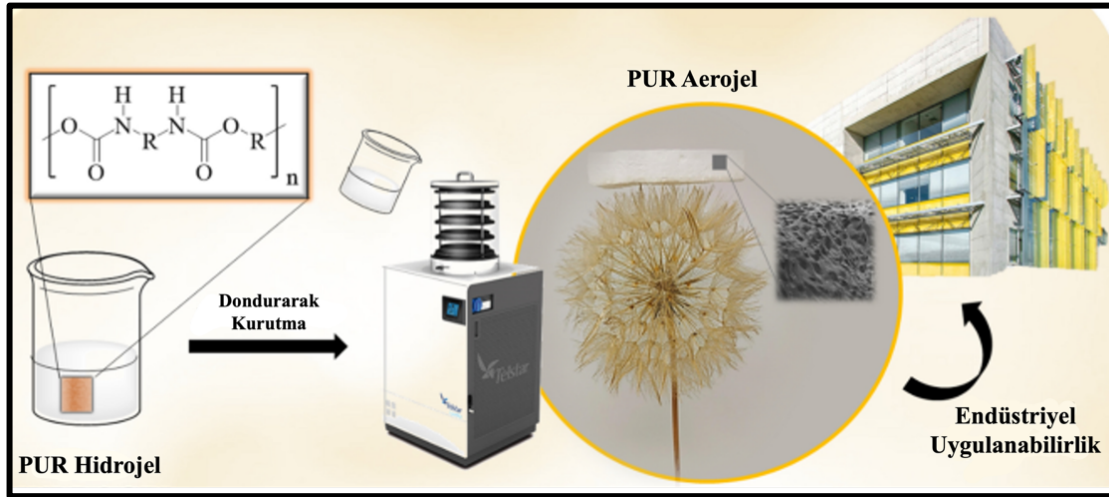
hem ekipman maliyetlerini hem de enerji tüketimini önemli ölçüde artırarak endüstriyel ölçekte üretimi zorlaştırmaktadır (Z. Li vd., 2025).

Üç boyutlu, birbirine bağlı mezo ve mikro gözenekli aerojeller elde etmenin etkili yollarından biri de “*mikrodalga kurutma*” yöntemidir. Mikrodalga kurutmanın prensibi, fırında hızlı ve düşük sıcaklıklarda gerçekleştiğinden enerji verimliliğine ek olarak zamandan da tasarruf sağlamaktadır. Mikrodalga'nın bir özelliği olan alternatif elektromanyetik alan etkisiyle, sıvı moleküller dönerek elektrik dipollerini hizalamaya başlar. Bu hareket, küresel molekül titreşiminde bir artışa neden olur ve moleküllerin kendi kendine ısınmasını sağlar. Bu durumda malzeme içerisinde homojen ısıtma gerçekleşir ve kuruma sırasında çatlak oluşumu azalır. Ortam basıncında kurutmanın aksine, bu işlem için gereken zaman ve enerji tüketimi daha az olduğundan yöntem; hızlı kuruma, düşük enerji tüketimi ve yapısal bütünlüğün sağlanması gibi avantajlar sunmaktadır. Bu yöntemde; dondurarak kurutma yoluyla elde edilen aerojellerle neredeyse özdeş yapılar oluşturulsa da aerojelde makro gözenekler çok daha küçük boyuttadır. Endüstriyel uygulaması şu anda sınırlı olsa da ekipman tasarımı ve proses kontrolündeki devam eden gelişmeler, mikrodalga destekli kurutmanın gelecekte verimli ve çevre dostu bir alternatif olabileceğini düşündürmektedir (X. Zhang, Chen, vd., 2021).

Aerajellerin geliştirilmesi sırasında, ıslak jeli kurutmak için kullanılan yöntemlerden biri de “*vakum kurutma*” yöntemidir. Bu yöntemle yüksek özgül yüzey alanına ve geniş gözenekli yapıya sahip aerajellerin elde edilmesi mümkündür (El-Naggar vd., 2020). Alternatif kurutma tekniklerinin aksine, vakumlu kurutma, yüzey modifikasyonu için gelişmiş kolaylık sunarak gerekli kurutma süresini azaltmaktadır (Doke vd., 2021). Ayrıca süperkritik kurutmaya kıyasla daha kısa süreli ısı kullanımını gerektirdiğinden bu teknik yüksek basınç, yüzey modifikasyonu veya zorlu çözücü değişimi süreçlerinde özel ekipman gerektirmeden enerji ve zamandan tasarruf sağlamaktadır.

Yaygın kullanılan bir diğer yöntem ise “*dondurarak kurutma*” tekniğidir. Dondurarak kurutma; ıslak jeldeki sıvının önce katı faza dönüşmek üzere dondurulması, ardından düşük basınç altında, vakum ortamında doğrudan gaz fazına süblimleştirilmesi şeklinde gerçekleşmektedir (Linhares vd., 2019). Yöntem, ortam basıncında kurutmanın neden olabileceği gözenek çökmesi ve kırılma olasılığını azaltmada avantaj sağladığından çeşitli türden aerajellerin üretiminde yaygın kullanılmaktadır. Dondurarak kurutma işlemi, genellikle iki aşamalı olarak gerçekleşmektedir. İlk aşama, ıslak jelin -45 °C ile -15 °C arasındaki bir sıcaklıkta katı duruma dönüştürüldüğü “*ön dondurma*” adımıdır. İkinci aşamada ise katı haldeki çözücünün vakum altında gaza dönüştüğü bir “*süblimleşme*” adımıdır. Bu aşama, aerajel matrisinde gözeneklerin oluşumunu sağlamaktadır (Ni vd., 2016). Ön dondurma aşamasında,

sıvı fazda gelişen buz kristalleri hacim artışına neden olmaktadır. Bu oluşum, kabuk katmanlarının büzülmesi ve kırılması ile sonuçlanmaktadır. Ayrıca buz kristallerinin farklı hızlarda düzensiz büyümesi aerogelin gözenek yapısının homojenliğini azaltmaktadır. Süreç sonunda dondurularak kurutulan aerojeller makro gözenekli ve çatlaklı yapı sergileyebilmektedir. Şekil 2.42.'de dondurarak kurutma yöntemiyle elde edilen aerogelin hazırlanma süreci ve endüstriyel uygulaması gösterilmekte olup şekil; (Cantero vd., 2023) kaynağından değiştirilerek yeniden oluşturulmuştur.

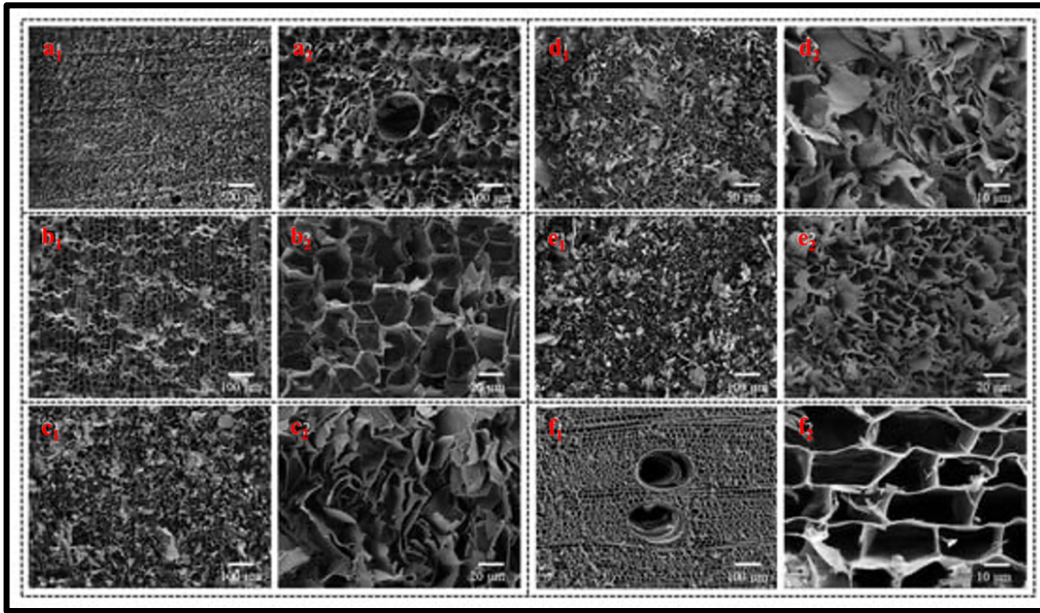


Şekil 2.42. Dondurarak kurutma yöntemiyle aerogel hazırlanma süreci.

Dondurarak kurutma yönteminde çözücü, genellikle  $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$  ila  $-85\text{ }^{\circ}\text{C}$  arasındaki sıcaklıkta veya sıvı azot kullanılarak dondurulmaktadır. “*Liyofilizasyon*” adı verilen bu yöntemde gözeneklerde hapsolmuş çözücü, düşük basınç ortamındaki vakumda kurutulmaktadır (Niculescu vd., 2024). Bu yöntem, son yıllarda sentez sürecinin önemli bir parçası olarak öne çıkmaktadır. Büyük ölçekli üretimler ve yüksek kalitede aerogel elde etmek amacıyla bu yöntem kullanılabilir. Yöntemin en önemli avantajları; sentez sürecinde kullanılan hassas bileşiklerin verimli bir şekilde korunması, yapı bütünlüğünün muhafaza edilmesi, ürün kalitesi ve kararlılığının kontrolüdür. Ayrıca bileşiklerin bünyesindeki çözücü düşük sıcaklıklarda hızla buharlaşarak katı faz durumuna geçtiğinden yapı bütünlüğü korunmakta ve homojen, düzenli gözenekli bir yapı elde edilmektedir (Członka vd., 2018). Dondurarak kurutma yöntemi ile ürün kalitesi ve verimi artarken aynı zamanda sürdürülebilir üretim olanağı sağlanır. Bununla birlikte üretim sürecinin uzaması enerji tüketiminde artışa sebep olacağından büyük hacimli üretimlerde homojen yapıyı korumak ve kalitedeki tutarlılığı sağlamak amacıyla yöntemin her aşamasının izlenmesi gerekmektedir. Gelecekteki araştırmalar, dondurarak kurutma yöntemindeki süreci iyileştirecek yeni tekniklerle süreci optimize etmeyi hedefleyerek üretim sürecini kısaltabilecek, enerji verimini artırabilecektir. Sonuç olarak bu yöntem çevre dostu, basit ve ekonomiktir.

Ayrıca azaltılmış büzülme, yapısal bütünlük ve yüksek gözenekliliğe sahip aerogel elde edilmesini sağlayan sürdürülebilir ve etkin bir yöntem olarak ön plana çıkmaktadır (Linhares vd., 2019).

Kurutma aşaması, aerogel üretiminde son aşama olup nihai ürünün yapısal ve fiziksel özelliklerini belirleyen en kritik işlemdir. Aerogelin özgül yüzey alanı, gözenekliliği, mekanik dayanımı ve termal kararlılık performansı kurutma aşamasından doğrudan etkilenmektedir (Bisson vd., 2003). Kurutma aşamasında gözenek yapının korunması için sıvı fazın iskelet yapıyı bozmadan gözeneklerden uzaklaştırılması esastır. Ancak bu işlem, rastgele bağlı nanopartiküllerden oluşan üç boyutlu yapının yüksek kırılgenliği nedeniyle oldukça zordur. Farklı kurutma yöntemleri, farklı özelliklere sahip aerogellerin elde edilmesine olanak tanır. Şekil 2.43.'te farklı yöntemlerle sentezlenmiş ahşap aerogellerin ve balsa ağacının mikro yapı özelliklerini yansıtan SEM görüntüleri verilmiştir. Şekilde; (a<sub>1</sub>, a<sub>2</sub>) dondurarak kurutulmuş ahşap aerojeli, (b<sub>1</sub>, b<sub>2</sub>) süperkritik CO<sub>2</sub> ile kurutulmuş ahşap aerojeli, (c<sub>1</sub>, c<sub>2</sub>) vakumla kurutulmuş ahşap aerojeli, (d<sub>1</sub>, d<sub>2</sub>) etüvde kurutulmuş ahşap aerojeli, (e<sub>1</sub>, e<sub>2</sub>) doğal olarak kurutulmuş ahşap aerojeli ve (f<sub>1</sub>, f<sub>2</sub>) balsa ağacını tanımlamaktadır (M. Yin vd., 2025).



Şekil 2.43. Selüloz kökenli bir aerogel numunesinde farklı kurutma yöntemlerinin mikro yapıya etkisi.

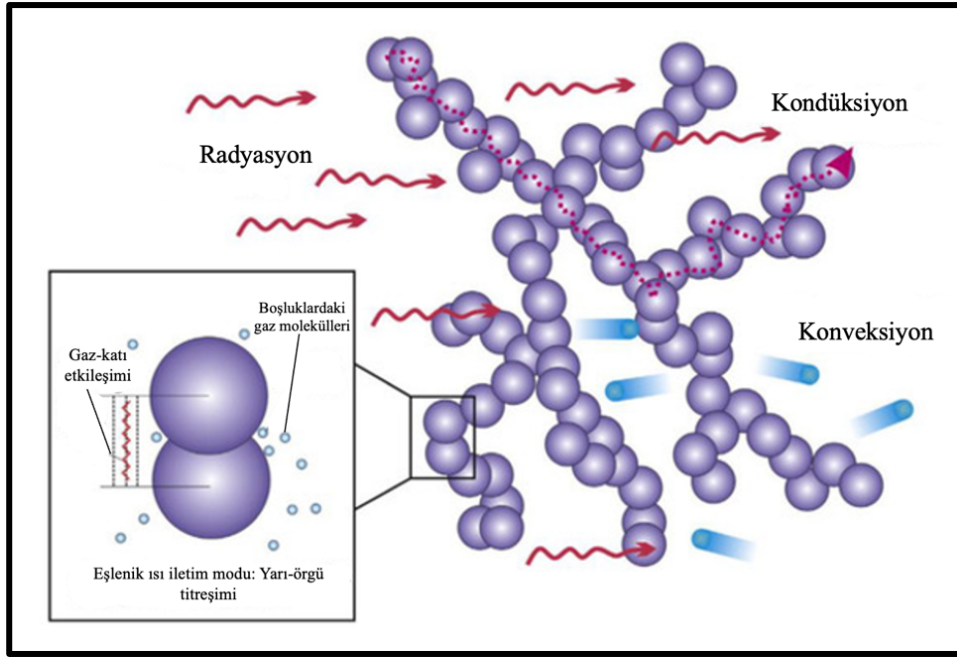
Çalışmaya göre; dondurarak kurutma ve süperkritik kurutma yöntemiyle elde edilen üründe odun yapısı büyük oranda korunarak açık gözenek yapı muhafaza edilmiştir. Diğer yöntemlerde ise yapısal büzülme ve hücre duvarında çökme gözlemlendiği rapor edilmiştir (M. Yin vd., 2025).

Süperkritik kurutma, aerogel yapısını korumadaki etkinliğiyle bilinmektedir. Ancak yüksek basınç ve sıcaklık gereksinimi yüksek enerji tüketimine sebep olduğundan yöntemin ölçeklenebilirliği sınırlanmakta ve üretim maliyetleri artmaktadır. Öte yandan dondurarak kurutma ve ortam basıncında kurutma gibi alternatif yöntemler maliyet, işleme kolaylığı ve aerogelin fiziksel özellikleri arasında farklı dengeler kurmada kolaylık sağlamaktadır (Stojanovic vd., 2019). Aerogelin yapısal bütünlüğünü tehlikeye atan kılcal kuvvetlerin oluşumunu azaltmak, kurutma koşullarının optimize edilmesiyle mümkündür. Böylece aerogeller; ısı yalıtım uygulamaları, havacılık ve inşaat endüstrilerindeki yük taşıyıcı bileşenler gibi gelişmiş uygulamalar için iyi bir ürün haline gelecektir.

### 2.10. Aerojelerde ısı iletim mekanizması

Bilindiği gibi; termal enerjinin yalıtkan bir malzemedeki geçişi üç farklı mekanizma ile gerçekleşmektedir. Bunlar; katı iletim, gaz iletim ve radyatif iletimdir. Bu üç bileşenin toplamı, bir malzemenin toplam termal iletkenliğini vermektedir. Gözenekli malzemelerde ısı transferi konveksiyonel akımlar ve radyasyon yoluyla sağlanmaktadır (B. Ma vd., 2023). Aerogeller yüksek özgül yüzey alanına ve düşük yoğunluğa sahip mezo gözenekli amorf malzemelerdir. Aerogelde nano parçacıklar rastgele bir araya gelerek ısı iletimini sınırlandıran üç boyutlu ağ yapısı oluşturmaktadır. Nano ölçekli gözenek boyutu ve yapısı nedeniyle, normal sıcaklık ve basınç altında termal iletkenliği, serbest havanın termal iletkenliğinden daha düşüktür. Bu malzemeler eşsiz ısı yalıtım performansı nedeniyle “*süper yalıtım malzemeleri*” olarak da bilinmektedir (C. Li vd., 2021).

Şekil 2.44.’te aerogellerin ısı transfer mekanizmasının şematik gösterimi verilmiştir. Şekilde; mavi renkteki küçük parçacıklar, farklı gaz molekülleri arasında gerçekleşen ısı transferini temsil ederken, kırmızı renkteki dalgalı ok radyasyonla iletimi göstermektedir. Kırmızı noktalı çizgi ise katı iskelet yapısı boyunca gerçekleşen konduksiyonla ısı transferini temsil etmektedir. Şekil, (Qu vd., 2018) kaynağından değiştirilerek yeniden çizilmiştir.



Şekil 2.44. Aerojel yalıtım malzemelerinde ısı transfer mekanizması.

Katı hal ısı transferi, esas olarak iletim elektronlarının hareketi veya yerel kafes yapıların termal titreşimleri yoluyla gerçekleşmektedir. Aerojel gibi nanometre ölçeğinde gözenek boyutlarına sahip bir malzemede sistem önemli ölçüde sınırlıdır. Boyut etkisi sebebiyle iskelet yapı küçüldükçe fonon saçılması artmaktadır. Bu durum fononların ortalama serbest yolunu kısaltarak katı hal ısı iletiminde önemli bir azalmaya yol açmaktadır. Ayrıca bu tür malzemelerin karmaşık, seyrek ve kıvrımlı iskelet yapısı ısı transfer yolunu uzatarak ilave termal direnç oluşmasına, dolayısıyla katı faz termal iletkenliğinin daha da azalmasına neden olmaktadır. Katı ve gaz fazları arasındaki minimum etkileşim, genel ısı transferini daha da azaltmakta ve aerojellerin ultra düşük termal iletkenliği ortaya çıkmaktadır (B. Wu vd., 2024).

Aerajellerin ortalama gözenek boyutu, havadaki gaz moleküllerinin izleyeceği serbest yoldan (yaklaşık  $69 \text{ nm}$ ) daha küçük olduğundan gaz moleküllerinin serbest hareketi kısıtlanmaktadır. Bu durum Knudsen etkisini ortaya çıkarmakta ve gaz molekülleri arasındaki ısı transferi ciddi şekilde zayıflamaktadır (Fesmire, 2019). Bu nedenle aerajellerde ısı transferi, iletim ve termal radyasyon mekanizmalarıyla gerçekleşirken, etkili konveksiyon sağlanamadığından taşınım ısı transferi ihmal edilmektedir. Bu özellik, geleneksel yalıtım malzemelerine kıyasla aerajelleri daha avantajlı hale getirmektedir (Lee vd., 2002). Aerajellerin nano gözenekliliği, yalnızca katı ve gaz haldeki ısı transferini sınırlamakla kalmayıp, aynı zamanda radyatif ısı transferine karşı kalkan görevi görmektedir. Bununla birlikte, yaklaşık  $3\text{-}8 \mu\text{m}$  dalga boylarına sahip yakın kızılötesi radyasyona karşı yüksek geçirgenliğe sahiptir. Bu durum, aerajelin yüksek sıcaklıkta koruma performansını zayıflatmakta ve sıcaklığın artmasıyla

ısı iletkenlik önemli ölçüde artmaktadır (F. Lou vd., 2023). Dolayısıyla, aerojellerde farklı ısı transfer mekanizmalarının detaylı bir şekilde analiz edilmesi ve termal iletkenlik davranışının doğru anlaşılması, ileri mühendislik uygulamaları için büyük önem taşımaktadır.

Monolitik silika aerojeller mükemmel ısı yalıtımı sunarken, bu malzemelerin polimer matrislerle kompozit formda üretilmeleri ısı iletim davranışında ek karmaşıklıklar meydana getirmektedir. Silika aerojel-polimer kompozitlerde, ısı iletkenlik yalnızca parçacık boyutu ve gözeneklilik tarafından değil, aynı zamanda gözenek ölçeğindeki yapı, katı faz bağlantısı ve matris infiltrasyonu arasındaki etkileşimlere bağlıdır. Bu faktörler özellikle Knudsen etkisi ve fonon saçılması gibi temel mekanizmaları birlikte çalıştırmaktadır. Knudsen etkisi, gözenek boyutunun gaz moleküllerinin ortalama serbest yoluna eşit veya ondan daha küçük olduğu durumlarda etkin hale gelmektedir (J. Liu vd., 2022). Aerojel sentezinde polimer matrisin eklenmesiyle, polimer yapı kısmi olarak aerojel gözeneklerine sızmaktadır. Bu durum gözenek boyutunu artırabilmekte ve nano gözeneklerin tıkanmasına sebep olmaktadır. Bu durumda Knudsen etkisine bağlı olarak çalışan gözeneklerin oranı ve dolayısıyla gaz fazı katkısı azalmaktadır (Almeida vd., 2021).

Aerojel kompozitte katı fazda fonon saçılması, aerojel parçacıkları ile polimer matris arasındaki arayüz bölgelerinde meydana gelmektedir. Bu etki, katı faz termal taşınımın azaltılmasına katkıda bulunmaktadır. Öte yandan sürekli veya yarı sürekli bir polimer matrisin varlığı, polimer katkısız aerojellere kıyasla katı faz bağlantısını artırabilmektedir. Böylelikle, makroskobik düzeyde ısı iletim yolları yeniden oluşturulmakta ve kompozit sistemde taşınımın ısı transferi kısmi olarak korunmaktadır (Qian vd., 2021). Sonuç olarak, aerojel-polimer kompozitlerinde optimum termal yalıtım elde etmek için nano gözenek yapı muhafaza edilmelidir. Buna bağlı olarak gelişen Knudsen etkisinin korunması ve arayüz oluşumunun sağlanması yoluyla fonon saçılmasının artırılması prensipleri dengeli bir biçimde yönetilmelidir (K. I. Goryunova & Gahramanli, 2024).

### **2.11. Aerojellerin genel uygulama alanları**

Aerojeller; ultra hafif yapıları, yüksek gözeneklilikleri ve üstün yalıtım özellikleri sayesinde modern mühendislik uygulamalarının değerli bir parçası olarak kabul edilmektedir. Bu malzemeler 1930'larda Samuel Kistler tarafından ilk kez ortaya atıldığından beri hem akademik araştırmaların hem de endüstriyel uygulamaların ilerlemesinde önemli rol oynamıştır (Mazrouei-Sebdani vd., 2021). Aerojellerin güncel kullanım alanları arasında; ısı yalıtım malzemeleri, zararlı bileşik adsorbanları, sensörler, dielektrik malzemeler, gaz filtreleri,

Cherenkov dedektörleri, kinetik enerji emiciler, katalizörler ve koruyucu giysiler yer almaktadır (Jalali vd., 2013; Tabata vd., 2012).

### **2.11.1. Pratik ve mühendislik uygulamaları**

Aerojellerin gözenek yapısı ve parçacık boyutlarının denetlenebilir olması özellikle ısı yalıtımı, biyomedikal mühendisliği, çevre iyileştirme, enerji depolama ve sensör teknolojileri gibi ileri düzey uygulamalar için oldukça umut verici hale getirmektedir (S. Zhang vd., 2023). Aerojellerin gözenekli yapılarında bulunan mikro ve mezo gözeneklerin bolluğu, sıvı ve gaz fazındaki kirleticilerin tutulmasına uygun geniş adsorpsiyon yüzeyi sağlamaktadır. Bu özellik, aerojellerin çevresel iyileştirme çalışmalarında kullanılmasına olanak tanımaktadır. Özellikle petrol sızıntılarının giderilmesi ve kirleticilerin uzaklaştırılmasında üstün performans sağlamaktadır. Nitekim Meksika Körfezi petrol sızıntısı sırasında kullanılan aerojel tabanlı malzemeler, sızıntı petrolün etkili bir şekilde toplanmasını sağlayarak çevresel kriz yönetiminde potansiyelini ortaya koymuştur (B. Huo vd., 2019).

Enerji depolama ve dönüşüm uygulamalarında, karbon ve grafen gibi iletken aerojeller, yüksek özgül yüzey alanı sayesinde aktif yük depolama kapasitelerini artırmaktadır. Bu yapı, elektrolit iyonlarının hızlı difüzyonunu ve göçünü kolaylaştırarak elektrotta iyon taşıma verimliliğini sağlamaktadır. Mükemmel elektriksel iletkenlikleri ise esnek sensörler, süperkapasitörler ve enerji depolama sistemleri için aerojelleri uygun hale getirmektedir. Ayrıca aerojellerin yumuşak yüzeylerle entegrasyonu, tekrar eden mekanik deformasyonlar altında bile mükemmel performans kararlılığı sağlayarak giyilebilir elektronik cihazların üretimini mümkün kılmaktadır (Mazrouei-Sebdani vd., 2021).

Biyomedikal alanında; selüloz, jelatin, kitosan gibi doğal polimerlerden türetilen aerojeller mükemmel biyoyumluluk ve biyo-bozunurluk sergilemektedir. Bu özellikler aerojelleri kontrollü ilaç salınımı, yara iyileştirme ve doku mühendisliği gibi uygulamalar için kullanılabilir hale getirmektedir (X. Zhang, Zhou, vd., 2021). Sonuç olarak aerojeller; mevcut teknolojik alanların yanı sıra enerji verimli ve biyoyumlu sistemler dahil olmak üzere birçok alanda kritik zorlukların üstesinden gelme potansiyeline sahip, devrim niteliğinde malzemelerdir (Z. Li vd., 2025).

### **2.11.2. Endüstriyel kullanımı ve ticarileşme süreci**

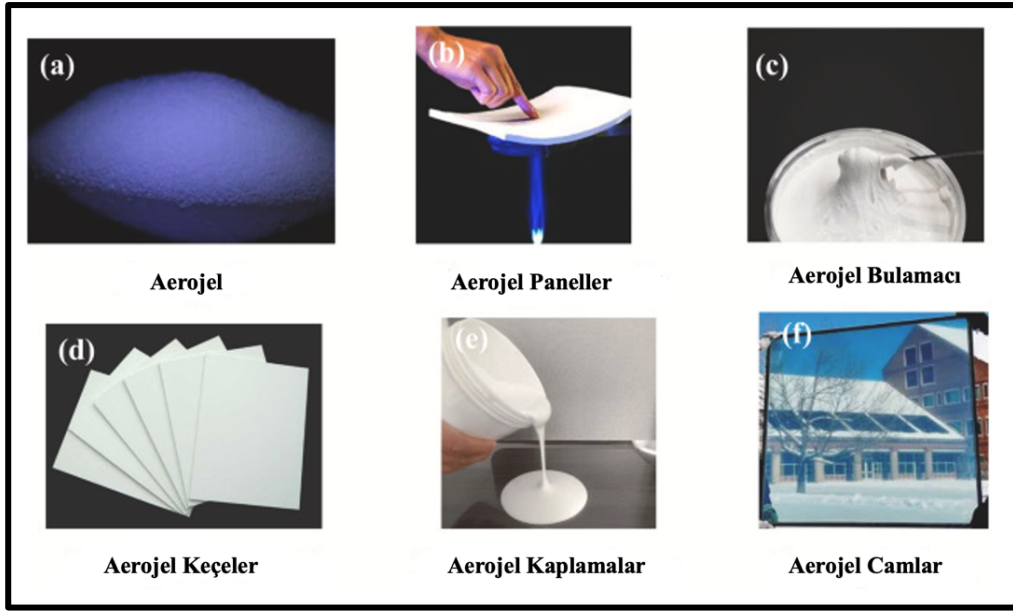
Aerojeller, çeşitli endüstriyel alanlarda önemli potansiyele sahip malzemelerdir. Özellikle silika aerojeller, diğer türler arasında pazar payı en yüksek olan aerojel türü olarak öne çıkmaktadır. Ancak silika aerojellerin içsel mekanik zayıflıkları daha geniş çapta benimsenmesi ve endüstrilerdeki pratik uygulamalarını önemli ölçüde sınırlamaktadır (Azum vd., 2021).

Monolitik formdaki aerojeller düşük yoğunluklu olmalarının bir sonucu olarak oldukça kırılabilir yapı sergilemektedir. Bu durum, yapısal bütünlük ve dayanım gerektiren havacılık, otomotiv, inşaat ve enerji sistemleri gibi mühendislik uygulamalarında doğrudan kullanımını güçlendirmektedir. Bu yapısal zayıflıkları gidermek amacıyla son yıllarda yürütülen çok sayıda çalışma, aerojellerin istenen termal ve yapısal özelliklerinden ödün vermeden mekanik dayanımlarını artırmaya odaklanmaktadır (Iswar vd., 2021). Bu stratejiler, aerojellerin mevcut avantajlarını koruyarak fiziksel sınırlamalarının üstesinden gelmeyi amaçlamakta ve malzemenin yüksek sıcaklık, basınç veya titreşim ortamlarında etkili performans sergilemesini sağlamaktadır. Bu gelişmeler aynı zamanda aerojellerin ticari ve endüstriyel uygulamalarda yaygın kullanımının önünü açmaktadır (Firoozi vd., 2025).

Dayanıklılık sınırlamasının üstesinden gelmek için kullanılan en yaygın uygulama, aerojel matrislerinin polimerlerle çapraz bağlanmasıdır. Bu yöntemle aerojelde kırılabilirlik önemli ölçüde azaltılarak esnek kompozit sistemler geliştirilmektedir. Günümüzde ticarileşmiş kompozit aerojel türleri arasında aerojel-dokunmamış kumaş battaniyeler, aerojel-polimer levhalar ve paneller, aerojel katkı çimento, aerojel sıva gibi kompozitler veya toz, granül ve granül dolgululu camlar yer almaktadır. Bu ürünler esas olarak konut yalıtımı, endüstriyel izolasyon, ulaşım araçları, koruyucu giysi ve ısı depolama sistemleri gibi alanlarda ısı yalıtımı amacıyla kullanılmaktadır (Takeshita vd., 2025). Silika aerojeller kadar yaygın olmasa da inorganik ve polimerik esaslı birçok aerojel türü için ticarileşme örnekleri bulunmaktadır. Örneğin; karbon aerojeller elektriksel iletkenlikleri sayesinde elektrot ve süperkapasitör gibi pil uygulamaları için kullanılırken; poliüre, poliüre modifiye silika, poliimid, poliamid, polibenzoksazin ve biyopolimer esaslı aerojeller ise kozmetik, gıda endüstrisi, tıp ve ileri mühendislik uygulamalarında yaygınlaşmıştır (S. Zhao vd., 2015).

## **2.12. Aerojellerin inşaat mühendisliği uygulamaları**

Aerajellerin çok sayıda alanda kullanıldığı bilinmekle birlikte en önemli uygulamaları inşaat sektöründe gerçekleştirilmektedir. Özellikle silika aerajeller; düşük ısı iletkenlikleri, gözenek yapısı ve hafiflikleri nedeniyle inşaat sektöründe geniş uygulama potansiyeline sahiptir. Bu malzemeler bina kabuğunda cephe ve duvar kaplamaları, çatı yalıtımı, kompozit yapı bileşenleri ile pencere arası dolgu malzemesi olarak kullanılmaktadır (S. Yao vd., 2026) (Şekil 2.45.).



Şekil 2.45. Yapı sektöründe kullanılan tipik aerojel formları.

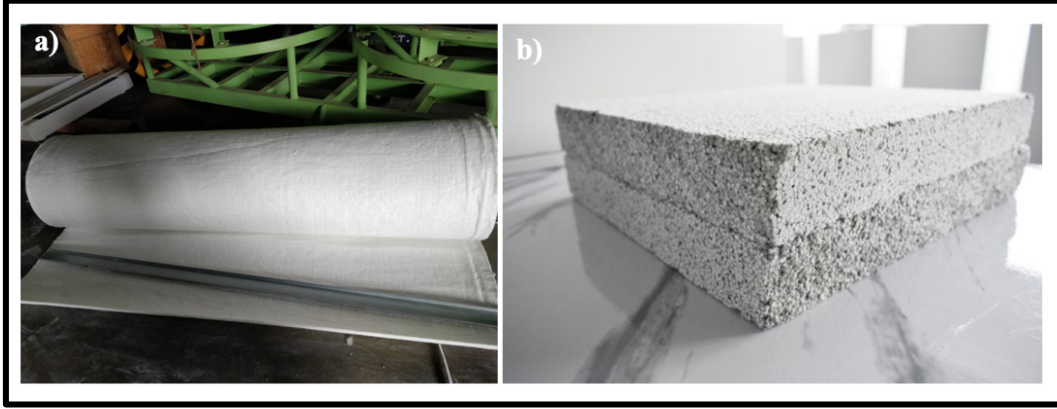
Yapı sektöründe aerojel uygulamalarına yönelik çok sayıda çalışma mevcuttur. Örneğin; betonda kumun kısmen silika aerojellerle değiştirilmesiyle  $0,085 \text{ W}/(\text{m.K})$  ısı iletkenliğine ve  $410 \text{ kg}/\text{m}^3$  yoğunluğa sahip hafif harçlar elde edilmiştir (Júlio vd., 2016). Benzer şekilde aerojel ve takviye lifleri içeren köpük beton duvarların uygulamasında %35 oranda enerji verimliliği artışı sağlamış, ayrıca  $0,162 \text{ W}/(\text{m.K})$  ısı iletkenliği ve  $4,12 \text{ MPa}$  basınç dayanımına ulaşmak mümkün olmuştur (P. Liu vd., 2021).

Silika aerojellerin çimento sıvalarında agrega olarak kullanılma potansiyelinin incelendiği bir çalışmada, geleneksel çimento sıvalarından belirgin şekilde daha düşük ısı iletkenliği ( $0,085 \text{ W}/\text{m.K}$ ) ve yoğunluk ( $0,41 \text{ g}/\text{cm}^3$ ) değeri elde edilmiştir (Ganobjak vd., 2020). Benzer şekilde aerojel parçacıkların beton matrislerine entegrasyonunda; geleneksel agregaların yerini kısmen veya tamamen alabileceği ve betonun ısı yalıtım performansının artabileceğini bildirilmiştir (Rostami vd., 2021).

Silika-silan hibrit takviyeli aerojel kompozitler, malzemenin yalıtım performansını korurken aynı zamanda  $21 \text{ MPa}$  basınç dayanımına ulaşarak mekanik dayanımı artırdığı rapor edilmiştir (Iswar vd., 2018). Bazı çalışmalar, modifiye edilmiş silika aerojellerin  $300 \text{ }^\circ\text{C}$ 'nin üzerindeki sıcaklıklara maruz kaldıktan sonra bile hidrofobik yapısını koruyabildiğini göstermektedir (G. Liu vd., 2012).

Geniş ölçekli uygulamalara örnek olarak; 1989 yılında inşa edilen bir binaya  $6 \text{ mm}$  kalınlığında bir aerojel sıva uygulanmış ve sonrasında duvarın ısı iletkenliğinin  $1,0 \text{ W}/(\text{m.K})$  'dan  $0,3 \text{ W}/(\text{m.K})$  'ye düştüğü bildirilmiştir. Ayrıca kullanılan sıva, dışarıdan su geçirmezken içerideki nemin dışarı çıkmasına izin verecek şekilde tasarlanmış olmasıyla da ön plana çıkmıştır

(H. Zhang vd., 2020). Endüstriyel uygulamalarda aerojel kompozitler; yalıtım kalınlığını önemli ölçüde azaltarak, alandan tasarruf sağlaması ve nakliye maliyetlerini düşürmesiyle dikkat çekmektedir (Şekil 2.45.).



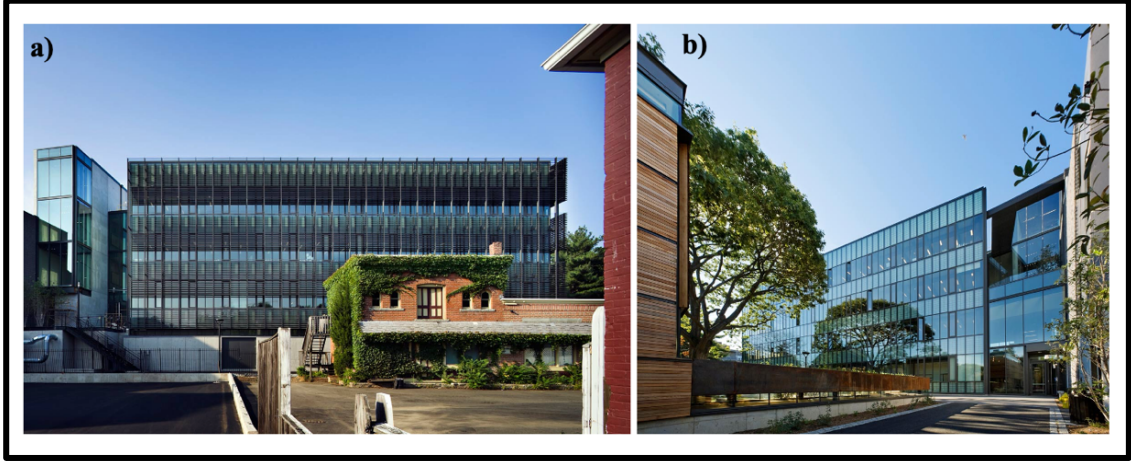
Şekil 2.46. Çeşitli formlarda aerojel yalıtım malzemeleri. a) şilte form, b) levha form (Therealtytoday, 2026).

Hafif ve kompakt yapıları, boru hatları ve endüstriyel ekipmanlarda ısı kaybını azaltarak enerji verimliliğini artırdığı bilinmektedir. Bu avantajlar, aerojelleri hem inşaat hem de endüstriyel alanlarda sürdürülebilir ısı yönetimi bakımından umut verici çözümler olarak konumlandırmaktadır (Z. Li vd., 2025). Yalıtım alanında ortaya koyduğu tüm yeniliklere rağmen inşaat sektöründe aerojel bazlı malzemelerin yaygın kullanımı, yüksek maliyetleri, sınırlı mekanik dayanımları ve içsel kırılma eğilimleri nedeniyle kısıtlıdır (Z. Liu vd., 2025). Ayrıca silika aerojellerin yüzeyindeki hidroksil grupları, uzun süre nemli bir ortama maruz kaldıklarında su emerek aerojellerin çatlamasına neden olabilmektedir. Aerojellerin mekanik özelliklerini iyileştirmek ve uygulanabilirliğini artırmaya yönelik gerçekleştirilen araştırmalar umut verici olsa da malzemenin uzun vadeli istikrarı henüz sağlanamamaktadır.

### 2.12.1. Saydam yapı elemanları ve cam sistemleri

Aerojellerin mühendislik uygulamalarından biri aerojel esaslı cam sistemleridir. Bu malzemeler, mimari tasarım ve enerji verimliliğinde devrim niteliğinde bir gelişmeyi temsil etmektedir. Bu sistem ilk olarak 1980'lerde ortaya atılmış ve sonraki on yıllarda önemli ölçüde ilerleme kaydedilmiştir. Aerojel bazlı cam sistemlerine yönelik çalışmalar optik geçirgenliği ve ısı yalıtım performansını artırmaktadır. Böylece iç mekan termal konforunu iyileştirmek ve enerji tüketimini azaltmak amaçlanmaktadır (Hassani vd., 2022). Aerojel bazlı cam sistemleri, olağanüstü düşük ısı iletkenlikleri sayesinde geleneksel cam sistemlerine kıyasla üstün performanslarıyla tanınmaktadır. Bu alandaki yenilikler arasında hem monolitik hem de granüler aerojel bazlı sistemler yer almaktadır. Mimari uygulamalardaki somut bir uygulama olarak; Yale Üniversitesi Heykel Binası ve Galerisi'dir. KieranTimberlake mimarlık ofisi tarafından

tasarlanan ve 2007 yılında tamamlanan bina, granüler silika aerojelin cam sistemlerinde kullanıldığı en başarılı örneklerden biridir. Şekil 2.47.'de Yale Üniversitesi Heykel Binası ve Galerisi (a) ile silika aerojel katkılı cam sistemlerinin uygulama örneği (b) yer almaktadır.



Şekil 2.47. Saydam yapı elemanları ve cam sistemlerinde aerojel uygulama örnekleri (Kierantimberlake, 2026).

Bir diğer çalışmada arasına aerojel tozu yerleştirilmiş ve alüminyum braketlerle kapatılmış iki adet 6 mm cam panelden oluşan bir cam sistemi geliştirilmiştir. Bu aerojel cam sistemi yalnızca konforlu bir iç mekan görsel ortamı sağlamakla kalmayıp, aynı zamanda geleneksel tek camlı sistemlere kıyasla klima gereksinimlerini azaltarak ısı kaybını sınırlandırmış ve önemli ölçüde enerji tasarrufu sağladığını göstermiştir (D. Li vd., 2022). Benzer şekilde granüler silika aerojel ile doldurulmuş iki adet 16 mm boyutunda şeffaf plastik levha içeren bir cam sistemi geliştirilmiş ve %35 oranında güneş enerjisi geçirgenliği ve 0,5 W/(m.K) değerinde düşük bir ısı iletkenlik katsayısı rapor edilmiştir. Aerojel cam sistemlerinin optik ve termal performansı üzerinde aerojel parçacık boyutunun etkisi de oldukça önemli olmuştur. Uygulamada, cam ünitelerinde kullanılan daha büyük aerojel granüllerinin, ısı kaybını %58 ve ısı geçirgenliği %38 oranda düşürebileceğini gözlemlenmiştir. Bulgular, parçacık morfolojisi ve boyut dağılımının aerojel esaslı cam sistemlerinin performansındaki önemini ortaya koymuştur (Y. L. Liu vd., 2023).

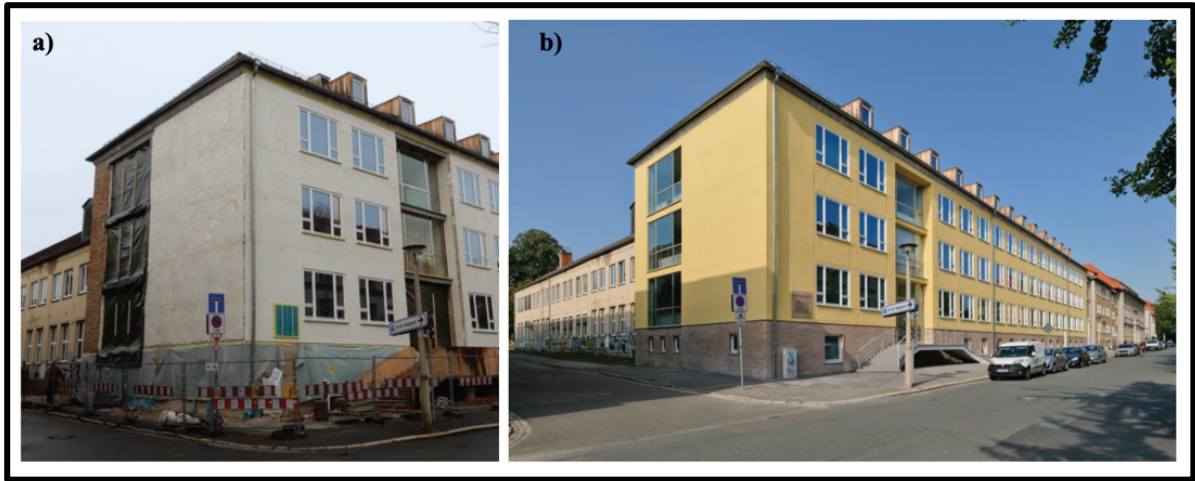
### 2.12.2. Yalıtım harçları ve dış cephe kaplamaları

Cam sistemlerine ek olarak nano arojellerin bina yalıtımında kullanımı, araştırma ve endüstriyel ölçekte giderek artan bir ilgi görmektedir. Bunlar; aerojel bazlı sıvalar, çatı panelleri, VIP'lar ve yalıtım örtüleri gibi çeşitli yalıtım çözümlerinin geliştirilmesinde önemli rol oynayan yenilikçi uygulamalardır (Firoozi vd., 2025). Mevcut çalışmalar, inşaat uygulamalarında aerojel bazlı malzemelerin kullanımıyla binalarda enerji tüketiminin %30'un üzerinde azalabileceğini göstermektedir (Strzałkowski & Garbalińska, 2022). Bununla birlikte, uygulamanın

ölçeklendirilmesi, arayüz ve aerojel malzemelerinin ısı transfer mekanizmasındaki etkileşimlerinin nasıl gerçekleştiği konusundaki çalışmalar halen devam etmektedir.

Aerojel esaslı yalıtım harçları, çimento esaslı bir matrisin granül silika aerojel eklenmesiyle elde edilmektedir. Literatürde yer alan bir çalışmada; aerojel katkılı harçta %60 aerojel içeriği ile 0,1524 W/(m.K) ısı iletkenlik değeri elde edilmiştir. Harçta, SiO<sub>2</sub> aerojel oranı hacimce arttıkça, harcın yoğunluğu doğrusal olarak azalmıştır. Buna ek olarak, aerojel parçacıklarının doğası gereği düşük dayanıma sahip olması, aerojel oranındaki artış harcın basınç ve eğilme dayanımını önemli ölçüde azaltır. Deneysel sonuçlar, harcın 28 gün sonraki nihai basınç dayanımının 2,15 MPa, eğilme-çekme dayanımının ise 0,45 MPa olduğunu göstermektedir. Harcın ısı iletkenliği, aerojel içeriği arttıkça azalmakta, özellikle aerojel miktarı hacimce %60'a ulaştığında ısı iletkenliğin 0,6039 W/(m.K)'den 0,1524 W/(m.K)'ye düştüğü bildirilmektedir (Z. Liu vd., 2016).

Almanya'da 1989 yılında inşa edilen bir binanın restorasyonunda ticari olarak satılan aerojel harcı uygulanmış ve dış duvarın ısı transfer katsayısı 1,0 W/(m.K)'den 0,3 W/(m.K)'ye düşürülmüştür. Uygulama sonrasında duvar boşluklarındaki ısı köprüleri ortadan kalkmış, ısı yalıtımı ve ısı performansa ek olarak duvarın buhar geçirgenliği performansı da iyileştirilmiştir (Ghazi Wakili & Remhof, 2017). Örnek bir uygulama olarak Almanya/ Weimar'da bulunan Bauhaus Üniversitesi'nde gerçekleştirilen 30 mm kalınlıklı aerojel sıva uygulaması öncesi (a) ve sonrası (b) görüntüleri Şekil 2.48.'de verilmiştir (Ganobjak vd., 2023).



Şekil 2.48. Aerojel sıva uygulaması öncesi (a) ve sonrası (b) görüntüleri.

Bir başka uygulama örneğinde hazırlanan hafif yalıtım kaplama harcında, ince agregaların bir kısmı silika aerojel, EPS ve vermikülit gibi hafif yalıtım agregalarıyla değiştirilmiştir. Bulgular, ince agreganın %15'inin EPS ve vermikülit ile değiştirilmesinin, malzemenin kaplama dayanımı için gereken minimum gereksinimi karşılayarak 2,40 MPa

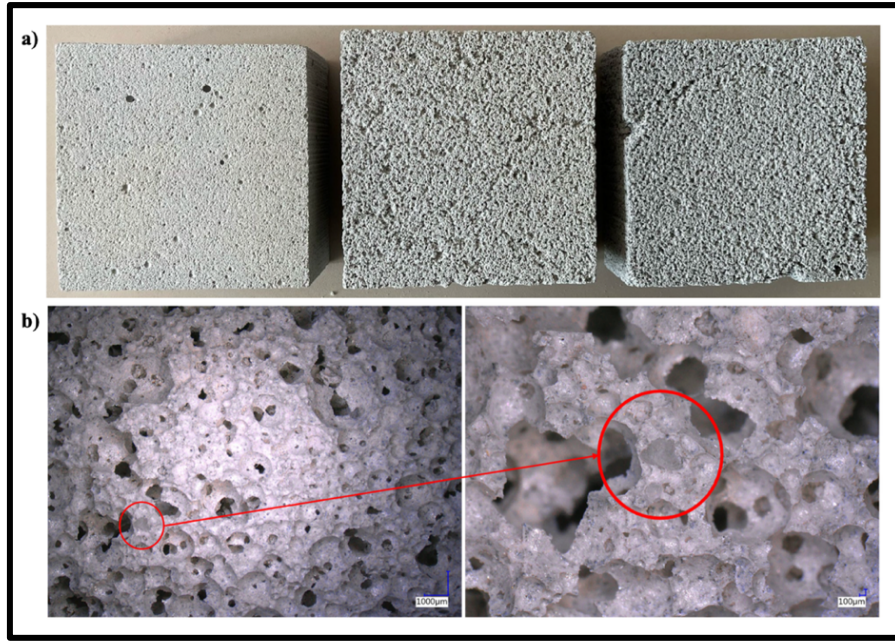
değerine ulaşmasını sağladığını ortaya koymuştur. Ayrıca hafif yalıtım kaplama harcının ısı iletkenliğinin, silika aerojel eklenmesiyle %60 oranında azaldığı rapor edilmiştir (Bergmann Becker vd., 2022). Literatürde yer alan bir başka çalışmada silika aerojel parçacık boyutunun jeopolimer köpük aerojel sıvanın termal yalıtım ve akustik emilim özellikleri üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Sonuçlar; büyük aerojel parçacıklarının hem termal yalıtımı hem de ses emilimini artırmada daha etkili olduğunu, buna karşın daha küçük parçacıkların nispeten sınırlı bir etki sergilediğini ortaya koymuştur (Y. X. Chen vd., 2022).

SiO<sub>2</sub> aerojel parçacıklarının çeşitli katkı maddeleri ve dağıtıcılarla birleştirilmesiyle geliştirilen aerojel kaplamalar; reçineler, çözücüler veya pigmentlerle yüksek hızlı dispersiyon yoluyla hazırlanmış bir bulamaçtır. Bu kaplamalar, yüksek sıcaklıklara karşı olağanüstü direnç gösterir ve 200 °C sıcaklığın üzerinde bile performanslarını koruyarak üstün termal kararlılık sağlamaktadır. Aerojel kaplamalar duvarlardaki ısı iletimini azaltarak termal yalıtım özelliklerini iyileştirmektedir. Kaplamanın son derece düşük ısı iletkenliği binanın iç ve dış ortamları arasındaki ısı transferini azaltırken yüksek performanslı yalıtkan görevi görmektedir (Mekonnen vd., 2021).

Aerojel kaplamalar; bina ısıtma boruları, diğer yüksek sıcaklık bileşenleri, beton, tuğla ve çelik yüzey yalıtımında uygulanabilmektedir. Ayrıca bina duvarlarına uygulandığında akustik sönümleme ve ses emilimi avantajı sağladığı bildirilmektedir (Lu vd., 2024). Kaplamalar üzerine gerçekleştirilen bir çalışmada; silika arojeli akrilik emülsiyona entegre ederek kompozit bir ısı yalıtım malzemesi geliştirilmiştir. Araştırmada, karışımdaki silika aerojel mikro kürelerinin hacimce %30'un altında olması durumunda, kaplamanın ısı iletkenliğinde bir azalma gözlenmezken, bu oran hacimce %30'un üzerinde olduğunda gözenekliliğin artması ve yoğunluğun azalması ile ısı yalıtımının iyileştirildiği ifade edilmiştir (F. He vd., 2019). Benzer şekilde polimer matrisine aerojel entegre ederek, yüksek performanslı silika aerojel termal yalıtım kaplamaları tasarlanmıştır. Bu yapı, hafiflik ve yüksek gözeneklilik sayesinde 0,050 W/(m.K) kadar düşük bir ısı iletkenlik değeri sağlamıştır (Di vd., 2022).

### **2.12.3. Aerojel katkıli köpük beton uygulamaları**

Çeşitli yapı kompozitlerine ek olarak arojellerin doğrudan beton sistemlerine entegre edilmesiyle, aerojel beton gibi yeni nesil malzemeler geliştirilmektedir (Şekil 2.49.) (T. Xu vd., 2025).



**Şekil 2.49.** Aerojel katkılı köpük beton uygulaması. a) el örnekleri ve b) mikroskobik yapısı.

Uygulamaya dair örneklerden biri; çimento, aerojel ve köpük oranlarının optimize edilmesiyle yüksek performanslı aerojel köpük beton eldesidir. Bulgular; 0,049 W/ (m.K) ısı iletkenliğe ve 198 kg/m<sup>3</sup> yoğunluğa sahip yüksek performanslı aerojel köpük betonun hacimce %0,05 çimento, %0,308 aerojel ve %0,642 köpük kullanılarak elde edildiğini rapor etmiştir (P. Li vd., 2019). Bir başka çalışmada; aerojel köpük betonun sıradan betonla karşılaştırması yapılmış, aerojel betonda ısı kaybının yaklaşık %33 oranında azaldığı ifade edilmiştir (H. Zhang vd., 2020). (H. Wu vd., 2023) tarafından yapılan çalışmada; betonda ultra hafif aerojel kullanımının, geleneksel köpük betona kıyasla ısı iletkenliği ve yoğunluğu önemli ölçüde azalttığı ifade edilmiştir. Bu sayede %49 maliyet tasarrufu sağlanmış ve cephelerden kaynaklanan ısı kaybı %9 oranında azalmıştır. Aerojel köpük beton düşük yoğunluk, yüksek gözeneklilik ve üstün yalıtım performansı ile ön plana çıkan, son teknoloji ürünü bir malzemedir. Düşük ısı iletkenlik değerleriyle aerojel köpük beton, geleneksel betona kıyasla %33'e varan oranda ısı kaybını azaltmada etkili olmuştur.

Aerojel takviyesi, betonun yoğunluğunu önemli ölçüde azaltarak hafif ama güçlü malzemeler ortaya çıkarmaktadır. Bu benzersiz özelliklerin kombinasyonu, aerojel köpük betonu çok çeşitli uygulamalar için umut vadeden bir malzeme haline getirmektedir. Tüm bu avantajların yanında aerojel köpük beton üretiminde aerojel türü, bileşen oranlarının optimize edilmesi, çimento matrisinde aerojel parçacıklarının homojen bir şekilde dağılması, dikkatli bir bileşim tasarımı ve işleme süreci oldukça önemlidir. Bu nedenle, malzemenin pratik uygulamasında kaynak temini ve maliyet etkinliği de dahil olmak üzere tüm kriterler dikkatle ele alınmalıdır (Lu vd., 2024).

#### 2.12.4. Yüksek performanslı yalıtım panelleri

Gelişmiş güvenlik profili ve düşük ısıl iletkenliği ile karakterize edilen arojel esaslı yalıtım panelleri, geleneksel bina yalıtım panellerinde gözlenen mekanik dayanım ve yangın güvenlik riskleri gibi sorunlara çözüm sunmaktadır (Şekil 2.50.).



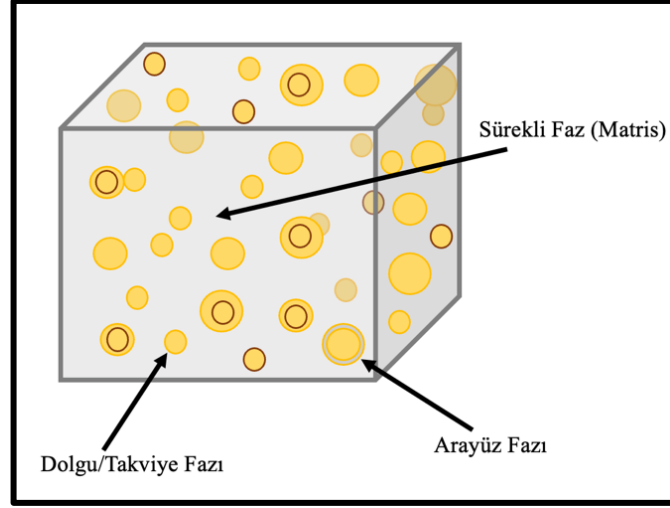
Şekil 2.50. Levha formundaki arojeller ve uygulaması (Tapecompanies, 2026).

Arojelerde mikro yapı özelliklerin ısıl iletkenliği nasıl etkilediğini inceleyen bir çalışma; geleneksel dış duvar yalıtımına kıyasla ısı akışında yaklaşık %40 ve iç yüzey sıcaklığında yaklaşık %20 oranında azalma tespit edilmiştir (Liang vd., 2020). Dış duvar uygulamaları için arojel esaslı ısı yalıtım harcı ve panellerine olan ilgi artma eğilimindedir. Bu bağlamda, arojellerin nanometre ölçeğindeki özelliklerinin ve ısı transfer mekanizmalarıyla nasıl etkileşime girdiğinin anlaşılması oldukça önemlidir. Konuyla ilgili araştırmalar, arojel yalıtım panellerinde maliyet optimizasyona ve uygulama alanlarının genişletilmesine olanak tanımaktadır (Lu vd., 2024).

#### 2.13. Arojel bazlı kompozitlerin sınıflandırılması ve uygulamaları

Enerji verimliliği hedeflerinin yanı sıra sürdürülebilir kalkınma stratejileri doğrultusunda, birden fazla malzemenin sinerjik biçimde bir araya getirilmesiyle kompozit yalıtım malzemeleri elde edilmektedir (Ali vd., 2024). Bu tür malzemeler, her bir bileşenin kendine özgü fiziko-mekanik özelliklerinden faydalandığında yalnızca ısı yalıtımı değil aynı zamanda mekanik dayanım, yangın direnci, çevresel sürdürülebilirlik gibi çoklu işlevler sunmaktadır. Yeni nesil kompozit malzemelerin termal özelliklerinin iyileştirilmesi, binaların enerji verimliliğini artırmak için potansiyel bir çözümdür. Isıl iletkenliği düşük, sürdürülebilir ve hafif malzemelerin akıllıca seçilmesi, binalardaki enerji talebini azaltmakta ve ısıtma veya

soğutma için harcanan enerjiyi önemli ölçüde düşürebilmektedir (Lakreb vd., 2023). *Kompozit malzemeler*, kimyasal ve fiziksel olarak farklı iki veya daha çok fazdan oluşan, belirgin bir ara yüzle ayrılmış mühendislik sistemleridir. Genel olarak kompozit bir malzeme üç farklı faz içermektedir (Şekil 2.51.).



Şekil 2.51. Kompozit bir malzemenin içerdiği faz bileşenleri.

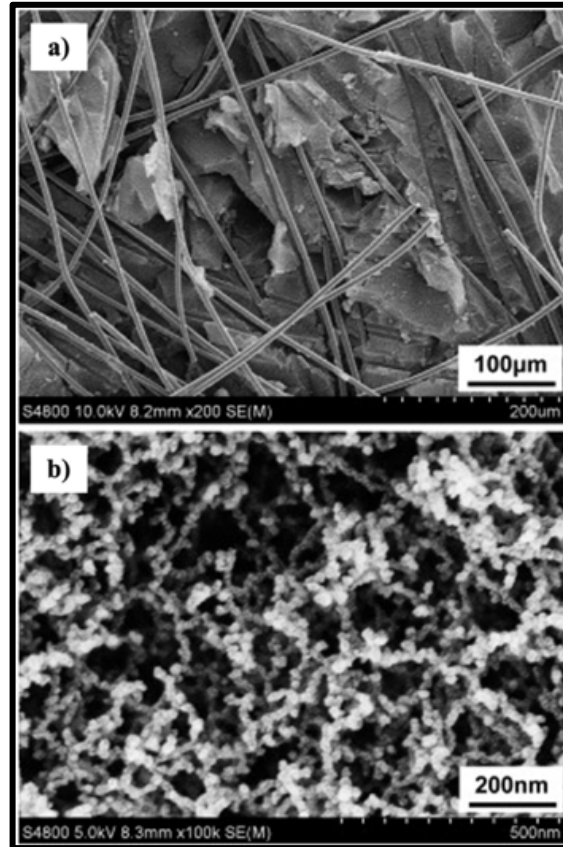
Sürekli faz olarak da bilinen *matris fazı*, kompozitte yük aktarımı ve bütünlük sağlamaktadır. Matris malzemeyle çevrili, matris içerisinde dağılmış olarak bulunan dolgu veya *takviye fazı* ise malzemeye asıl fiziko-mekanik özellikleri kazandırmaktadır. *Arayüz fazı* ise matris ve dolgu fazlarından farklı yapısal özelliklere sahip olan bağlayıcı faz olarak adlandırılmaktadır (Jose & Joseph, 2012).

Aerogeller, son yıllarda ısı yalıtımı için en yüksek potansiyele sahip malzemelerden biri olarak ortaya çıkmış ve çeşitli matrislerde geleneksel malzemelerin yerini almak üzere giderek daha fazla yaygınlaşmıştır. Günümüzde aerogel içeren malzemeler paneller, şilteler, harçlar, çimentolar ve sıvalar gibi bina uygulamaları için aerogel içeren kompozitler biçiminde üretilmekte ve test edilmektedir (K. Goryunova vd., 2023). Kompozit yapıda silika aerogellerin eklenmesiyle yoğunluğu azalmakta ve yalıtım performansı önemli ölçüde iyileşmektedir. Örneğin; VIP veya şilte şeklinde uygulandığında ısı iletkenlikler 0,014 ile 0,026 W/(m.K) arasında değişirken; çimento, harç veya betona katkılандığında bu değerler genellikle daha yüksektir. Ancak aerogel katkı, nihai ürünün mekanik özellikleri üzerinde olumsuz etkilere sebep olmaktadır. Özellikle silika aerogeller, ileri malzeme teknolojilerinin yüksek potansiyelli ürünü olmasına rağmen kırılabilirlikleri ve düşük mekanik dayanıklılıkları nedeniyle pratik uygulamalarda doğrudan kullanımları güçtür. Özellikle toz formundaki silika aerogellerin üstün ısı performanslarının korunurken aynı zamanda işlenebilirliklerini, dayanıklılıklarını ve işlevselliğini artırmak için ikincil fazlarla birleştirilmesi etkili bir yöntemdir (Peng vd., 2021).

Nano parçacık boyutundaki silika aerogeller, polimerler de dahil olmak üzere çok çeşitli matrislerle uyumluluk sergilemekte ve bu sayede üstün mekanik işlenebilirlik avantajı sağladığı bilinmektedir. Aerogel bazlı kompozitler, bileşimlerinde kullanılan dolgu veya destek maddesinin türüne göre sınıflandırılmaktadır. Günümüzde, aerogellerin kırılgan yapısını güçlendirmek veya aerogelleri kompozitlerin matrisine dolgu maddesi olarak yerleştirmek için çok çeşitli malzemeler kullanılmaktadır. Bu kapsamda en sık kullanılan aerogel kompozitler; aerogel-lif kompozitler, aerogel-çimento kompozitler ve aerogel-polimer kompozitlerdir.

### 2.13.1. Lif katkılı aerogel kompozitler

Aerogellerin mekanik özelliklerinin iyileştirilmesi ve kırılganlık sorunlarının giderilmesinde en etkili yöntemlerden biri lif takviyesidir. Lif takviyeli sistemlerde liflerin iskelet yapıya desteğinin yanı sıra kırılma genişmesi üzerindeki engelleyici etkisini kullanarak kompozit aerogellerin mekanik özellikleri iyileştirilmektedir (X. Zhang vd., 2020). Bu durumda hem aerogellerin iskelet yapısı için bir takviye hem de aerogel parçacıklarının boyutunun homojen hale getirilmesi sağlanmaktadır. Aerogellerin mekanik özelliklerini iyileştirmede lif takviyesine ek olarak polimer çapraz bağlama ve esnek grup ikamesi yöntemleri de yaygın kullanılmaktadır. Şekil 2.52.'de karbon fiber/karbon aerogel kompozit (a) ve aerogel kompozit içindeki karbon aerogellerin SEM görüntüsü (b) verilmiştir (Feng vd., 2012).



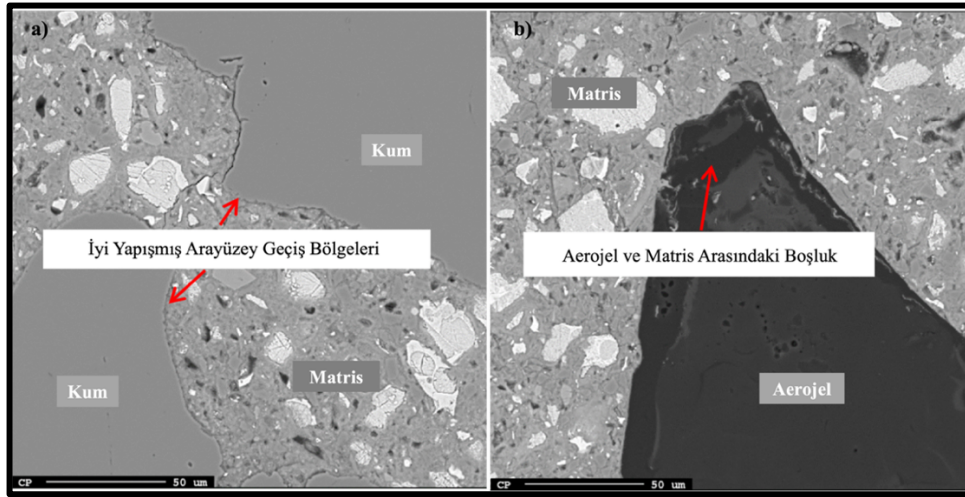
Şekil 2.52. Karbon fiber ve karbon aerogellerin SEM görüntüleri.

Günümüzde aerojel-lif kompozit sistemlerinin geliştirilmesinde inorganik ve organik kökenli lifler kullanılmaktadır. En yaygın kullanılan türleri; cam elyaflar, silisyum karbür elyaflar, karbon elyaflar ve silika nanoteller olarak bilinmektedir (J. He vd., 2023). Bu lifler, aerojel matris içerisinde yapısal bütünlüğü korumaya yardımcı olurken aynı zamanda malzemenin mekanik ve termal özellikleri arasında optimum performansın elde edilmesine olanak tanımaktadır.

### 2.13.2. Çimento esaslı aerojel kompozitler

Bir malzemenin veya kompozitin ısı yalıtım performansını artırmak için, ısı transferini sınırlayan yalıtkanlar malzeme matrisine gömülebilmektedir. Havanın yüksek yalıtkanlığı sayesinde çimento esaslı matriste hava boşluklarının artırılması, hafif çimento esaslı malzemeler üretmek için yaygın olarak kullanılan bir yaklaşımdır. Bu amaçla gaz beton veya köpük beton gibi sistemlerde kimyasal, fiziksel veya mekanik yöntemler kullanılarak, toplam malzeme hacminin %85'ine kadar gömülü hava boşluğu hacmi elde edilebilmektedir (H.-Q. Jin vd., 2016).

Şekil 2.53.'te bir çalışmada hazırlanan aerojel katkılı harcın mikro yapı özellikleri verilmiştir. Şekilde; a) aerojel içermeyen standart harcın ve b) hacimce %40 aerojel içeren harcın SEM görüntüsünü temsil etmektedir (Ng vd., 2014).



Şekil 2.53. Standart kum içeren harç ve aerojel katkılı harcın SEM görüntüleri.

Yüksek oranda gözenek içeren köpük betonlar, minimum mekanik performansa sahiptir. Bu nedenle bu malzemeler taşıyıcı elemanlar yerine yalnızca dekoratif sıvalar veya ısı yalıtım panelleri gibi yapı elemanlarında kullanılabilir. Bu kısıtlılığın giderilmesi amacıyla cam boncuklar, genleştirilmiş perlit, pomza agregası ve aerojeller gibi çeşitli dolgu maddeleri kullanılarak ısı iletkenlik katsayısını azaltmak ve mekanik dayanımı artırmak amaçlanmaktadır (Z. Liu vd., 2016). Aerojeller, çimento esaslı kompozitlerde genellikle ince agregaların kısmi

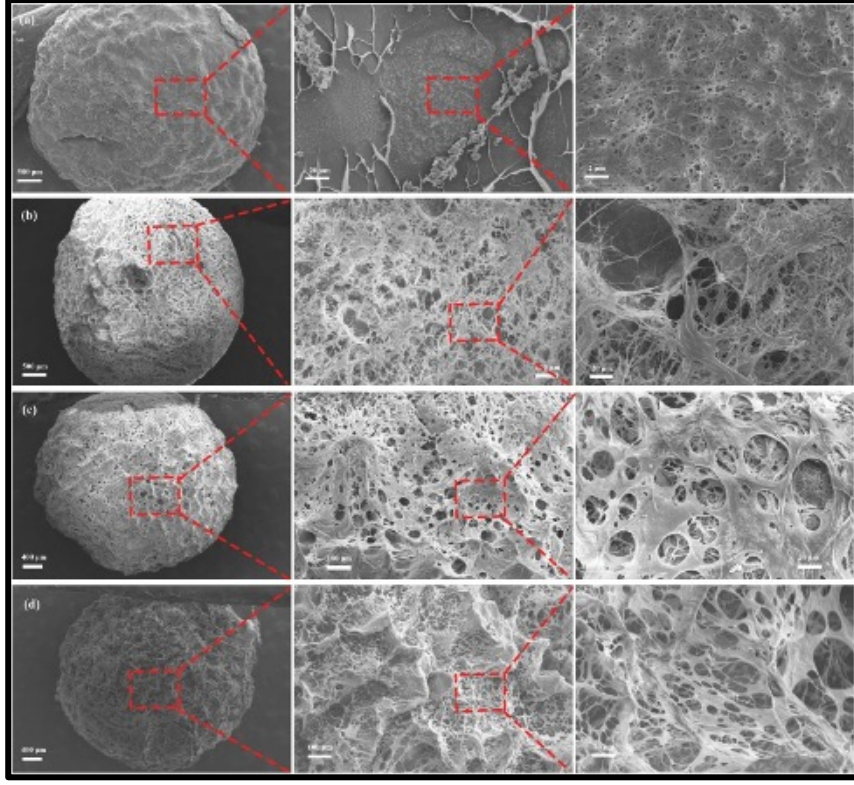
ikamesi olarak kullanılmakta ve hacimce %0-60 arasında değişen miktarlarda katkılanmaktadır (Oey vd., 2013). Bu oran; hedeflenen malzeme yoğunluğu, mekanik dayanım ve yalıtım performansı gibi kriterlere göre optimize edilmektedir.

### 2.13.3. Polimer matrisli aerojel kompozitler

Silika aerojellerin uygulama alanlarının genişlemesiyle inşaat sektöründe geleneksel malzemelerin yerine çeşitli matrislere yerleştirilerek yeni kompozit malzemeler üretilmenin önü açılmıştır. Çeşitli kompozit yapılar arasında, polimer matrisli sistemler; çok yönlülükleri, hafif yapıları ve üretim kolaylıkları nedeniyle büyük ilgi görmektedir. Bu tür sistemlerde, aerojel fazı genellikle sürekli bir polimerik matrisin içine gömülmekte veya matris tarafından desteklenmektedir. Bu da mekanik dayanıklılık ve ısı yalıtım performansı arasında etkili bir denge sağlamaktadır (D. Kang vd., 2024). Deneysel bir çalışmada poliüretan (PU) matrisinde, silika aerojel ve montmorillonit nanoparçacıklar kullanarak nano köpük üretilmiştir. Hacimce %4 oranında nanoparçacık içeren düşük yoğunluklu köpükler; daha küçük hücre çapı, düzenli morfoloji, düşük ısı iletkenlik, düşük nem emilimi ve buhar geçirgenliği gibi özellikleri iyileştirmiş ayrıca mekanik dayanımı da önemli ölçüde artırmıştır (Stazi vd., 2019).

Bazı polimer sistemlerinde, jel oluşumu sırasında gözenekli yapıların gelişimi ve katı polimerik bileşenler arasında güçlü etkileşimleri desteklemek amacıyla çapraz bağlayıcı maddeler eklenmektedir. Sentetik polimer aerojellerin (poliimid aerojel) üretiminde diaminler ve dianhidritlere ek olarak, üç işlevli bir amin çapraz bağlayıcılar kullanılmaktadır (Vivod vd., 2020). Jelleşme süresini etkileyen çok sayıda faktör arasında; polimer konsantrasyonu, kimyasal bileşim, katkı maddeleri, sıcaklık ve pH önemli ölçüde etkilidir (Formanek vd., 2021). Jelleşmeyi desteklemek için fenolik reçine ve poliakrilamid gibi polimerler, kürlenme ajanı olarak silika veya alümina nanopartiküller eklenmesi gerekirken, termoplastik polimerler doğrudan jelleşerek güçlendirilmiş bir ağ oluşumuna olanak tanımaktadır (Q. Wu & Ge, 2021). Özellikle polivinil alkol (PVA), mükemmel biyoyumluluğu ve biyolojik olarak parçalanabilir bir malzeme olması nedeniyle kompozit sistemlerde yaygın olarak kullanılmaktadır.

Şekil 2.54.'te kitosan ve farklı oranlarda polimer içeren aerojellerin SEM görüntüleri verilmiştir. Şekilde; a) kitosan mikroküreleri, b) %25 PVA içeren numuneyi, c) %33 PVA içeren numuneyi ve d) %50 PVA içeren numuneyi temsil etmektedir. PVA oranındaki artışla birlikte kitosanın kapalı mikro yapısının yerini daha geniş gözenek yapısına sahip ağısı yapıya bıraktığı gözlenmiştir. Özellikle %50 oranında PVA içeren aerojel kompozitin makro gözenek yapısı açıkça görülmektedir (J. Xu vd., 2021).



Şekil 2.54. Farklı PVA içeriklerine sahip polimer katkıli aerojellerin SEM görüntüleri.

PVA zincirinde bulunan bol miktardaki hidroksil grupları, hidrofilik aerogel parçacıklarıyla güçlü hidrojen bağı oluşturmayı sağlarken, aynı zamanda aerojellerin matris içinde düzgün dağılmasını da kolaylaştırmaktadır. Dolayısıyla, PVA bu tür kompozit uygulamalar için umut verici bir aday olarak değerlendirilmektedir (Balcı vd., 2025).

#### 2.14. Aerogel uygulamalarındaki kısıtlılıklar ve geliştirme önerileri

Nano gözenekleri, yüksek yüzey alanı ve birbirine bağlı ağ yapısına sahip aerojeller, makro ölçekteki fiziksel özellikleri önemli ölçüde etkilemektedir. Bu karakteristik yapı; aerojellere üstün ısı yalıtım kabiliyetleri, düşük yoğunluk ve yüksek geçirgenlik özellikleri kazandırmaktadır. Özellikle uygun maliyetli olmaları nedeniyle SiO<sub>2</sub> tabanlı aerojeller ileri düzey bina yalıtım sistemlerinde sıklıkla tercih edilmektedir. Bununla birlikte toz formdaki SiO<sub>2</sub> aerojellerin hafif ve hidrofobik yapısı, su ve çimento matrislerinde doğrudan dağılımlarını sınırlamaktadır. Bu durum çimento esaslı uygulamalarda bağ dayanımı ve homojenlik açısından sorunlara sebep olmaktadır. Bu sorunun ele alınması, ısı transfer performansını etkileyen aerogel özelliklerinin sistematik bir şekilde incelenmesini ve farklı ölçeklerdeki etkilerinin anlaşılmasını gerektirmektedir. Buna ek olarak arayüz mikro yapılarının ve termal direncinin ısı transfer mekanizmalarının anlaşılması çok önemlidir. Ayrıca arayüzdeki kimyasal etkileşimlerin, morfolojik ve termal davranışlarının bütüncül olarak ele alınması, verimli ısı yalıtım ürünlerinin geliştirilmesine olanak tanımaktadır (Lu vd., 2024).

Aerojeller ısı yalıtımında sayısız avantaja sahip malzemeler olmasına rağmen mühendislik uygulamalarında yaygınlaşmasını sınırlayan bazı engeller bulunmaktadır. Bunların başında ısı yalıtım mekanizmalarının yeterince anlaşılabilmesi, uygun destek sistemlerindeki eksiklikler, yüksek üretim maliyetleri ve standardizasyon metodolojilerinin geliştirilememiş olması gibi faktörler ön plana çıkmaktadır. Özellikle binaların dış cephe yalıtımında arojel yalıtım malzemelerinin endüstriyel ölçekte üretimi ve uygulanabilirliğinin artırılması amacıyla gelecekteki araştırmalar iki temel konuya öncelik vermelidir (Lu vd., 2024). Bunlardan ilki, ısı yalıtım mekanizmalarının anlaşılmasıdır. Aerojel yalıtım malzemeleri geleneksel yalıtım malzemelerinden farklı olarak yalnızca kondüksiyonla iletimi değil, aynı zamanda konveksiyon ve radyasyonla iletimi de hesaba katmaktadır. Özellikle, ısı radyasyonunun katkısını ölçmek önemli bir zorluktur. Bu nedenle arojelleri mikro ölçekli malzeme kategorisinde ele alarak, ısı transfer mekanizmasının incelenmesi, termal hesaplama modelinin standartlaştırılması ve geniş ölçekli uygulamaların hayata geçirilmesi oldukça önemlidir. Ayrıca arojel ağ yapılarının oluşum mekanizması, yüzey bileşimi ve kimyasal yapının düzenlenmesi, yüksek sıcaklıkta yapısal kararlılığın kontrolü gibi konularda yapılan araştırmalar büyük oranda katkı sağlayacaktır. Bir diğer önemli konu ise arojellerin üretim maliyetlerinin düşürülmesi ve verimliliğinin artırılmasıdır. İnşaat sektörü gibi geniş hacimli uygulama alanlarında arojel üretiminin düşük maliyetli üretimi; yüksek enerji tüketimi, düşük günlük üretim oranları ve uzun üretim döngüleri gibi sorunların giderilmesiyle mümkündür. Böylelikle üretim verimliliğinin artırılmasının yanı sıra büyük hacimli, düşük maliyetli arojeller elde edilebilmektedir. Ayrıca arojel miktarının azaltılıp yalıtım performansının korunduğu hibrit sistemler ve yenilikçi yapısal tasarıma sahip kompozitlerin geliştirilmesiyle ekonomik ve çevresel açıdan sürdürülebilir ürün elde etmek mümkün olacaktır (Balci vd., 2025; Lu vd., 2024).

### 3. MATERYAL VE METOT

Bu bölümde; tez çalışması kapsamında kullanılan sarf malzemeler, kimyasallar, sentez yöntemleri, sentez koşulları ve karakterizasyon yöntemleri detaylıca açıklanmıştır. Tez çalışması süresince sentezlenen numunelerin adlandırılması Tablo 3.1’de verilmiştir.

**Tablo 3.1.** Tez çalışması sırasında hazırlanan numunelerin kodları ve tanımları.

Numune Kodu	Numune Tanımı
LWA	Hafif aerojel
DT-LWA	Diyatomit ile sentezlenen hafif aerojel
UK-LWA	Uçucu kül ile sentezlenen hafif aerojel
TK-LWA	Taban külü ile sentezlenen hafif aerojel
DT-LWA-Kaplanmış	Diyatomit ile sentezlenen hafif aerojel yüzeyinin yangın geciktirici solüsyonla kaplandığı numune
UK-LWA-Kaplanmış	Uçucu kül ile sentezlenen hafif aerojel yüzeyinin yangın geciktirici solüsyonla kaplandığı numune
TK-LWA-Kaplanmış	Taban külü ile sentezlenen hafif aerojel yüzeyinin yangın geciktirici solüsyonla kaplandığı numune
DT-LWA-Kompozit	Diyatomit ile sentezlenen hafif aerojelin alçıpanla birleştirilmesi ile elde edilen kompozit
UK-LWA-Kompozit	Uçucu kül ile sentezlenen hafif aerojelin alçıpanla birleştirilmesi ile elde edilen kompozit
TK-LWA-Kompozit	Taban külü ile sentezlenen hafif aerojelin alçıpanla birleştirilmesi ile elde edilen kompozit
DT-LWA-Kutu	DT-LWA kompozit kullanarak tasarlanmış test kutusu
UK-LWA-Kutu	UK-LWA kompozit kullanarak tasarlanmış test kutusu
TK-LWA-Kutu	TK-LWA kompozit kullanarak tasarlanmış test kutusu

#### 3.1. Aerojel sentezinde kullanılan silisyum kaynakları

Aerojel sentezinde en büyük problemlerden biri, hammaddelerin pahalı kimyasallardan ibaret olmasıdır. Bu kısıtlılığı gidermek ve özellikle silika kaynağı olarak kimyasallar yerine düşük maliyetli endüstriyel atıklar ve doğal kaynakların aerojel sentezinde kullanımı araştırma konusu olmuştur. Bu kaynaklar, silika üretiminde ve çeşitli endüstriyel uygulamalarda önemli bir rol oynamaktadır.

Tez çalışması kapsamında aerjel sentezinde kullanılan silisyum kaynakları; UK, TK ve DT olarak seçilmiştir. Her üç silika kaynağı da herhangi bir ön işlem uygulanmadan, doğrudan aerjel sentezine dahil edilmiştir. Çalışmada esas amaç; yerel kaynakların kullanıldığı, toksik kimyasallar yerine biyo-bozunur özellikteki polimer katkılarla çevreci yalıtım ürünleri tasarlamaktır. Bu bağlamda; ileri teknolojik yöntemler kullanılarak, geleneksel yöntemlerle elde edilemeyecek kadar hafif ve gözenekli yapıda aerjeller elde edilmiştir. Seçilen silika kaynakları ile gerçekleştirilen bu yeşil sentez süreci hem maliyet etkin hem de çevreci ürün eldesini mümkün kılmıştır.

Uçucu kül terimi, çoğunlukla parçacıkları baca gazından yakalanan ve elektrostatik veya mekanik çöktürme yoluyla toplanan ince atığı ifade etmek için kullanılmaktadır (H. Zhou vd., 2022). Yapısı bakımından heterojen, gözenekli ve düzensiz şekilli özellikler sunmaktadır. Endüstriyel bir yan ürün olan uçucu kül, düşük maliyetli olup yaygın bulunurluğa sahiptir. Kimyasal bileşimi açısından UK; silisyum (Si), kalsiyum (Ca), alüminyum (Al), demir (Fe), magnezyum (Mg), kükürt (S) ve karbon (C) gibi ana elementlerle birlikte çeşitli eser elementler içermektedir. Bileşiminin büyük bir kısmını silisyum ve alüminyum oksitler oluşturmaktadır. Genellikle camsı alüminyum-silikat matrisi, kuvars, mullit, kalsit ve manyetitten oluşan, düşük yoğunluklu, içi boş küreciklerden (senosfer) meydana gelmektedir (Grabias-Blicharz & Franus, 2023). Ortalama parçacık boyutu yaklaşık  $20 \mu\text{m}$ , yüzey alanı  $300\text{-}500 \text{ m}^2/\text{kg}$  ve ortalama yoğunlukları  $0,54\text{-}0,86 \text{ g/cm}^3$  olarak bilinmektedir (Z. T. Yao vd., 2015). Termik santrallerde atık olarak ortaya çıkan uçucu külün küresel kullanım oranı, toplam üretimin yalnızca %25'i kadardır. Geriye kalan UK atıkları ise doğrudan doğaya bırakılmaktadır (Duong vd., 2021). Her atık gibi uçucu küller de doğaya salıverildiklerinde çevre kirliliği, ekolojik tehdit ve sağlık sorunlarına neden olabilecek potansiyel haline gelmekte; ayrıca depolanmaları durumunda işletme maliyetinin artmasına neden olmaktadır. Bu nedenle kömürün yanması ile ortaya çıkan bu atıkların endüstriyel sürdürülebilirliğe dahil edilmesi için farklı yöntemlere ihtiyaç duyulmaktadır. Bunlardan biri de uçucu kül katkılı aerjel sentezi olup ısı yalıtımında etkin rol oynayan yapı malzemeleri elde etmede kullanılmaktadır.  $\text{SiO}_2$  ve  $\text{Al}_2\text{O}_3$  içeren uçucu külün senteze dahil edilmesi ile atık yönetimi ve sürdürülebilirliğe sağladığı katkıya ilaveten, aerjelin kırılğan yapısı ve düşük mekanik dayanımını iyileştirdiği rapor edilmiştir (Le vd., 2024).

Taban külü ise kömürle çalışan elektrik santrallerinde, yanma ürünü olarak fırının tabanında biriken uçucu külden daha ağır olduğundan baca gazı yoluyla taşınması zor olan endüstriyel atıktır. Gözenekli ve köşeli parçacık yapısına sahip olup toplam külün %15-30 kadarını oluşturmaktadır (Ghanim vd., 2025). Taban külünün depolama alanlarında bertaraf edilmesi, ciddi çevresel sorunlara sebep olmaktadır. Uçucu küle kıyaslandığında taban külü

daha yüksek ağır metal bileşimine sahip olduğundan yeraltı sularında kirliliği oluşturmaktadır. Birincil endüstriyel atık olan taban külünün geri dönüştürülmesi ve bertaraf edilmesi ile depolama alanı kullanımı, maliyet ve enerji tasarrufu sağlanmış olacaktır (Al Biajawi vd., 2022). Taban külü bileşimi yakılan kömürün türüne, yakma teknolojisine ve kazan koşullarına bağlı olarak değişkenlik göstermekte olup %70'den fazla SiO<sub>2</sub>, değişken oranlarda Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, demir oksit (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) ve kalsiyum oksit (CaO) içermektedir (Ramzi Hannan vd., 2017). TK'nın inşaat sektöründe agrega, çimento ve puzolanik katkı olarak kullanımı etkili yöntemler olarak öne çıkmaktadır. Taban külünden sodyum silikat çözeltisi elde edilerek jeopolimer üretimi ve sol jel işlemleriyle de aerojel sentezine dair çalışmalar gün geçtikçe yaygınlaşmaktadır (Gao vd., 2024). Bu yöntemler, küresel ölçekte enerji tüketimini en aza indirmektedir. Ayrıca endüstriyel yan ürünlerin verimli kullanımını teşvik ettiğinden; döngüsel ekonomi ve sürdürülebilir kalkınma ilkeleriyle uyumludur. Bu tür uygulamalar; depolama alanlarında çok yer kaplayan, toprak ve yeraltı su kirliliğine sebep olan atık taban külünün miktarını önemli ölçüde azaltmaktadır.

Diyatomitler, *Diyatome* adı verilen tek hücreli denizel canlıların 1-1000  $\mu\text{m}$  boyutlu fosil iskeletlerinden meydana gelen, amorf, organik esaslı kayaçlardır. Diyatomeleler öldüğünde silis içeren kabukları çökerek diyatomit rezervlerini meydana getirmektedir. Özellikle volkanik etkinliğin daha yoğun olduğu alanlarda, çeşitli deniz veya göl yataklarında çökelen diyatomit rezervleri kıtasal hareketlerle yükselmekte ve beyaz renkli katmanları meydana getirmektedir. Sedimanter bir kayaç türü olan diyatomitlerin termal kararlılıkları, olağanüstü fiziksel ve kimyasal özellikleri sayesinde birçok endüstriyel uygulama alanında kullanımı mümkündür. Bunlar; tarımda böcek ilaçları için taşıyıcı ajan, petrol ve türevleri için absorban, boya ve betonda katkı malzemesi olarak kullanılmaktadır. Ayrıca filtrasyon, arıtma, ses yalıtımı ve benzeri birçok etkili bir malzemedir (Pereira vd., 2024). DT'ler kimyasal olarak kararlılığı yüksek, düşük yoğunluklu (1,9-2,4 g/cm<sup>3</sup>), gözenekli ve yüksek spesifik yüzey (500-1500 m<sup>2</sup>/g) alanına sahip olmakla birlikte %80-90 oranında SiO<sub>2</sub> içermektedir (Y. Yang vd., 2022). Hacminin yaklaşık %90'ı boşluk yapısındadır ve ısıl iletkenliği oldukça düşüktür. Bu sayede özellikle silika bazlı malzemelerin üretimi için önemli bir hammadde kaynağıdır (Balci vd., 2025). Diyatomitler esas olarak silika içerirken, az miktarda demir oksit (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), alüminyum oksit (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) gibi mineraller de içermektedir (Aggrey vd., 2021). Elementel hücre yapısı, her bir oksijen atomunun iki bitişik tetrahedral arasında dağıtıldığı şekilde düzenlenmiş SiO<sub>4</sub> ve alüminyum tetraoksit (AlO<sub>4</sub>) tetrahedral moleküllerinden oluşmaktadır. Mineralojik görünümünde biyojenik kökenli amorf opal faz baskın olup kristal yapıda kuvars, muskovit, kaolinit ve feldispat izlerine rastlanmaktadır. Diyatomitlerin kimyasal yapısı esas olarak kuvars formunda silika, kalsit formunda kalsiyum karbonat ve kalsiyum sülfat formunda alçıtaşından meydana gelmektedir

(Wahba vd., 2025). Ülkemizde; İç Anadolu'nun güneydoğusu (Niğde, Kayseri ve Nevşehir), Ankara-Çankırı bölgesi, Batı Anadolu (Afyon, Kütahya ve Uşak) ve Doğu Anadolu bölgesinde diyatomit oluşumlarına rastlanmaktadır. İnşaat ve yapı malzemeleri alanında diyatomit üzerine yapılan çalışmaların çoğunluğu betona katkılanmış diyatomitin fiziksel ve mekanik özellikleri konusuna odaklanmaktadır. Mevcut literatür çalışmaları incelendiğinde, aerojel sentezinden ziyade diyatomitin katkı olarak kullanıldığı yalıtım malzemeler üzerine daha fazla çalışma olduğu görülmektedir (Z. Liu vd., 2023). Diyatomitin silika aerojel sentezinde hammadde olarak kullanımını araştıran çalışmalar ise oldukça sınırlıdır. Mevcut çalışmalarda DT genellikle silika kaynağı olarak seçilip sodyum hidroksit (NaOH) ve hidroklorik asit (HCl) gibi kimyasallarla ön işleme maruz bırakılarak saflaştırıldıktan sonra aerojel sentezinde kullanılmıştır (Rubino vd., 2024).

Bu tez çalışmasında herhangi bir ön işlem uygulanmadan kullanılan ham diyatomit, uçucu kül ve taban külünün, sol jel yöntemiyle sentezlenen aerojellere iskelet yapı sağlaması amaçlanmıştır. Bu durum aerojel sentezinde ortaya çıkan pahalılık sorununu azaltmaya katkı sağlamaktadır. Literatürde diyatomit ve taban külü kullanılarak bu yöntemle yapılmış başka bir çalışmaya rastlanmamıştır. Kullanılan F-sınıfı UK ve TK numuneleri Kütahya'da faaliyet gösteren Çelikler Seyitömer Termik Santrali'nden temin edilmiştir. Diyatomit numuneler de yine Kütahya bölgesinden temin edilmiştir. Sentez sırasında kullanılan UK, TK ve DT kaynaklarının toz formundaki görüntüleri Şekil 3.1'de verilmiştir.



Şekil 3.1. Sentez sırasında kullanılan silika kaynakları.

### 3.2. Aerojel sentezinde kullanılan kimyasallar ve diğer malzemeler

Tez çalışması kapsamında; hafif aerojellerin sentezlenmesi sırasında bağlayıcı olarak Polivinil alkol (PVA) ve karboksimetil selüloz (CMC) kullanılmıştır. Çalışmada kullanılan

PVA; yaklaşık 89.000-98.000 g/mol molekül ağırlığına, %99+ hidroliz derecesine ve 1,19 g/cm<sup>3</sup> yoğunluğa sahiptir. İkincil bağlayıcı olarak kullanılan karboksimetil selülozun yoğunluğu ürün etiketinde 1,59 g/cm<sup>3</sup> olarak ifade edilmiştir.

PVA; suda çözünebilen, biyo-bozunur ve düşük toksisiteye sahip bir polimerdir. Vinil asetatın polimerizasyonu ile elde edilen polivinil asetatın alkali veya asidik hidroliziyle üretilmektedir. Polimerin kristalinliği, çözünürlüğü ve mekanik özellikleri hidroliz derecesi ve moleküler ağırlığa bağlı olarak değişmektedir. Moleküler yapısı -CH<sub>2</sub>-CHOH- şeklinde olup hidroksil grupları yoğun hidrojen bağı oluşturmaktadır. Hidrofilik yapısı nedeniyle 60-95 °C aralığındaki sıcaklıklarda, mekanik karıştırma yoluyla çözünmektedir. Cam geçiş sıcaklığı (T<sub>g</sub>) yaklaşık 85-100 °C aralığında olup tam kristalize olanların ergime sıcaklıkları yaklaşık 200-230 °C olarak bildirilmiştir.

CMC; doğal selüloz zincirlerinin hidroksil gruplarına karboksimetil gruplarının bağlanmasıyla elde edilen, kolay çözünebilen, toksik olmayan ve ucuz bir selüloz eteridir. İnorganik dolgular ve partiküllerle birlikte kullanıldığında iyi bir stabilizasyon performansı sergilemektedir. Moleküler yapısı anyonik COO<sup>-</sup> grupları içermektedir. CMC, biyo-bazlı olup kıvam artırıcı, stabilizatör, bağlayıcı ve film oluşturucu olarak gıda, ilaç, boya ve inşaat gibi birçok alanda yaygın kullanılmaktadır (That Buu vd., 2023).

Silika aerojel sentezinde kimyasal çapraz bağlar, aerojel performansının iyileştirilmesinde oldukça etkilidir. En yaygın kullanılan çapraz bağlayıcı polimerlerden biri de PVA olarak bilinmektedir. Aerojel sentezinde PVA'nın tek başına kullanılması destek yapısının kararsız olmasına sebep olarak kurutma sırasında çökmeye neden olabilmektedir. Bu nedenle selülozik kökenli ikincil bağlayıcı varlığı performansın iyileştirilmesi için önemli bir faktördür. PVA polimerine eşlik eden ikincil bağlayıcı CMC'nin varlığı çapraz bağlanma derecesini artırarak aerojelin mekanik dayanımını, dayanıklılığını ve çevresel faktörlere karşı direncini önemli ölçüde iyileştirmektedir (Y. Xu vd., 2023).

PVA'nın -OH grupları, silika kaynağı yüzeyinde bulunan silanol grupları (≡Si-OH) ile hidrojen bağları kurarken, CMC'nin karboksilat (-COO<sup>-</sup>) grupları hem PVA'nın (hidroksil) -OH gruplarıyla hidrojen bağı oluşturur hem de silika kaynağı ile elektrostatik etkileşime girerek stabil ağ yapısını meydana getirmektedir. Ortaya çıkan matriste hem organik polimerlerin esnekliği hem de inorganik silika kaynağının gözenekli yapısı birlikte çalışarak daha dayanıklı aerojel yapıyı meydana getirmektedir. Organik-inorganik kompozit aerojel olarak adlandırılan bu kombinasyon hem çevre dostu hem de mekanik olarak dayanıklı aerojellerin elde edilmesini mümkün kılmaktadır (J. Zhang vd., 2024). Aerojel yapısında bulunan PVA konsantrasyonu

arttıkça üç boyutlu ağ yapı daha düzenli hale gelerek kararlı ve düzenlenmiş gözenek yapısına sahip aerojellerin elde edilmesini sağlamaktadır. Bu durumda elde edilen üç boyutlu ağ yapı fonon saçılmasını azaltarak katı haldeki ısı transferini sınırlamaktadır (Su vd., 2024).

CMC, toz formdaki silika kaynağının jel yapı içerisinde homojen dağılmasını kolaylaştırmaktadır. Ayrıca düşük konsantrasyonlarda kullanıldığında bile sistemin viskozitesini optimize ederek döküm ve kalıplama işlemlerinin daha kontrollü şekilde gerçekleştirilmesine olanak tanımaktadır. Bu sayede toz formdaki silika kaynaklarının (DT, UK ve TK) yığılması engellenmekte, jel yapının daha düzenli ağ yapı sergilemesini, nihai ürünün homojen gözenekli, düşük yoğunluklu ve daha hafif olmasını sağlamaktadır. DT, UK ve TK bileşiminde bulunan SiO<sub>2</sub> ile meydana gelen Si-O-Si ağ yapısı, nano boyutta gözenek yapısını geliştirmeyi desteklerken ısı iletkenlik değerinin azalmasına yardımcı olmaktadır (Mo vd., 2025). Sentez sırasında çözücü olarak yalnızca *saf su* kullanılmıştır.

Aerjellerin yangına dayanımını artırmak amacıyla numune yüzeyleri Hi-Tech marka “fire-proof” (yanmaz/yangın geciktirici) yangın geciktirici solüsyon kullanılarak kaplanmıştır.

Aerjellerin alçıpanla birleştirilmesi ile elde edilen kompozitlerin hazırlanmasında 1 cm kalınlığa 15 cm uzunluğa sahip hazır alçıpan levhalar kullanılmıştır. Test kutularının hazırlanmasında da yine aynı alçıpan levhalar kullanılmıştır.

Islak jellerin kalıba alınmadan önce katı parçacıkların dağıtılması ve gözenek oluşumun desteklenmesi amacıyla DLAB D-160 marka homojenizatör kullanılmıştır.

Islak jellerin ön dondurma işleminde Wisd/Wisd 22 marka/model ultra düşük sıcaklık dondurucusu kullanılmıştır.

Teknosem-Toros TRS 2/2V model dondurarak kurutucu (liyofilizatör) cihazı kullanılarak kurutma işlemi gerçekleştirilmiştir.

### **3.3. Karakterizasyon yöntemleri**

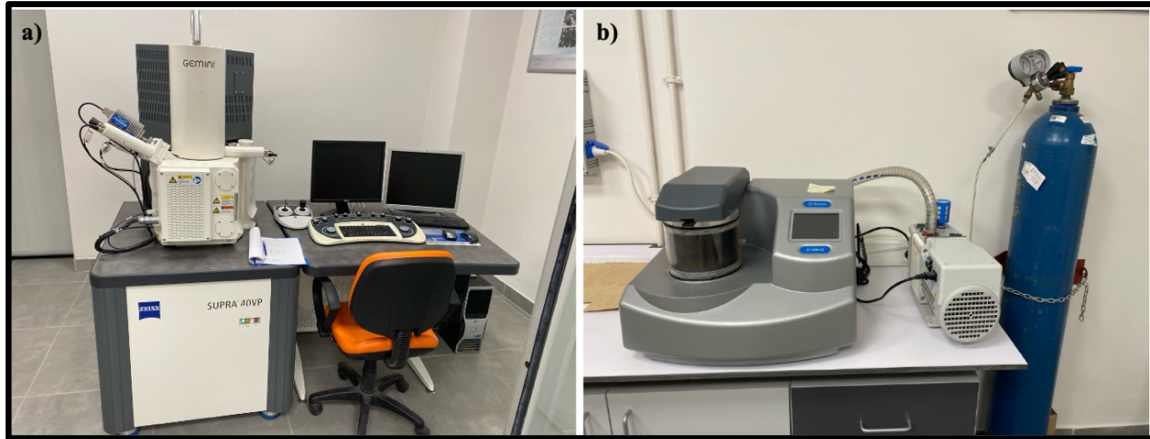
Tez çalışması kapsamında; hammaddelerin ve aerjellerin yüzey özellikleri ile mikro yapıları SEM-EDX analiziyle karakterize edilmiştir. Spesifik kimyasal bileşimlerin ve yüzey fonksiyonel gruplarının tespiti ise FT-IR analiziyle gerçekleştirilmiştir. Hammadde ve aerjellerin kristal yapı tespitinde XRD yöntemi kullanılmış, hammaddelerin kimyasal bileşimi ve kızdırma kaybı değerleri ise XRF yöntemiyle karakterize edilmiştir. Aerjeller ve aerjel kompozitlerin numune yüzey sıcaklıkları ile test kutularının kutu içi sıcaklık değişimlerinin izlenmesi termal kamera aracılığıyla gerçekleştirilmiştir. Ayrıca test kutusu olarak hazırlanan numunelerin kutu içi sıcaklık verileri Arduinio DHT11 sensörü ile alınmış ve zamana bağlı

sıcaklık değişim grafikleri hazırlanmıştır. Sentezlenen aerojellerin ısıl iletkenlik katsayıları TS EN 12664 standardına uygun olarak ölçülmüştür (TS EN, 29 Kasım 2001). Aerojellerin yük karşısındaki birim deformasyon yüzdelerinin hesaplanmasında kullanılan veriler, nokta yükleme test cihazı kullanılarak oluşturulmuş, yanma karşısındaki davranışı ise video kaydına alınmıştır.

Tez içeriğinde kullanılan şekil ve grafiklerin çiziminde OriginLab, <https://www.biorender.com/> web sitesi ve Microsoft Office-Powerpoint araçlarından yararlanılmıştır.

### 3.3.1. Taramalı elektron mikroskobu (SEM-EDX) analizi

Aerojel numunelerin yüzey özelliklerinin belirlenmesi, mikro yapı özelliklerinin araştırılması ve parçacık boyutunun tespiti amacıyla taramalı elektron mikroskobu (SEM) analizi gerçekleştirilmiştir. Analiz sırasında Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarı'nda bulunan ZEISS marka SUPRA 40V model SEM-EDX cihazı kullanılmıştır. Görüntüleme; 15-10 kV ivmelenme voltajı altında, çalışma aralığı (WD) yaklaşık 8-10 mm olacak şekilde ikincil elektron dedektörü kullanılarak gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.2.).

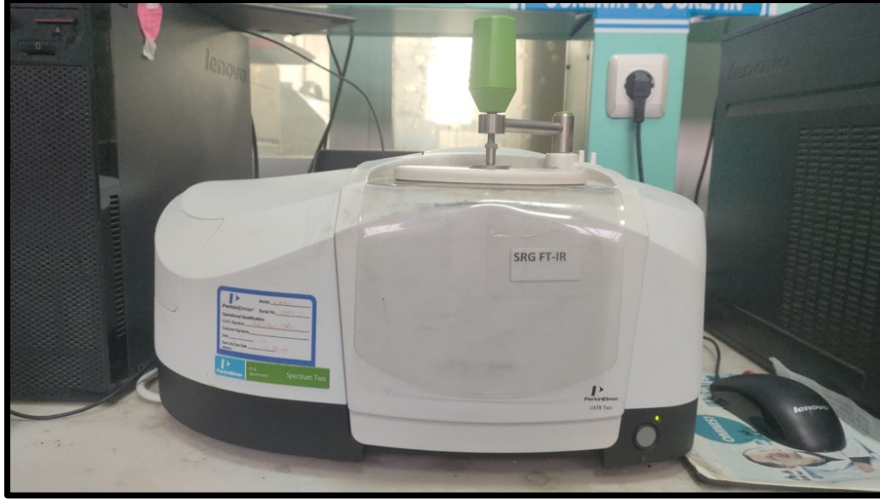


Şekil 3.2. Taramalı elektron mikroskobu (a) ve kaplama cihazı (b) görünümü.

Enerji dağıtıcılı X-ışınları spektroskopisi (EDX) analizi ile silika aerojellerin elementel bileşimleri analiz edilmiştir. SEM analizinden önce, numunelerin iletken hale gelebilmesi için platin (Pt) ile kaplama yapılmıştır. Kaplama; Quorum marka, Q300 model kaplama cihazıyla gerçekleştirilmiştir. Cihaz, kaplama süresi 1 dakika ve kaplama kalınlığı yaklaşık 100 nm olacak şekilde ayarlanmıştır.

### 3.3.2. Fourier dönüşümlü kızılötesi spektroskopisi (FT-IR) analizi

Tez çalışması kapsamında elde edilen aerojellerin ve silika kaynağı olarak kullanılan hammaddelerin spesifik kimyasal bileşimleri ile yüzey fonksiyonel gruplarının tespitinde FT-IR spektroskopisi yöntemi kullanılmıştır (Şekil 3.3.).



Şekil 3.3. Fonksiyonel grupların tespitinde kullanılan FT-IR spektroskopisi cihazı.

Analiz; Kütahya Dumlupınar Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi SRG Nano Teknoloji ve Biyoteknoloji Laboratuvarı'nda bulunan Perkin Elmer /Spectrum Two marka/model cihaz kullanılarak gerçekleştirilmiş olup  $400-4000\text{ cm}^{-1}$  dalga boyu aralığında tarama yapılmıştır.

### 3.3.3. X-ışını kırınımı (XRD) analizi

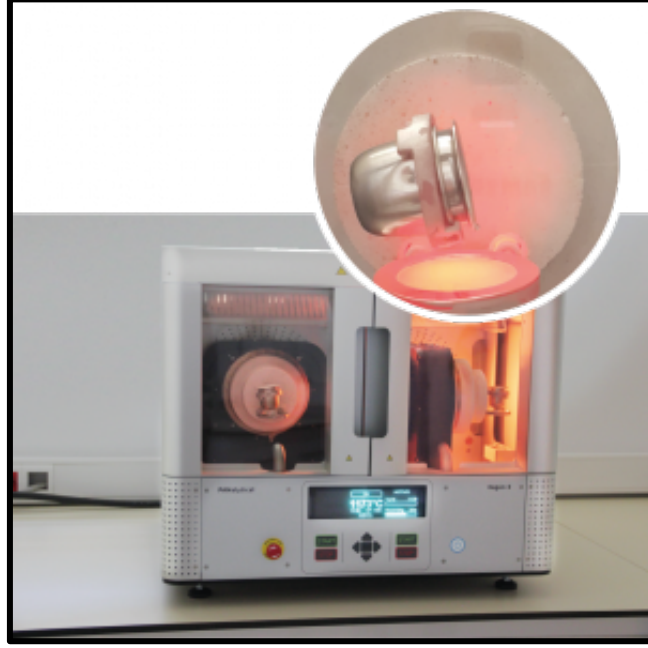
Silika kaynakları ve aerojellerin kristal yapıları; Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarı Uygulama ve Araştırma Merkezi (ARUM)'nde bulunan Panalytical ZETIUM marka/model XRD cihazı ile tespit edilmiştir. Tarama aralığı ( $2\theta$ )  $5-90^\circ$  olarak seçilmiştir. Kristal yapı tespitinde kullanılan XRD cihazı Şekil 3.4.'te verilmiştir.



Şekil 3.4. Kristal yapı tespitinde kullanılan XRD cihazı.

### 3.3.4. X-ışını floresans spektrometrisi (XRF) analizi

Aerojel sentezinde kullanılan silika kaynaklarının kimyasal kompozisyonu; Kütahya Dumlupınar Üniversitesi İleri Teknolojiler Tasarım Araştırma Geliştirme ve Uygulama Merkezi (İLTEM)'nde bulunan Panalytical/AxiosMax marka/model XRF cihazı ve Omnion veri tabanı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Kimyasal bileşimin tespitinde kullanılan XRF cihazı Şekil 3.5.'te verilmiştir.



Şekil 3.5. Kimyasal bileşimin tespitinde kullanılan XRF cihazı.

UK ve TK numunelerinin analize hazırlanmasında “*preslenmiş toz yöntemi*” kullanılırken, DT numunesi “*eritilmiş cam disk yöntemi*” kullanılarak analiz edilmiştir.

### 3.3.5. Yoğunluk ve porozite hesaplamaları

Sentez ve kurutma aşamalarının ardından elde edilen aerojel numunelerinin fiziksel özelliklerinin belirlenmesi için yığın yoğunluğu, gerçek yoğunluğu ve gözenekliliği hesaplanmıştır. Numunelerin yığın yoğunluklarının hesaplanmasında “*geometrik-gravimetrik*” yöntem tercih edilmiştir. Her üç numune hassas terazide tartılarak kütleleri alınmış, hacimleri ise en-boy-yükseklik değerleri üzerinden hesaplanmıştır.

Aerojel numunelerin yığın yoğunlukları ( $\rho_a$ ) D.13'te verilen formülden yola çıkarak hesaplanmıştır. Formülde  $m$ , numune kütlelerini ve  $v$  değeri numunenin toplam hacmini temsil etmektedir.

$$\rho_a = \frac{m}{v} \quad (D.13)$$

Aerogelleri oluşturan matris ve dolgu maddelerinden oluşan katı fazın gerçek yoğunluğunun hesaplanmasında “*Karışımlar Kuralı*” dikkate alınmıştır. D.14’te verilen formülde yer alan  $m_N$ ; aerjel türüne göre kullanılan diyatomit, uçucu kül ve taban külü kütlesi (g),  $m_{CMC}$  CMC kütlesi (g),  $m_{PVA}$  PVA kütlesi (g),  $\rho_N$ ,  $\rho_{CMC}$  ve  $\rho_{PVA}$  ise sırasıyla numune (ham diyatomit, uçucu kül, taban külü) CMC ve PVA’nın özgül yoğunluklarıdır. PVA ve CMC için firmanın verdiği yoğunluk değerleri baz alınırken, hammaddeler için literatürde yer alan değerler kullanılmıştır ( $\rho_{PVA}$ : 1,19 g/cm<sup>3</sup>,  $\rho_{CMC}$ : 1,59 g/cm<sup>3</sup>,  $\rho_{DT}$ : ~ 2,05 g/cm<sup>3</sup>,  $\rho_{UK}$ : ~ 2,26 g/cm<sup>3</sup>,  $\rho_{TK}$ : ~ 2,37 g/cm<sup>3</sup> olarak alınmıştır).

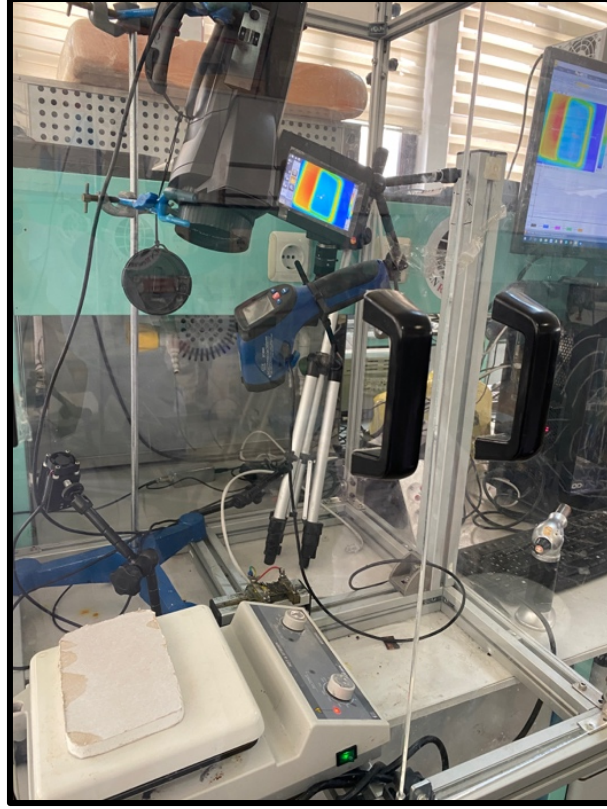
$$\rho_b = \frac{m_N + m_{CMC} + m_{PVA}}{\frac{m_N}{\rho_N} + \frac{m_{CMC}}{\rho_{CMC}} + \frac{m_{PVA}}{\rho_{PVA}}} \quad (D.14)$$

Gerçek yoğunluk ve yığın yoğunluk değerlerinin hesaplanmasıyla birlikte boşluk hacmi yüzdesini hesaplamak mümkündür. Gözeneklilik ( $\Phi$ ) oranının % cinsinden hesaplanmasında numunelerin yığın yoğunluklarının ( $\rho_a$ ) sentez sırasında kullanılan bileşenlerin gerçek yoğunluklarına ( $\rho_b$ ) oranı kullanılmış ve hesaplama formülü D.15’te verilmiştir.

$$\Phi = \left(1 - \frac{\rho_a}{\rho_b}\right) \times 100 \quad (D.15)$$

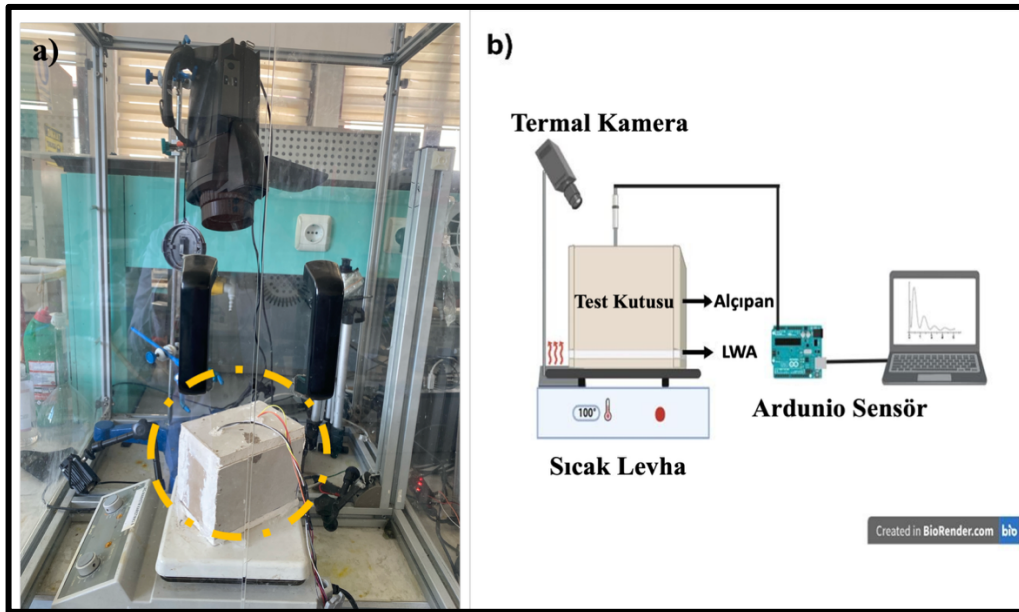
### 3.3.6. Termal kamera analizi

Uçucu kül, taban külü ve diyatomit katkılı aerogeller ile aerjel kompozitlerin zamana bağlı sıcaklığa karşı gösterdiği ısıl değişimleri izlenmiştir. Ölçümler, Kütahya Dumlupınar Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi SRG Nano Teknoloji ve Biyoteknoloji Laboratuvarı’nda bulunan Testo 885-2 termal kamera kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Ölçümler için numuneler sırasıyla 100 °C’de 60 dakika ısınma ve 60 dakika süre ile doğal soğumaya tabi tutulmuştur. Numuneleri ısıtmak için ısıtıcı manyetik karıştırıcı kullanılmıştır. Ölçümler sırasında kullanılan termal kamera düzeneği Şekil 3.6.’da verilmiştir.



Şekil 3.6. Termal kamera test düzeneği.

Alçıpan ile birleştirilerek hazırlanan LWA-kompozitler ise alçıpandan oluşan bir test kutusu düzeneğine entegre edilerek termal kamera görüntüleri alınmış, aynı zamanda Arduino DHT11 sensörü ile kutu içi sıcaklıklar ölçülmüştür. Test kutularında kutu içi sıcaklık ölçümlerinin gerçekleştirildiği test düzeneği ve Arduino sisteminin şematik gösterimi Şekil 3.7.'de verilmiştir.



Şekil 3.7. Test kutularının sıcaklık ölçümünde kullanılan termal kamera test düzeneği ve arduino sistemi.

### 3.3.7. Isıl iletkenlik analizi

DT-LWA, UK-LWA ve TK-LWA numunelerinin ısıl iletkenlik katsayıları, Süleyman Demirel Üniversitesi Doğal ve Endüstriyel Yapı Malzemeleri Araştırma Uygulama Merkezi (DEYMAM)'nde bulunan Lasercomp HFM Fox50 ısı akış ölçer cihazı kullanılarak ölçülmüştür. Ölçümler TS EN 12664 standardına uygun olarak gerçekleştirilmiştir (TS EN, 29 Kasım 2001). Ölçümler için kullanılan cihaz Şekil 3.8.'de verilmiştir.



Şekil 3.8. Isıl iletkenlik ölçüm cihazı.

Numunenin yüzey sıcaklıklarının takibi, cihazın alt ve üst plakalarında bulunan ve 0,1 °C çözünürlükle ölçüm alabilen termokupllar aracılığıyla yapılmaktadır. Sistem; üst ve alt plakalar, iki ısı akış ölçer ve ısı kayıplarını önlemek için bir koruyucudan oluşmaktadır (Davraz vd., 2025). Cihaz doğruluğu  $\pm$  %1 iken tekrarlanabilirlik değeri  $\pm$  %0,5 olarak belirtilmiştir. Isıl iletkenlik ölçümleri, kuru ortam koşulunda ve 10 °C'lik sıcaklık artışıyla gerçekleştirilmiştir.

### 3.3.8. Basınç deneyi

TK, UK ve DT kullanılarak sentezlenen aerojellerin belirli yükler karşısında sergilediği deformasyon davranışı test edilmiştir. Testin temel amacı, gerçek ortam koşullarında aerjel numunelerin yük taşıma kapasitesi ve yapısal bütünlüğünü ortaya koymaktır. Ayrıca elde edilecek veriler, aerjel matrise katkılanan farklı silika kaynaklarının iskelet yapıyı nasıl etkilediğini ve malzemenin darbe sönümlene yeteneğini açıklamaktadır. Bu amaçla her bir LWA numunesi 20x20 mm küp şeklindeki geometrilerde kesilmiştir. Her bir LWA türü için beş farklı örnek hazırlanmıştır. Her bir numunenin başlangıçtaki yükseklikleri kumpas yardımıyla

ölçülmüştür. Numuneler sırasıyla, nokta yükleme test cihazının alt ve üst metal plakaları arasında yerleştirilmiş ve belirli kuvvetlerde statik yük uygulanmıştır. Her bir yük karşısında numunedeki boyutsal değişim kumpasla ölçülerek kaydedilmiştir. D.16’da gösterildiği gibi; uygulanan kütle, yerçekimi ivmesi ( $g=9,81 \text{ m/s}^2$ ) ile çarpılarak Newton cinsinden kuvvete ( $F$ ) dönüştürülmüştür.

$$F = m \times g \quad (\text{D.16})$$

Newton cinsinden hesaplanan yük, numunenin yüzey alanına ( $A$ ) bölünerek malzemenin direncini ifade eden gerilme ( $\sigma$ ) kPa değerine dönüştürülmüştür. İlgili denklem, D.17’de verilmiştir.

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (\text{D.17})$$

Her bir kuvvete karşılık gelen uzunluk farkı ( $\Delta L$ ) kaydedilerek veri setleri oluşturulmuştur. Ölçülen uzunluk farkının başlangıçtaki uzunluğa ( $L_0$ ) oranı yüzdesi, D.18’de verilen formül kullanılarak hesaplanmış ve birim deformasyon değerleri ( $\varepsilon$ ) tespit edilmiştir.

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \times 100 \quad (\text{D.18})$$

Elde edilen veri setleri, numunelerin geometrisinden bağımsız olarak gerilme-birim şekil değiştirme grafiğini ortaya koymuştur. Aerojellerin basınç davranışı karşısındaki birim şekil değiştirme yüzdesinin hesaplanmasında; Kütahya Dumlupınar Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Fakültesi Yapı Malzemeleri Laboratuvarı’nda bulunan Yüksel Kaya Makine-Nokta Yükleme Test Cihazı kullanılmıştır (Şekil 3.9.).



Şekil 3.9. Basınç dayanımı deney düzeneği

### 3.3.9. Yanma davranışı testi

Bu çalışmada diyatomit, uçucu kül ve taban külü ile sentezlenen aerojel numunelerin yangına karşı dayanımını artırmak amacıyla yangın geciktirici kullanılmıştır. Yaklaşık 76\*26 mm boyutunda kesilen numuneler, yangın geciktirici solüsyon ile 1 saat aralıklarla, iki kat olacak şekilde kaplanmıştır. Numuneler yaklaşık 50 °C sıcaklıklı etüvde kurutulmuş ve ardından yakma işlemi gerçekleştirilmiştir. Tutuşturma öncesi ve sonrasında numunelerin yanma davranışı görüntülenmiş, video kaydı alınmıştır. Yakma testi sonrası alınan video kaydından t0, t30 ve t90 sürelerinde kesitler çıkarılarak numunelerin tutuşma ve alev yayma durumları değerlendirilmiştir.

### 3.4. Aerojellerin optimizasyonu

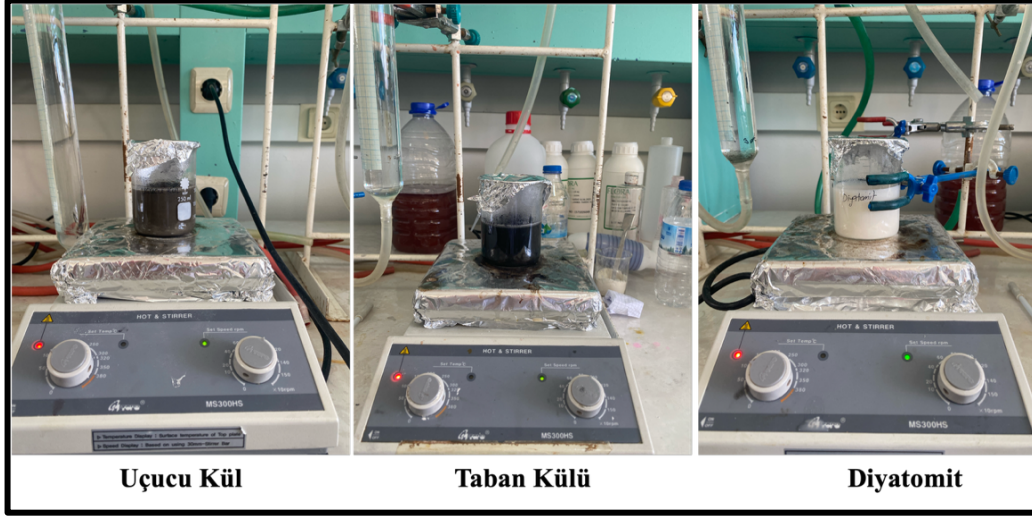
Tez çalışması kapsamında sentezlenen aerojeller için silisyum kaynağı olarak uçucu kül, taban külü ve diyatomitlerden seçilmiştir. Mevcut aerojel sentezinden farklı olarak uygulanan bu yöntem için taban külü ve diyatomitin silika kaynağı olarak kullanıldığı herhangi bir çalışmaya rastlanmamıştır. Uçucu kül ve taban külü; SiO<sub>2</sub> içeren atık geri kazanımı malzemelerdir. Bunlar, sentez sırasında inorganik iskelet yapı oluşumuna katkıda bulunmaktadır. Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ve Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> içermeleri sayesinde aerojelin rijit yapı kazanmasını sağlamaktadır. Diyatomit ise doğal puzolanik özellikte ve mikro gözenekli yapıda olan, yüksek silis içerikli malzemedir. İçerdiği yüksek orandaki SiO<sub>2</sub>, polimer katkılara tutunarak yalıtım performansını iyileştirmektedir.

Sentez sırasında kullanılan birincil bağlayıcı, biyolojik olarak parçalanabilen polivinil alkol, suda kolay çözünebilen sentetik polimer olarak bilinmektedir. Karboksimetil selüloz ise selülozik kökenli doğal polimerdir. PVA'nın sentezdeki rolü çapraz bağlayıcı iken CMC ise üç boyutlu yapı oluşumunu desteklemektedir (That Buu vd., 2023). CMC kullanımının bir diğer amacı ise homojenizatör aşamasında toz parçacıkların dibe çökmesini ve elde edilen köpük yapının sönmesini engellemektir. 90 °C karıştırma sıcaklığında PVA ve CMC molekülleri homojen hale getirilerek bağlayıcı matris faz elde edilmiş ve aerojellerin esnekliği sağlanmıştır. Islak jeller, ön dondurma işlemi öncesi homojenizatörde 15 dakika süreyle yüksek devirde (2000 rpm) köpürtülmüş ve mikro gözenek oluşumu desteklenmiştir. Bu işlem, nihai ürünün daha hafif ve yüksek yalıtım performansı kazanmasını sağlamıştır.

Kurutma yöntemi olarak dondurarak kurutma tercih edilmiştir. Islak jelin dondurulması sırasında, bünyesindeki suyun buz kristallerine dönüşerek matriste dağılması sağlanmıştır. Kurutma aşamasında ise iskelet yapı bütünlüğü korunarak, buz kristalleri sıvılaşmadan vakum altında buharlaştırılmıştır. Buharlaşma sonucu buz kristallerinin yerini hava boşluklarına bırakması hedeflenmiştir. Sentez sırasında çözücü olarak yalnızca saf su kullanılmıştır. Saf

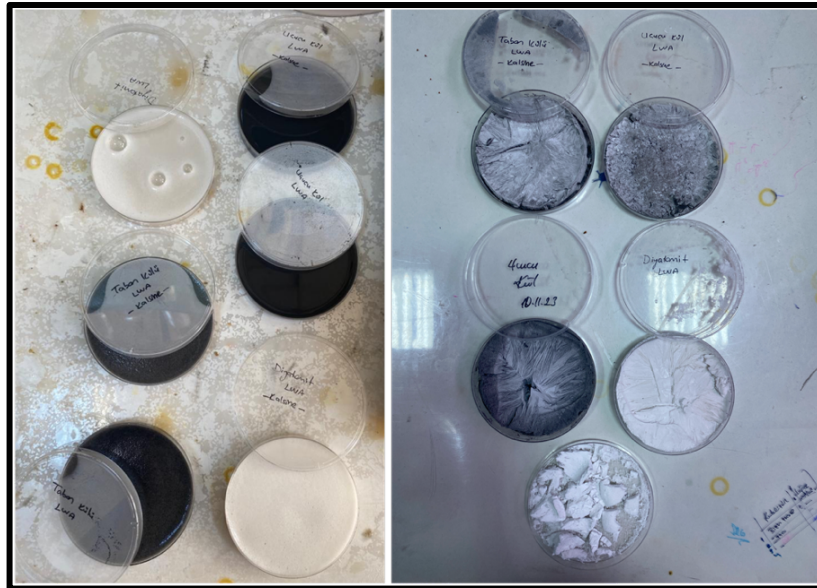
suyun reaksiyondaki kullanım amacı; PVA ve CMC çözünmesini sağlamak ve nihai üründe hiyerarşik gözenek yapısının oluşumunu sağlayan buz kristalleri oluşturmaktır.

Sentez sırasında öğütülmüş UK, TK ve DT kütlece %3, PVA kütlece %2 ve CMC kütlece %0,5 oranında kullanılmıştır. Öncelikle PVA, CMC ve saf su 90 °C’de homojen hale gelene kadar karıştırılarak sol çözeltisi hazırlanmıştır. Ardından kütlece %3 oranda uçucu kül, taban külü ve diyatomit her bir sol çözeltisine ilave edilerek 80 °C’de 3 saat süreyle karıştırılmıştır. Her bir aerojel türü için hazırlanan sol çözeltisi ve karıştırma aşaması Şekil 3.10.’da verilmiştir.



Şekil 3.10. Islak jellerin hazırlanması.

Karıştırma işleminin ardından her bir numune plastik petri kaplarına alınarak 30 dk. süreyle bekletilmiştir (Şekil 3.11.).



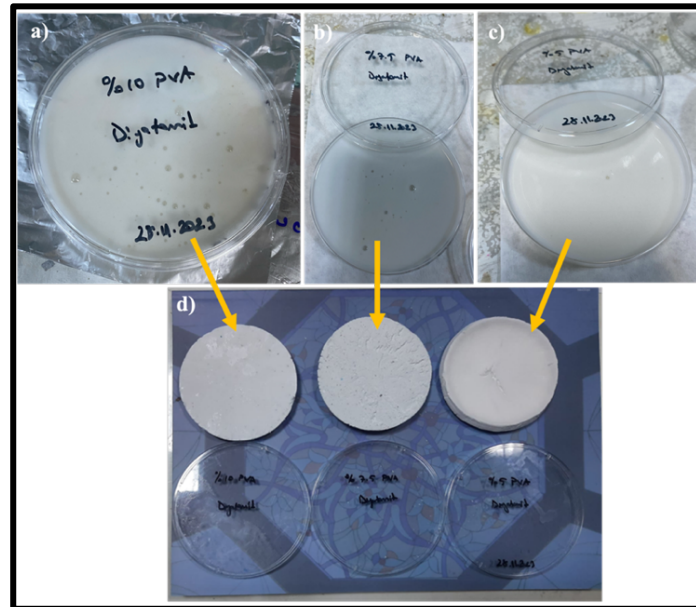
Şekil 3.11. Kalıba alınmış ıslak jeller (sol) ve kurutma sonrası görünümleri (sağ).

Islak jel numuneler önce -80 °C’de 48 saat dondurulmuş, ardından 48 saat süreyle -60 °C’de  $1 \times 10^{-3}$  milibar vakum altında dondurularak kurutulmuştur. Sentezlenen numuneler yaklaşık 8 cm çapında ve 0,7 cm kalınlığındadır (Şekil 3.12.).



Şekil 3.12. Dondurma ve kurutma aşamaları ile nihai ürünlerin genel görünümü.

Kurutulmuş aerojel numunelerin bazılarında yapısal bütünlüğün bozulması polimer oranına bağlı olarak meydana gelen bir durumdur. Bu sebeple bir sonraki reçetede farklı polimer oranları denenerek sentez gerçekleştirilmiştir. Bahsi geçen yeni reçetede PVA oranı kütlece %5, %7,5 ve %10 olarak belirlenmiş, silika kaynağı olarak yalnızca diyatomit kullanılmıştır. PVA içeriğinin değiştirilmesi dışında diğer tüm parametreler önceki sentezle aynı seçilmiştir. Elde edilen nihai ürünler Şekil 3.13.’te verilmiştir.



Şekil 3.13. Farklı PVA oranlarında hazırlanan aerojellerin fiziki görünümü.

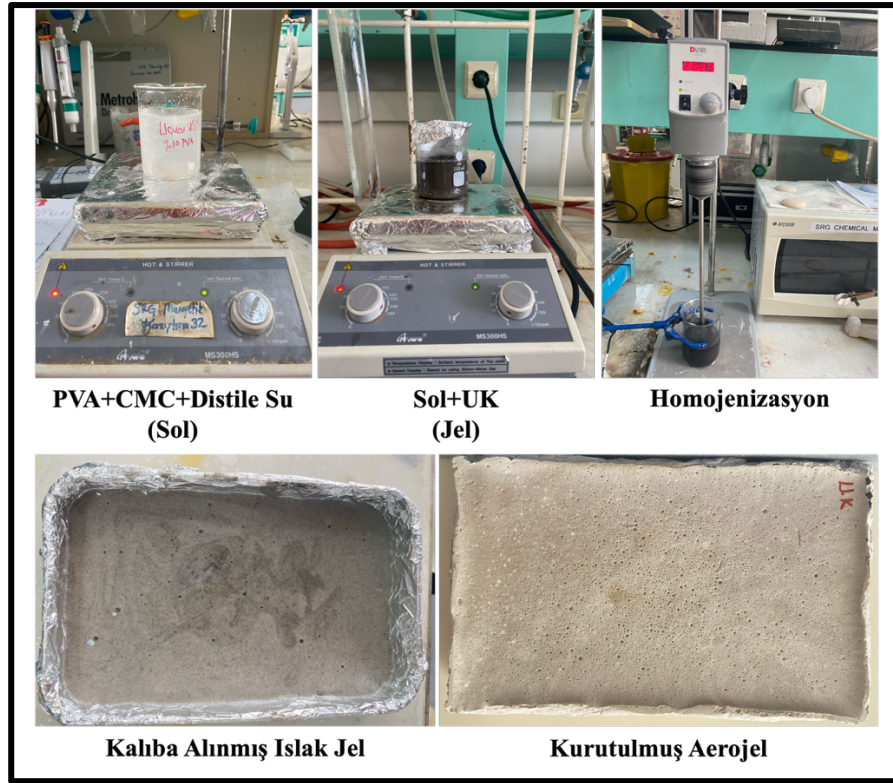
### 3.5. Aerojellerin ve arojel kompozitlerin sentezlenmesi

Ön sentez çalışmalarının ardından optimum PVA oranı %10 olarak belirlenmiştir. Tez çalışması kapsamında sentezlenecek arojellerin kütlece %10 PVA, %3 silika kaynağı ve %0,5 CMC kullanılarak sentezlenmesi kararlaştırılmıştır. Aerojel sentezinde silisyum kaynağı olarak uçucu kül, taban külü ve diyatomit kullanılmıştır. Silisyum kaynağı olarak seçilen hammaddeler, PVA ve CMC ile birlikte kullanıldığında mekanik dayanımı yüksek, nispeten düşük maliyetli kompozitlerin elde edilmesi mümkün olmaktadır. Hem PVA hem de CMC suda çözünebilir, toksik olmayan ve kaynağı bol polimerlerdir. Bağlayıcı olarak PVA ve CMC kullanılarak elde edilen homojen karışım dondurularak kurutulmuş ve elde edilen arojeller karakterize edilmiştir. Sentez sırasında kullanılan tüm parametreler Tablo 3.2’de verilmiştir.

**Tablo 3.2.** LWA numunelerin hazırlanmasında kullanılan sentez parametreleri.

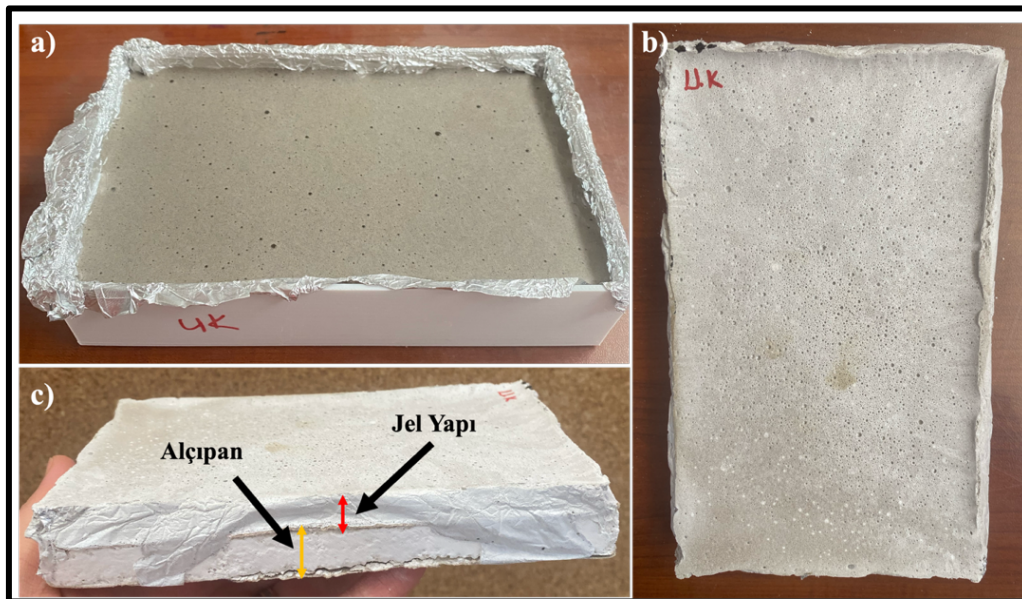
Sentez Parametreleri	UK-LWA	TK-LWA	DT-LWA
<b>Silika Kaynağı Miktarı</b>	Küt. %3	Küt. %3	Küt. %3
<b>PVA Miktarı</b>	Küt. %10	Küt. %10	Küt. %10
<b>CMC Miktarı</b>	Küt. %0,5	Küt. %0,5	Küt. %0,5
<b>Saf Su Miktarı</b>	100 ml	100 ml	100 ml
<b>Sentez Sıcaklığı</b>	80 °C	80 °C	80 °C
<b>Sentez Süresi</b>	3 sa.	3 sa.	3 sa.
<b>Homojenizasyon Süresi</b>	2000 rpm/15 dk.	2000 rpm/15 dk.	2000 rpm/15 dk.
<b>Dondurma Süresi/Koşulları</b>	-80 °C/48 sa.	-80 °C/48 sa.	-80 °C/48 sa.
<b>Kurutma Süresi/Koşulları</b>	-60 °C/1x10 <sup>-3</sup> mbar	-60 °C/1x10 <sup>-3</sup> mbar	-60 °C/1x10 <sup>-3</sup> mbar

Üç ayrı beherde 100'er ml saf su ısıtıldıktan sonra PVA ve CMC eklenerek 80 °C’de homojen hale gelene kadar karıştırılmıştır. Ardından kütlece %3 oranda uçucu kül, taban külü ve diyatomit her bir sol çözeltisine ayrı ayrı ilave edilerek 80 °C’de 3 saat süreyle karıştırılmıştır (Şekil 3.14.).



Şekil 3.14. Aerojellerin sentez aşamaları.

Hazırlanan sol çözeltileri bir müddet soğutulduktan sonra homojenizatörde 2000 rpm hızda yaklaşık 15 dakika süreyle homojenize edilmiştir. LWA-Kompozitlerin hazırlanması amacıyla elde edilen solüsyonların bir kısmı 1 cm kalınlığa 15 cm uzunluğa sahip hazır alçıpan levha üzerine dökülmüş, kalan kısmı ise alçıpansız olarak hazırlanmıştır. Islak jel numuneler önce  $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'de 48 saat dondurulmuş, ardından 48 saat süreyle  $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'de  $1 \times 10^{-3}$  milibar vakum altında dondurularak kurutulmuştur (Şekil 3.15.)

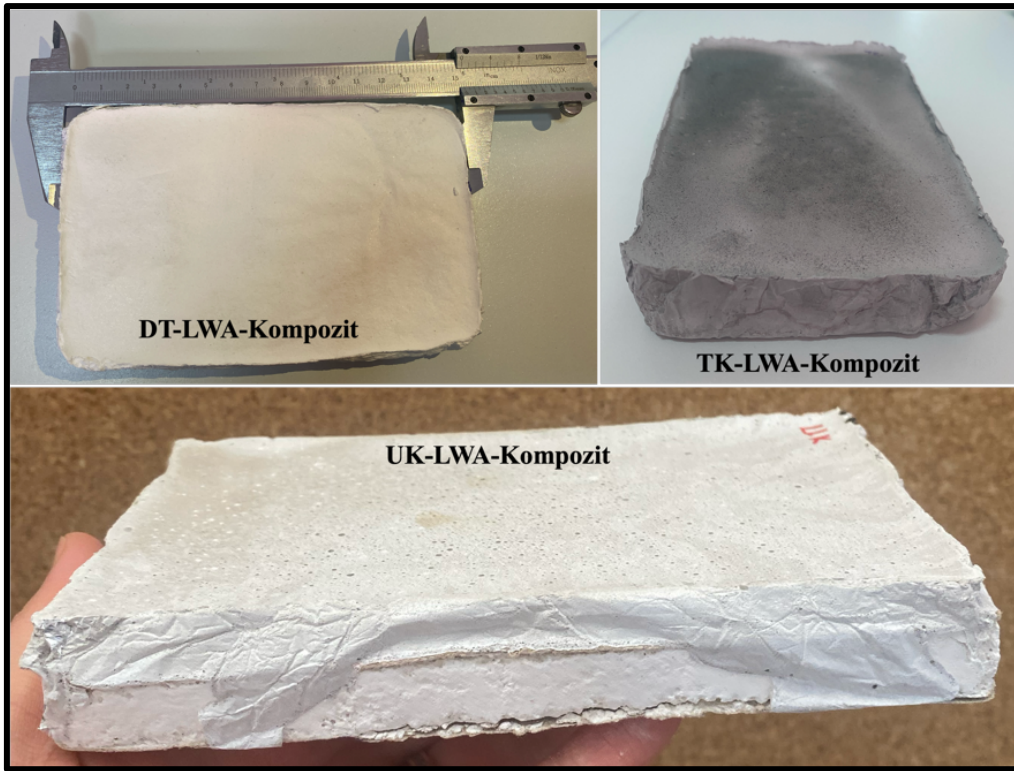


Şekil 3.15. LWA-Kompozitlerin kalıba alınması ve kurutma sonrası görünümü.

Kurutma işlemi sonrasında elde edilen aerojel kompozitlerin el örneği ve şematik gösterimi Şekil 3.16’da, elde edilen üç farklı LWA-Kompozit örneği Şekil 3.17’de verilmiştir.



Şekil 3.16. LWA-Kompozit örneği ve şematik gösterimi.

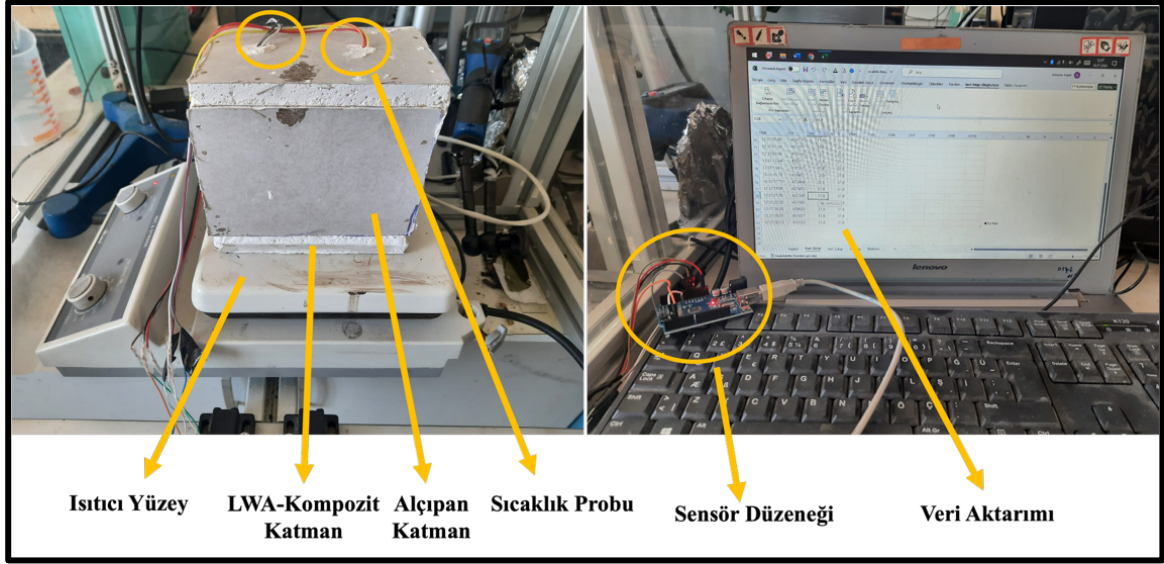


Şekil 3.17. Elde edilen üç farklı LWA-Kompozit örneği.

LWA-Kompozit numunelerin hazırlanmasının ardından, gerçek bir test odası simülasyonunu elde etmek amacıyla LWA-Kompozit numunelerle test kutuları tasarlanmıştır.

### 3.6. Aerojel kompozitlerin test kutusu olarak dizaynı

LWA kompozit yapısının, ısı yalıtımındaki etkisinin anlaşılması için Şekil 3.18.’de görülen alçıpan duvarlara sahip bir test kutusu tasarlanmıştır. Kutunun ısınma ve soğuma süreçlerindeki sıcaklık değişimleri gözlemlenerek yalıtım performansı değerlendirilmiştir.



Şekil 3.18. Alçıpan duvarlara sahip test kutusu tasarımı ve arduino düzeneği.

Test kutusu düzeneği; alçıpan, DT-LWA-Kompozit, UK-LWA-Kompozit ve TK-LWA-Kompozit kullanılarak hazırlanmıştır. Tabandan ısıtılan kutunun alt duvarı, LWA numunelerin alçıpanla birleştirilmesinden oluşan kompozitlerden meydana gelmektedir. Test kutularının iç ortam ısısı Arduino DHT11 sensörü ile ölçülürken, yüzey sıcaklıkları termal kamera kullanılarak tespit edilmiştir. Alçıpan ve UK-TK-DT LWA-Kompozit altlığı sahip test kutuları hazırlandıktan sonra ayrı ayrı dış sıcaklıkları ve iç sıcaklıkları ölçülmüştür. İlk 60 dakikada sıcaklık yaklaşık 100 °C’de sabit tutulmuş ve 60 dakikada sonunda ısı kaynağı kapatılarak doğal soğuma gözlenmiştir. DT-LWA-Kompozit, UK-LWA-Kompozit ve TK-LWA-Kompozit numunelerde yapılan ölçüm sonuçları tamamı alçıpandan oluşan kontrol numunesine ait verilerle karşılaştırılmıştır.

#### 4. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu bölümde, aerojel sentezinde kullanılan hammaddelerin SEM-EDX karakterizasyon sonuçları ile tez çalışması kapsamında hazırlanan LWA, LWA-Kompozit, LWA-Kutu ve LWA-Kaplanmış numunelerin tüm analiz sonuçları detaylı bir şekilde ele alınmıştır.

##### 4.1. Hammaddelerin karakterizasyon sonuçları

Aerojel sentezinde silika kaynağı olarak kullanılan ham UK, TK ve DT numunelerinin elementel bileşimlerinin oksit formunda yüzdesi ve kızdırma kaybı değerleri (LOI), XRF yöntemi kullanılarak tespit edilmiştir. Ham silika kaynaklarının XRF sonuçları Tablo 4.1.'de verilmiştir.

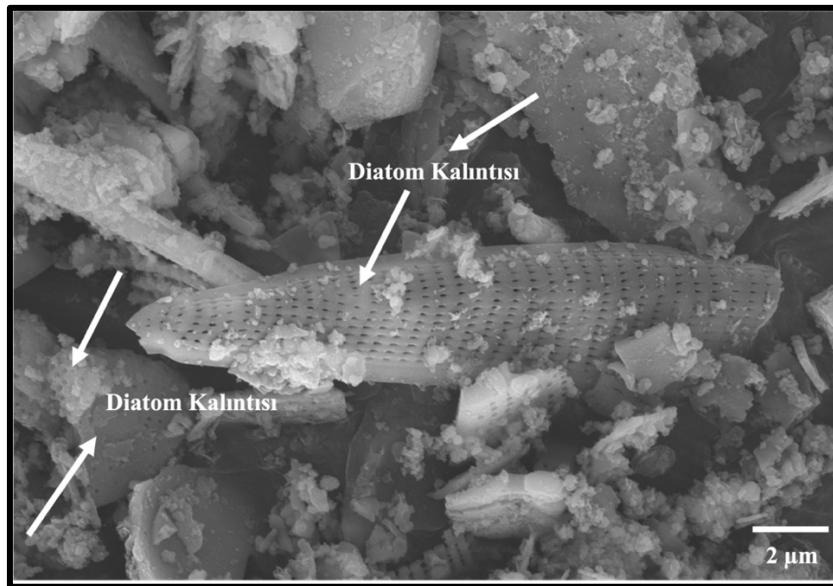
**Tablo 4.1.** Hammaddelerin XRF analiz sonuçları.

Oksit Bileşeni	Uçucu Kül (Küt. %)	Taban Külü (Küt. %)	Diyatomit (Küt. %)
SiO <sub>2</sub>	54,02	48,12	89,79
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	16,85	11,27	1,55
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	15,81	14,23	0,59
CaO	5,58	3,87	0,44
MgO	1,62	0,97	0,03
K <sub>2</sub> O	1,41	0,91	0,15
TiO <sub>2</sub>	0,81	0,71	0,09
NiO	0,47	0,41	-
SO <sub>3</sub>	0,42	0,30	-
Na <sub>2</sub> O	0,41	0,20	0,05
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-	0,17	-
MnO	0,13	0,08	-
BaO	0,07	0,08	-
<b>LOI</b>	<b>2,942</b>	<b>19,688</b>	<b>7,319</b>

Analiz sonuçları değerlendirildiğinde; uçucu kül için SiO<sub>2</sub>+Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> toplamı %86,68 (>%70) ve CaO oranı <%10 olarak hesaplanmıştır. Bu sebeple numune, ASTM C618-22 standardına göre F-Sınıfı uçucu kül olarak sınıflandırılmaktadır (ASTM, 2022) (Oyedotun, 2018). Kızdırma kaybı değerleri bakımından; en yüksek ateş zayıyatı beklenildiği üzere taban külü numunesinde ölçülmüştür. Numunede Si ve Al oksitlerin varlığı, aerojel yapıda ağ yapısını destekleyerek aerojelin dayanımını ve termal kararlılığını artırmada etkili rol oynayacaktır. Yüksek LOI değeri, yüksek oranda karbon içeren kömürün varlığından veya termik santralde

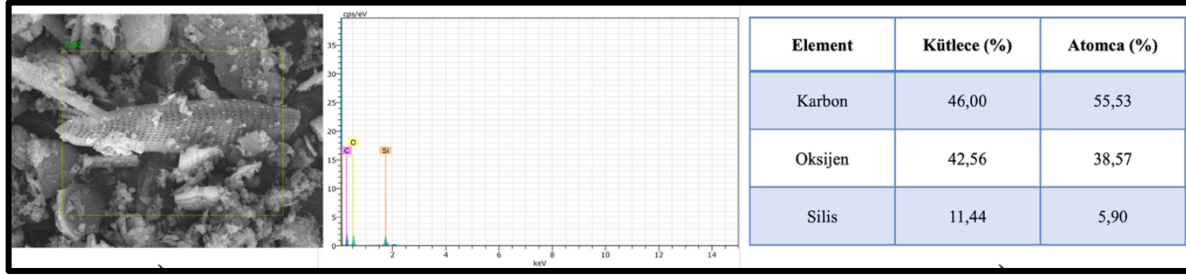
yanma veriminin nispeten düşük olmasından kaynaklanmaktadır. UK ve TK numunelerinin  $Fe_2O_3$  içeriği, nihai ürünün koyu renkli olmasına neden olacaktır.

Ham diyatomit numunesinde  $SiO_2$  içeriğinin oldukça yüksek olması, numunenin amorf silika yapısını ortaya koymaktadır. Yüksek silis oranı, aerogelin sağlam iskelet yapısının oluşumunu desteklemektedir. Aynı zamanda demir ve alümina oksit oranlarının düşük olması, DT numunesinde beyazlık derecesinin yüksek oluşunu açıklamaktadır. Uçucu kül ve taban külündeki  $Al_2O_3$  ile  $Fe_2O_3$  ve diyatomitteki  $SiO_2$  inorganik tozları sentez sırasında suyla temas ettiğinde, yüzeyleri hidroksil (-OH) gruplarıyla kaplanmaktadır. Böylece kompozit yapıda polimerik matris (PVA/CMC) ile inorganik faz arasında aerogelin iskelet yapısını oluşturan çapraz bağ oluşumları meydana gelecektir. Hammaddede düşük ısı iletkenlik değerine sahip  $SiO_2$  ve  $Al_2O_3$  oksitler, polimer matrise entegre olduğunda nihai ürünün yalıtım verimini artıracaktır (Touina vd., 2021). Aerogel sentezinde silika kaynağı olarak kullanılan TK, UK ve DT örneklerinin mikro yapı karakteristiği ve elementel bileşimi SEM-EDX analiziyle karakterize edilmiştir. Diyatomlar; mikrometreden nanometreye kadar değişen boyutlarda gözenek yapısına ve silika bazlı hücre duvarına sahip sucul canlılardır. Tek hücreli mikro alg olarak adlandırılan diyatomların amorf silika yapıdaki hücre duvarı, nesilden nesile aktarılan silisli kabuk yapı (früstül) olarak bilinmektedir (Walsh vd., 2017). Diyatomit ise fosilleşmiş diyatome kalıntılarından oluşan silisli sedimanter kayadır. Kimyasal olarak inert yapıda, oldukça gözenekli morfolojiye ve yüksek yüzey alanına sahiptir. Ham diyatomitin SEM analiz görüntüleri incelendiğinde genellikle çubuksu veya pulsu yapısı biyogenik kökenli diyatomların varlığını doğrulamaktadır. Ayrıca silis kabuklu diyatomların gözenekli yapısı da açıkça görülmektedir (Şekil 4.1.).



Şekil 4.1. Ham diyatomitin SEM analiz görüntüleri.

EDX spektrumunda diyatomitin bileşimi kantitatif olarak hesaplanabilmektedir. Numunede yüksek karbon içeriği (kütlece %46), diyatomitin bünyesindeki biyolojik kökenli kalıntılar ve organik kökenli maddelerden kaynaklanmaktadır (Şekil 4.2.). Yüksek Si (kütlece %11,44) ve O (kütlece %42,56) elementlerinin varlığı, diyatomitin doğal bileşimine atfedilmektedir (Reka vd., 2021). Elementlerin olası bileşik dağılımında atomik oran bakımından O/Si yaklaşık 2:1 olarak hesaplanmış olup bu değer amorf SiO<sub>2</sub> için ideal molar oranını yansıtmaktadır (Dicha vd., 2025).

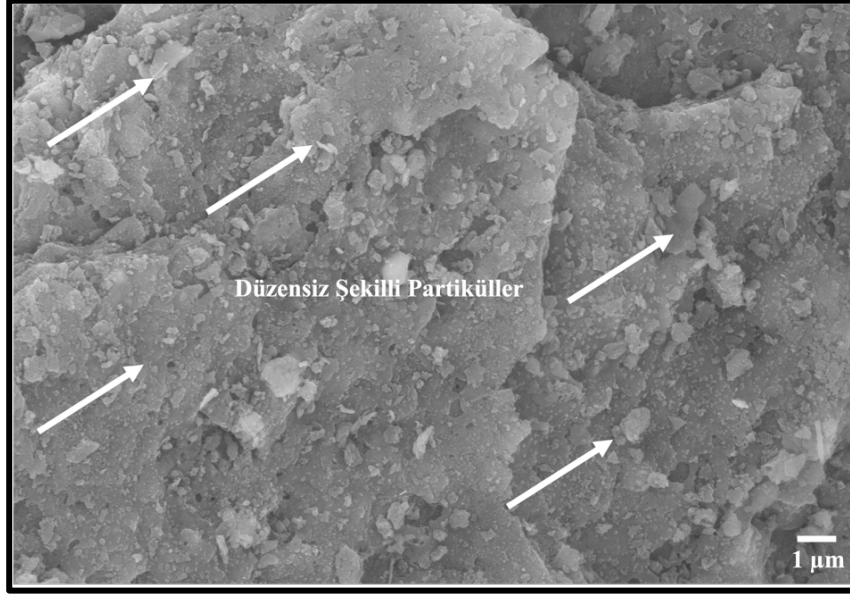


Şekil 4.2. Ham diyatomitin EDX analiz sonuçları.

Enerji santrallerinde kömürün yanması sırasında %10-20 oranda taban külü elde edilirken, ortaya çıkan uçucu kül oranı %80-90 kadardır. Taban külü ve uçucu kül benzer kimyasal bileşime sahipken, taban külü uçucu küle kıyasla daha az reaktiftir. Uçucu kül genellikle mükemmel yuvarlak, pürüzsüz ve sağlam yapıda çok sayıda küçük küreler şeklindedir. Bu yapı yüksek yüzey alanı ve hafifliği nedeniyle hava üflendiğinde hareket ettiğinden uçucu kül olarak adlandırılır. Taban külü ise çok daha düzensiz, büyük, kompakt ve gözenekli mikro yapısıyla ön plana çıkar. Uçucu küller elektrostatik ayırıcılar kullanılarak toplanırken taban külü fırın tabanına düşen iri erimiş kül olarak ifade edilir (Haberl & Schuster, 2019).

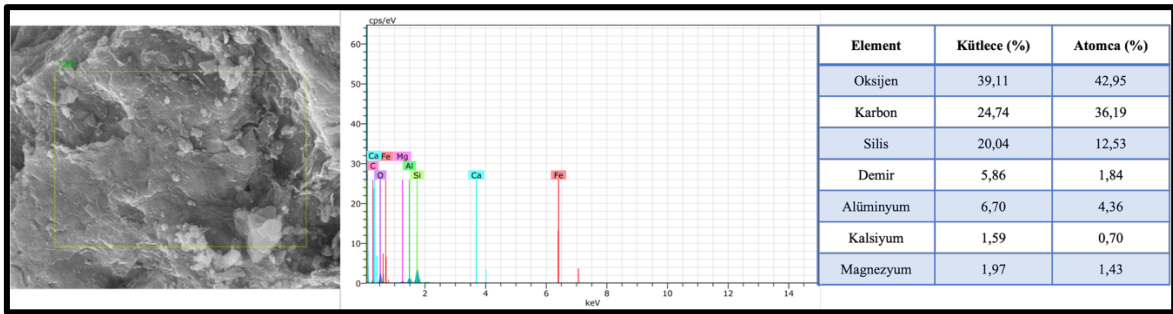
Hem UK hem de TK amorf ve kristalin fazların heterojen karışımına sahip, yanmış kömür kalıntılarıdır. UK ve TK aynı testisten çıkmış olsa bile farklı bileşimlere sahip olmaları mümkündür. UK bileşiminde baskın elementleri alüminyum (Al), kalsiyum (Ca), magnezyum (Mg), sodyum (Na) ve silisyum (Si) olan ferro-alüminosilikatlar yer almaktadır (Tsakalou vd., 2018). Ham taban külünün SEM analiz görüntüsü Şekil 4.3'te verilmiştir. TK numunesine ait SEM görüntüleri incelendiğinde; UK'ya oranla daha iri taneli, düzensiz, yoğun ve eriyik yapıli parçacıkların var olduğu söylenebilmektedir. Camsı ve kompakt yapıdaki iri parçacıklar, keskin köşeli, parçalı mineral fazlardan meydana gelmektedir. UK numunesinin aksine TK'da küresel yapının varlığından söz edilmemektedir. TK numunesinin doğrudan fırın tabanında birikmiş olması bu köşeli ve taneli yapıyı açıklamaktadır. TK, yüksek sıcaklıklarda ergiyen mineral fazların soğuyarak katılaşması sonucu oluşmuş ve fırın tabanında toplanmış atıklardır (Seraya vd., 2025). Si ve Al oranı UK numunesine göre daha düşük olması, TK numunesinin daha az

amorf camsı faz ve daha kristalin yapı sergilediğini ortaya koymaktadır. Literatürde tipik TK'nın hematit, kuvars, feldspat ve mullit gibi kararlı kristalin faz içerdiği bilinmektedir (Smolka-Danielowska vd., 2019).



Şekil 4.3. Ham taban külünün 10KX büyütmede SEM analiz görüntüsü.

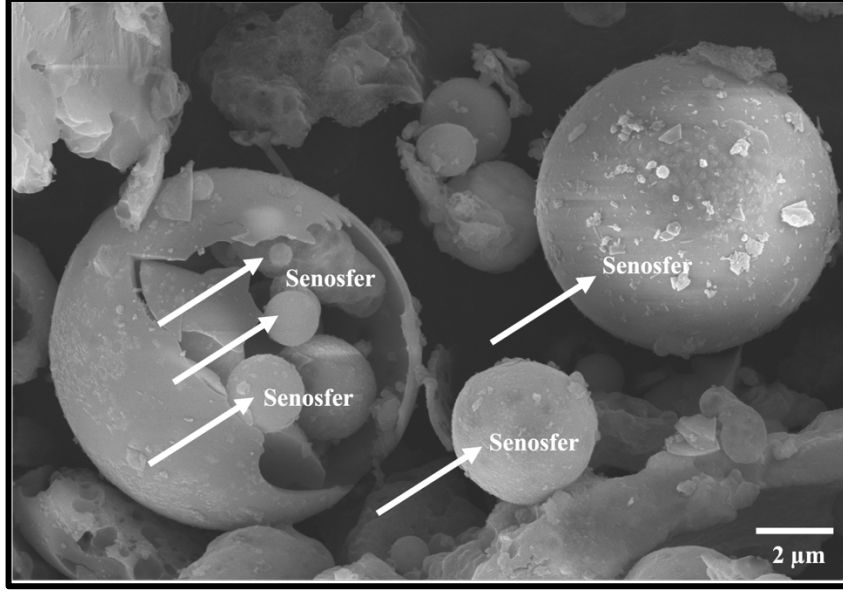
TK numunesinin EDX spektrumunda Fe içeriğinin yüksek olması (kütlece %5,86); kömürün kazan türü ve sıcaklığına bağlı olarak hematit, manyetit ve benzeri formlarda demir oksit fazına işaret etmektedir (Şekil 4.4.). UK ile benzer şekilde Ca (kütlece %1,59) ve Mg (kütlece %1,97) oranının düşük olması numunenin düşük kireç içeren F-sınıfı kül karakterini yansıtmaktadır (A. C. Santos vd., 2023).



Şekil 4.4. Ham taban külünün EDX analiz sonuçları.

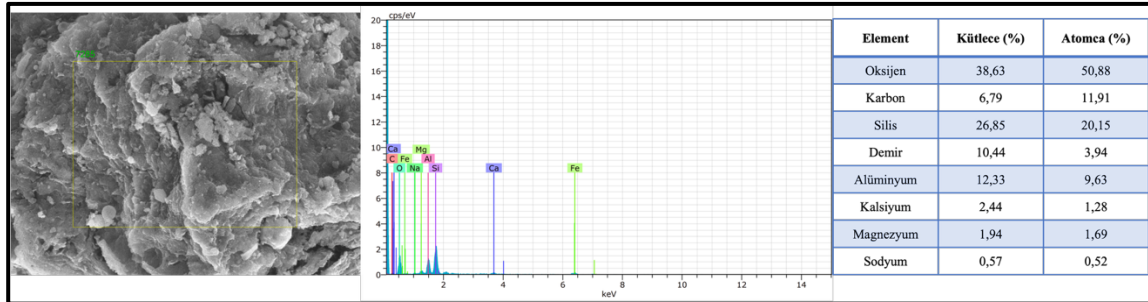
Ham UK numunesinin SEM görüntüsü Şekil 4.5'te verilmiştir. UK özellikleri; kömürün mineralojik bileşimi, tipi, inceliği, fırın sıcaklığı ve minerallerin fırında tutulma süresi gibi faktörlere bağlıdır. Toz kömürle çalışan fırınlarda, çalışma sıcaklığı 1400 °C'yi aştığında yüksek sıcaklık etkisiyle kömürde bulunan minerallerde oksitlenme, ayrışma, kaynaşma, parçalanma veya aglomerasyon gözlemlenmektedir. Bu durum, uçucu külün morfolojik yapısında

değişikliğe sebep olmaktadır. Genel morfolojik yapıda küresel tanelere ek olarak büyük boyutlu, düzensiz şekilli yanmamış karbon parçaları gelişmektedir. Hızlı soğuma sırasında tanecikler arasındaki difüzyon etkisiyle alüminosilikat ve demir açısından zengin kümeleşmiş küreler ve düzensiz amorf parçacıklar meydana gelmektedir (Paul vd., 2007).



Şekil 4.5. Ham uçucu külün 10KX büyütmede SEM analiz görüntüsü.

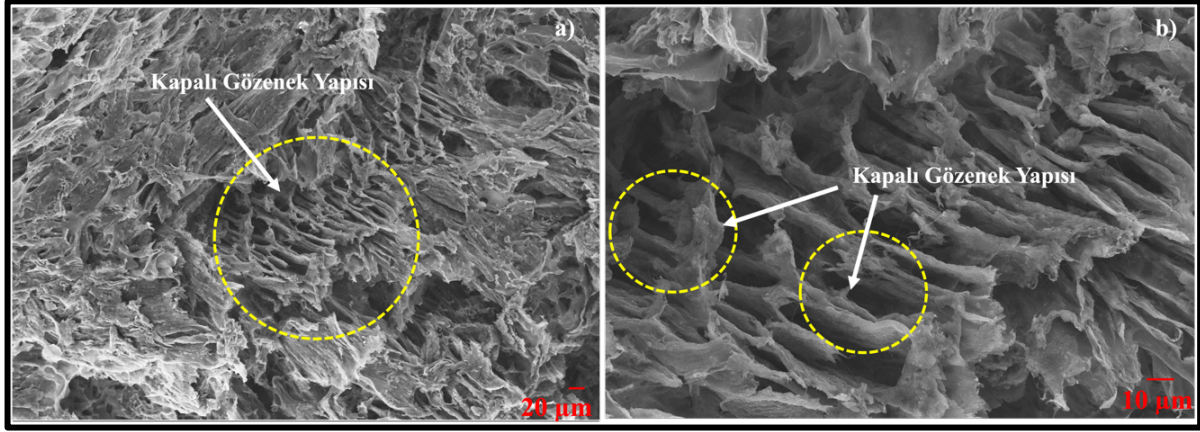
SEM görüntüsü incelendiğinde; UK numunesinin camsı, parçalı ve düzensiz yüzeye sahip morfoloji sergilediği görülmektedir. Küresel ve yarı küresel taneler yer yer aglomeralanmış veya bozunmuş yapıdadır. Numunede camsı amorf faz ile kristalin faz birlikte yer almaktadır. Numune, mineralojik olarak heterojen morfolojik yapı sergilemektedir. Ham UK numunesinin EDX analizinde Al, Si ve Fe elementlerine ait belirgin pikler görülmektedir. Düşük Ca (kütlece %2,44) miktarı bu numunenin tipik düşük kireç içeren F-sınıfı uçucu kül olduğuna işaret etmektedir (Şekil 4.6). Bileşimde yüksek karbon miktarı (kütlece %6,79) numunede yanmamış karbon veya kömür kalıntılarında kaynaklanmaktadır. Numune bileşimindeki dağılım literatürle de uyum göstermektedir (Haberl & Schuster, 2019; Sutcu vd., 2019).



Şekil 4.6. Ham uçucu külün EDX analiz sonuçları.

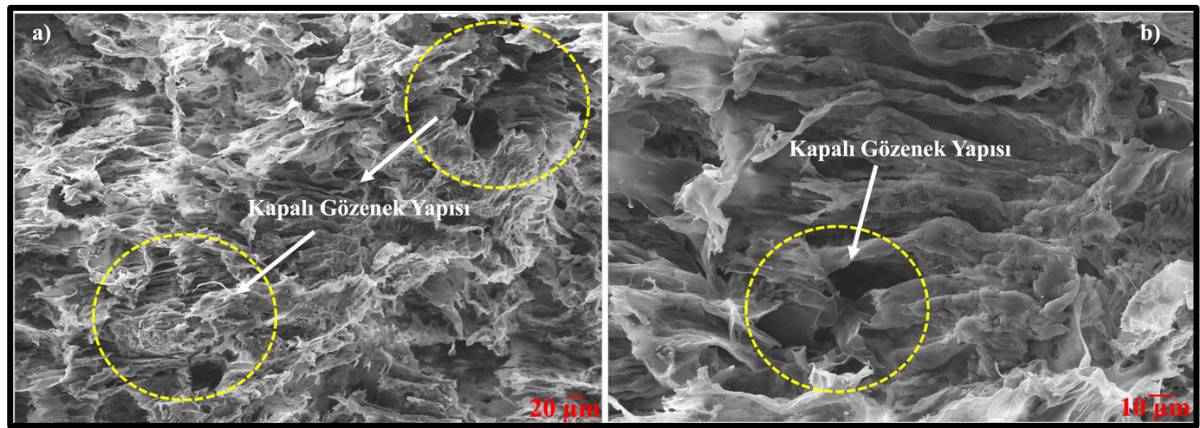
## 4.2. Aerojellerin SEM-EDX analizi sonuçları

Diyatomit, uçucu kül ve taban külü ile sentezlenen aerojellerin yüzey morfolojileri taramalı elektron mikroskobu (SEM) cihazında SE detektör kullanılarak, 10-15 kV voltaj altında belirlenmiştir. Enerji dağıtıcı X-ışınları spektroskopisi (EDX) analizi ile silika aerojellerin elementel bileşimleri analiz edilmiştir. Şekil 4.7, Şekil 4.8 ve Şekil 4.9’da sırasıyla diyatomit, taban külü ve uçucu kül ile sentezlenen aerojellerin SEM görüntüleri verilmiştir.



Şekil 4.7. DT-LWA numunesinin SEM analiz görüntüleri. a) 300 X büyütmedeki gözenek yapısı, b) 1000 X büyütmedeki gözenek yapısı görünümü.

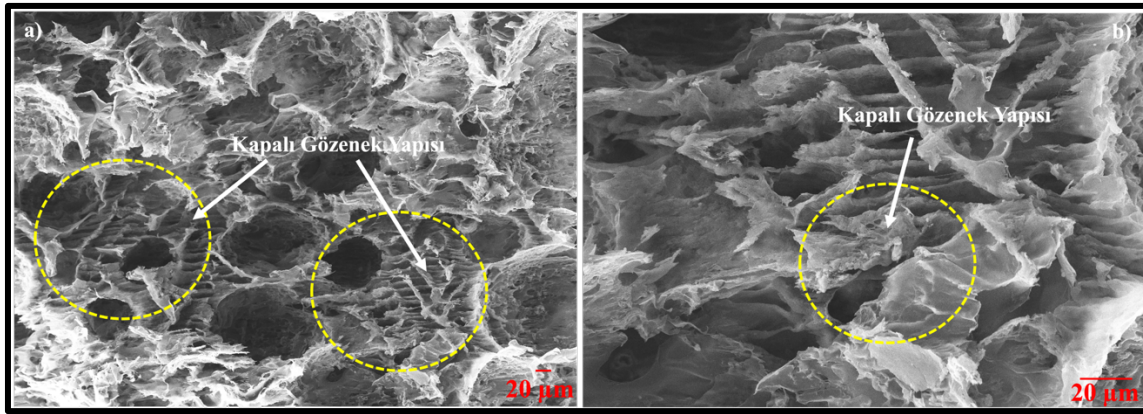
SEM görüntüleri tüm numunelerin gözenek yapısını ortaya koymaktadır. Özellikle diyatomit katkılı aerojelin homojen dağılımlı, düzenli hücresel yapı sergilediği görülmektedir. Gözeneklerin homojen dağılımında, solüsyonun yüksek devirde iyi bir şekilde karıştırılmasının katkı sağladığı düşünülmektedir.



Şekil 4.8. TK-LWA numunesinin SEM analiz görüntüleri. a) 300 X büyütmedeki gözenek yapısı, b) 1000X büyütmedeki gözenek yapısı görünümü.

SEM görüntülerinde çok sayıda birbirine bağlı, kapalı hücre 3D gözenek yapısının varlığı açıkça görülmektedir. Söz konusu gözeneklerin ısı ve ses yalıtımında etkin rol oynadığı

bilinmektedir. Sentezlenen aerojellerin düzenli, homojen hücre yapısı sayesinde gözenekler içinde hapsolmuş hava miktarı artmaktadır (F. Lou vd., 2023). Yalıtım malzemesinin gözeneklerinde tutulan hava hacmi, ısı iletimini engellemeye yardımcı olarak ısı yalıtımını mümkün hale getirmektedir. Gözenek yapısı sayesinde elde edilen hafiflik ise binalarda yapı yükünün azalmasını sağlarken, aerjelin alçıpan gibi yapı malzemesi ile birleştirilmesiyle hafif yalıtım kompoziti elde etmek mümkün olacaktır. Sentez sırasında aerjellerin kurutulmasında dondurarak kurutma yöntemi tercih edilmiştir. Dondurarak kurutma sırasında hidrojelde bulunan sıvı faz hızla katı faz durumuna geçmektedir. Böylelikle yapı bütünlüğü korunurken, homojen, düzenli gözenekli yapı elde edilmiş olur. Aerjelin iç yapısında elde edilen homojen düzenli poroz yapı sayesinde ısı yalıtım performansı artırılmış olmaktadır. Sentez sırasında PVA, CMC, uçucu kül, taban külü ve diyatomit her bir numunede oransal olarak eş miktarda kullanılmıştır. Literatür çalışmaları katkı miktarının artırılmasının nihai aerjelin yoğunluğunda artışa, boşluk ve gözenek boyutunda azalmaya sebep olacağını bildirmektedir (Do vd., 2021; X. Wu vd., 2018).

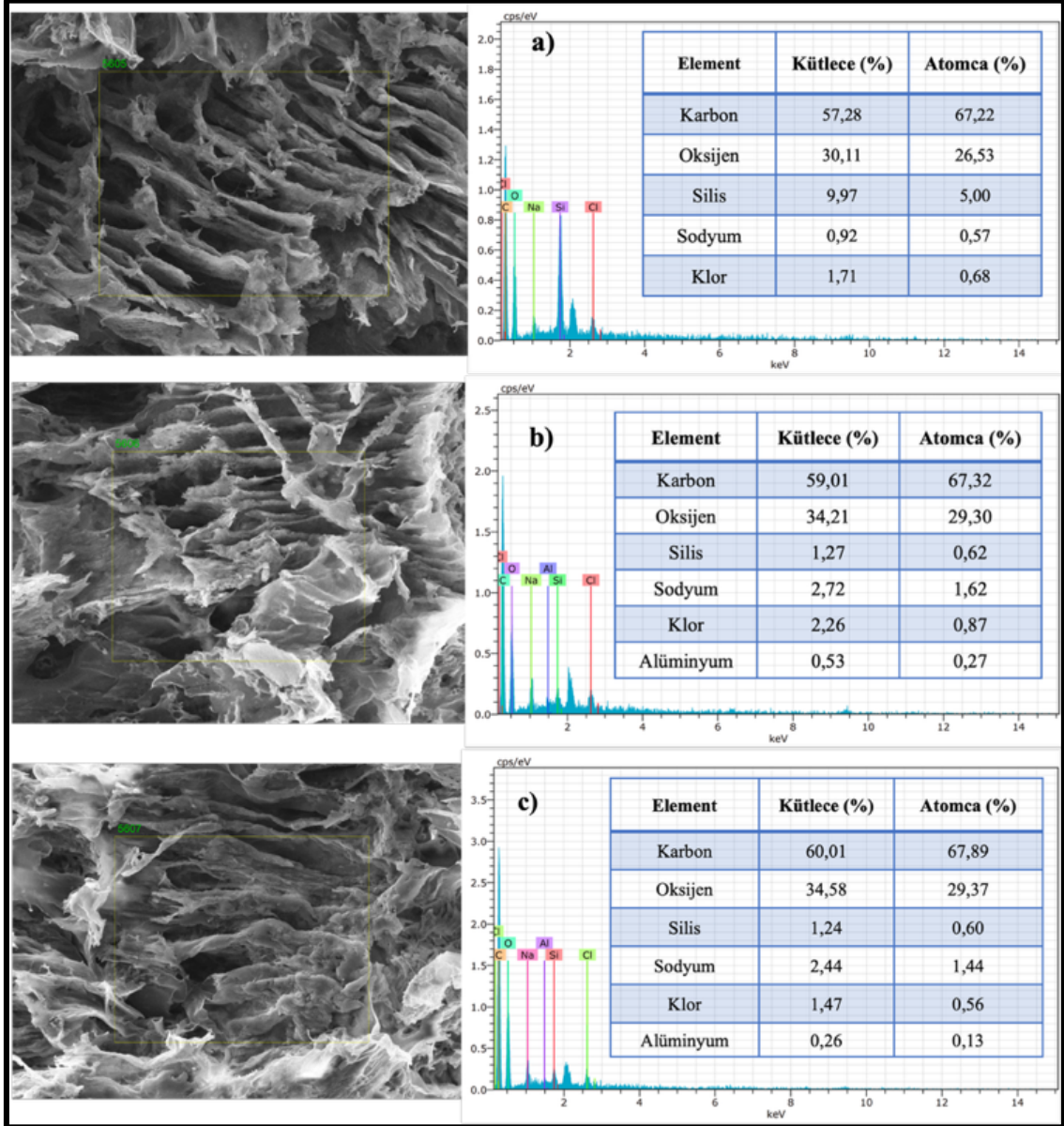


**Şekil 4.9.** UK-LWA numunesinin SEM analiz görüntüleri. a) 300 X büyütmedeki gözenek yapısı, b) 1000 X büyütmedeki gözenek yapısı görünümü.

SEM görüntülerinde dikkat çeken en önemli yapı, gözenek çeperlerinin düzensiz ve kıvrımlı petek yapı oluşturmuş olmasıdır. Dondurarak kurutma yöntemiyle elde edilmiş polimerik aerjellerde yönlendirilmiş veya düzensiz yapıda petek benzeri yapıların oluşumuna sıklıkla rastlanmaktadır. Kurutma aşamasında buz kristallerinin büyümesiyle sıkışan ince çeperler ısı transferini engelleyici rol oynamaktadır. Ayrıca bu yapılar, katı faz üzerinden iletilen ısının izlemesi gereken ortalama serbest yolu uzatarak ısı transferinde önemli ölçüde gecikme sağlamaktadır (J. Zhou vd., 2024). Söz konusu kapalı gözeneklerdeki durgun hava sayesinde doğal konveksiyonu sıfırlayarak gaz moleküllerinin serbest hareketini kısıtlar ve gaz fazı ısı iletimini minimumda tutmaya yardımcı olur (Zhong vd., 2014). Hücresel yapı yönlendirmelerin ve gözeneklerde hapsedilmiş hava boşluklarının fonon saçılmasını artırdığını, böylece katı faz üzerinden gerçekleşen ısı iletimini büyük oranda düşürdüğü çeşitli araştırmalarla kanıtlanmıştır

(L. Li vd., 2025). Tez çalışması kapsamında sentezlenen aerojellerde bu yapı literatür çalışmalarıyla uyumludur.

LWA numunelerinin EDX spektrumu Şekil 4.10'da verilmiştir. Şekilde; a) DT-LWA numunesi, b) UK-LWA numunesi ve c) TK-LWA numunesinin EDX spektrumunu temsil etmektedir. EDX spektrumu incelendiğinde; diyatomit ile sentezlenmiş aerojelin büyük oranda silisyum (Si), karbon (C) ve oksijen (O) içerirken, az miktarda klor (Cl) ve sodyum (Na) elementlerinden meydana geldiğini söylemek mümkündür.



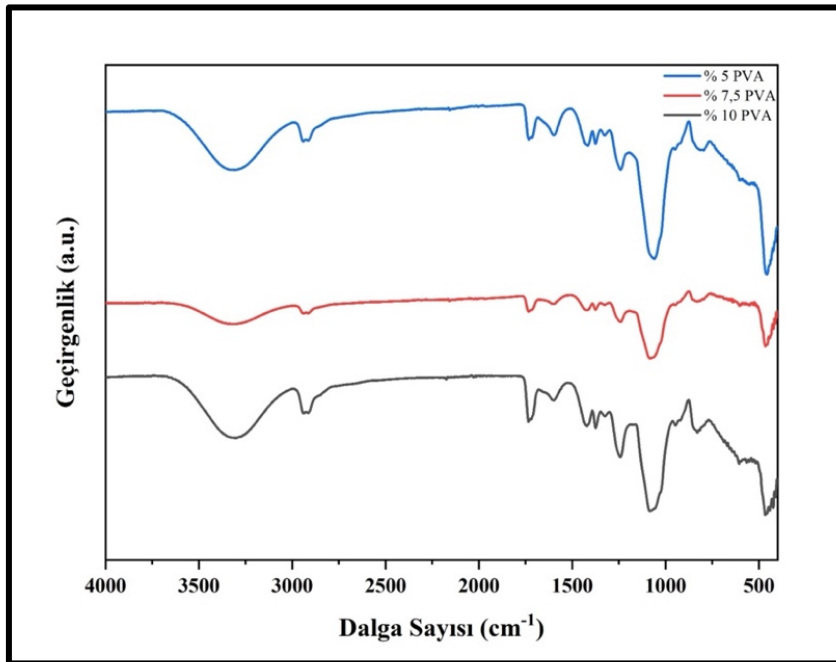
Şekil 4.10. DT, UK ve TK-LWA numunelerinin EDX analiz sonuçları.

Uçucu kül ve taban külü katkılı aerojellerde ise diyatomitli numuneden farklı olarak az miktarda Al safsızlığı içermektedir. Aerojel numunelerin EDX spektrumuna göre, nispeten

homojen dağılımlı elementel yapı gözlenmektedir. SEM ve EDX sonuçlarının literatürle uyumlu olduğu söylenebilmektedir (That Buu vd., 2023).

### 4.3. Aerojellerin FT-IR analizi sonuçları

Bağlayıcı olarak PVA ve CMC kullanılarak elde edilen homojen karışım, dondurularak kurutulmuş ve elde edilen aerojeller, optimum reçetenin belirlenmesi amacıyla karakterize edilmiştir. Bu kapsamda %5, %7,5 ve %10 PVA içeren her bir numunenin FT-IR spektrumu alınmış ve termal kamera ölçümleri yapılmıştır. Aerojel numunelerin FT-IR spektrumu Şekil 4.11'de verilmiştir. Spektrumda  $3400-1600\text{ cm}^{-1}$  dalga boylarında gözlemlenen pikler, aerojel sentezi sırasında fiziksel olarak adsorbe edilmiş sudan ve PVA polimerinin hidrojen bağından kaynaklanan -OH gruplarını temsil etmektedir (Duong vd., 2021).  $2900$  ve  $1380\text{ cm}^{-1}$ 'de görülen iki pik C-H adsorpsiyon piki olup sentez sırasında kullanılan PVA polimerinden kaynaklanmaktadır (Nguyen vd., 2020).  $1250-850\text{ cm}^{-1}$  adsorpsiyon pikleri Si-C bağlarının deformasyon ve gerilme titreşimlerine karşılık gelmektedir.  $1000-750\text{ cm}^{-1}$  adsorpsiyon pikleri ise karakteristik Si-O-Si bağ yapısının asimetrik titreşimleridir. Ayrıca  $460\text{ cm}^{-1}$  pikler O-Si-O bağ yapısına işaret eden bükülme titreşimleridir. FT-IR sonuçlarının literatürle uyumlu olduğunu söylemek mümkündür (Duong vd., 2021). Farklı polimer içerikli numunelerden %10 PVA içeren numunenin özellikle  $3300-3400\text{ cm}^{-1}$  dalga boyları ve  $1000-750\text{ cm}^{-1}$  adsorpsiyon piklerinin belirginleşmesi, diyatomit-polimer etkileşiminin daha güçlü bağlarla sonuçlandığına işaret etmektedir. Aerojellerin yapısal bütünlüğünün korunması ve güçlü bağ yapısının oluşması için optimum oranın %10 PVA olduğuna kanaat getirilmiştir.



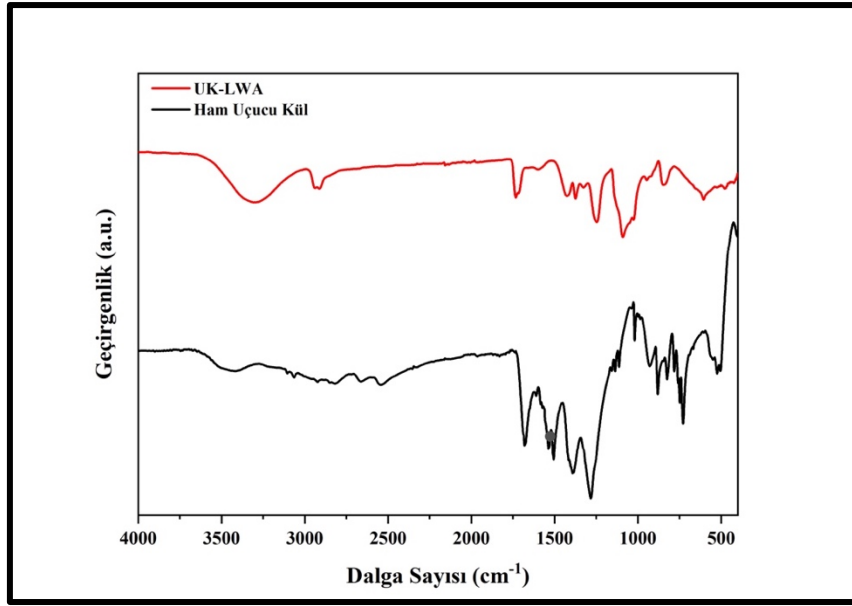
Şekil 4.11. Farklı polimer oranına sahip DT-LWA numunelerin FT-IR grafiği.

Uçucu kül, taban külü ve diyatomit kullanılarak sentezlenen aerojel numunelerin FT-IR spektrumları sırasıyla Şekil 4.12., Şekil 4.13. ve Şekil 4.14'te; karakteristik piklere ait fonksiyonel gruplar ise Tablo 4.2'de verilmiştir. FT-IR grafiklerinde ham silika kaynakları ile bu kaynaklardan sentezlenen arojellerin spektrumları karşılaştırılmalı olarak verilmiştir. Uçucu kül katkılı aerojel için; PVA'nın tipik bantlarını temsil eden  $3310 \text{ cm}^{-1}$  dalga boyu civarındaki geniş ve güçlü pik -OH bağının germe pikidir. Aynı pik taban külü için  $3318$ , diyatomit katkılı aerojel için  $3315 \text{ cm}^{-1}$  dalga boyunda gözlemlenmiştir. Söz konusu pik absorpsiyon tepe noktası katı parçaları bir arada tutmaya yarayan, aerojel matristeki en önemli bağlardan biri olan hidrojen bağının varlığına işaret etmektedir (Le vd., 2024).

**Tablo 4.2.** FT-IR spektrumlarındaki karakteristik titreşim frekansları.

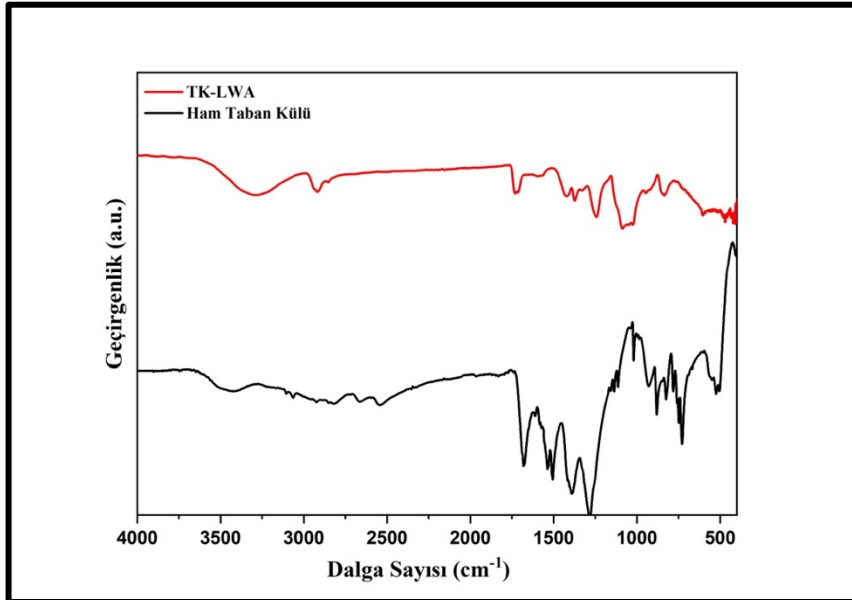
Fonksiyonel Gruplar	Dalga Boyu ( $\text{cm}^{-1}$ )		
	DT- LWA	UK-LWA	TK- LWA
O-Si-O	423	419	423
Si-O-(Si)	1085	1089	1087
C-H	1240	1245	1246
Si-O/C-O	1375	1321	1325
C-O	1730	1733	1733
C-H	2909	2922	2918
-OH	3315	3310	3318

Uçucu kül, taban külü ve diyatomit için sırasıyla  $2922$ ,  $2918$  ve  $2909 \text{ cm}^{-1}$  dalga boylarındaki bant C-H fonksiyonel grubu, PVA ve CMC varlığından kaynaklanmaktadır. Uçucu kül aerojel için  $1321$ - $1245 \text{ cm}^{-1}$  dalga boylarında görülen iki pik PVA/CMC kaynaklı hidroksil grupları (C-OH) ve C-H adsorpsiyon pikini temsil etmektedir (Le vd., 2024).  $1089$  ve  $846 \text{ cm}^{-1}$  dalga boylarında gözlemlenen yoğun asimetric gerilme titreşimi Si-O-Si varlığına işaret ederken,  $525 \text{ cm}^{-1}$  dalga boylarında O-Si-O bağı gözlenmektedir (Şekil 4.12.).  $946 \text{ cm}^{-1}$  dalga boyundaki pikler ise Al-O veya Al-OH alüminyum silikatların veya alüminyum alümina silikatların varlığına işaret etmektedir (Do vd., 2021).



Şekil 4.12. Ham uçucu kül ve uçucu kül katkıli aerjelin FT-IR grafiği.

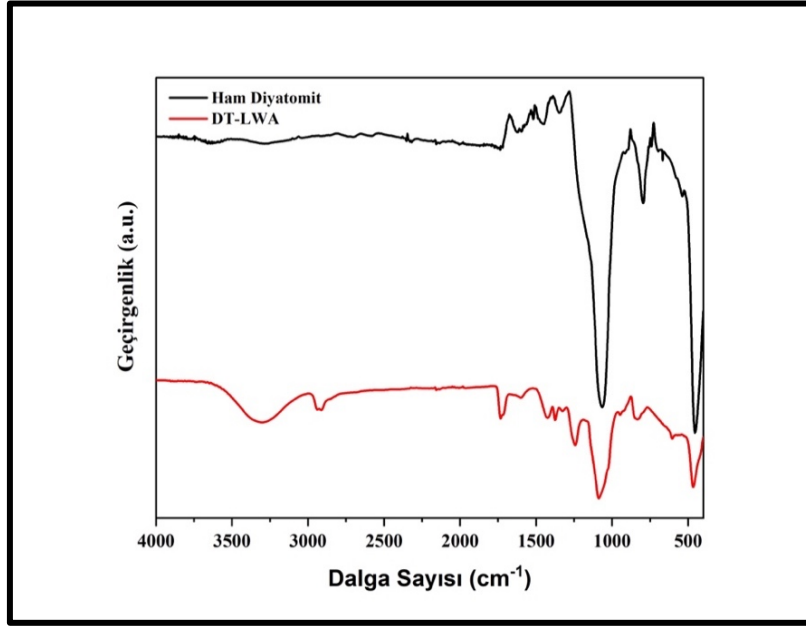
Taban külü için; 2918  $\text{cm}^{-1}$  dalga boyunda kömürün yanması ile ortaya çıkan C-H grubu, 1733  $\text{cm}^{-1}$  dalga boyundaki pik ham taban külü ve taban külü katkıli LWA için kömürün oksidasyonu ile ilişkilendirilen C=O bağı, 1325-1246  $\text{cm}^{-1}$  dalga boylarında Si-O ve C-O fonksiyonel grubu gözlenmektedir (Şekil 4.13.). Spektrumda 847  $\text{cm}^{-1}$  dalga boyu civarında gözlenen pik Sİ-O-M (M=Si veya Al) grubuna işaret ederken, 423  $\text{cm}^{-1}$  dalga boyundaki pikin kaolin ve illit gibi kil minerallerinden kaynaklandığı düşünülmektedir (Y. X. Chen & Yu, 2024).



Şekil 4.13. Ham taban külü ve taban külü katkıli aerjellerin FT-IR grafiği.

Diyatomit için; 1085  $\text{cm}^{-1}$  dalga boyunda gözlenen karakteristik pik Si-O-Si grubu ve 423  $\text{cm}^{-1}$  dalga boyunda O-Si-O fonksiyonel grubu temsil etmektedir (S. Liu vd., 2018). 1730  $\text{cm}^{-1}$

civarında gelişen yeni pik oluşumunun ise PVA ile diyatomitin etkileşiminden kaynaklandığı düşünülmektedir.

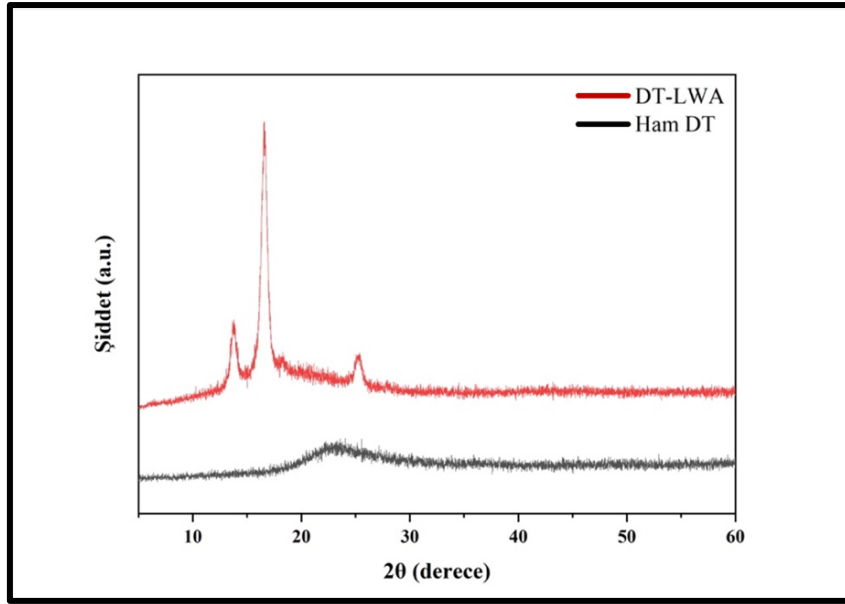


Şekil 4.14. Ham diyatomit ve diyatomit katkılı aerojelin FT-IR grafiği.

Sentezlenen aerojellerin FT-IR analizi ve EDX sonuçlarına göre nihai ürünlerin çoğunluğu Si, O ve C bileşiminden meydana gelmektedir. FT-IR spektrumu ise PVA ve CMC varlığını doğrularken aynı zamanda Si-O-Si bağ yapısını açıkça ortaya koymaktadır.

#### 4.4. Aerojellerin XRD analizi sonuçları

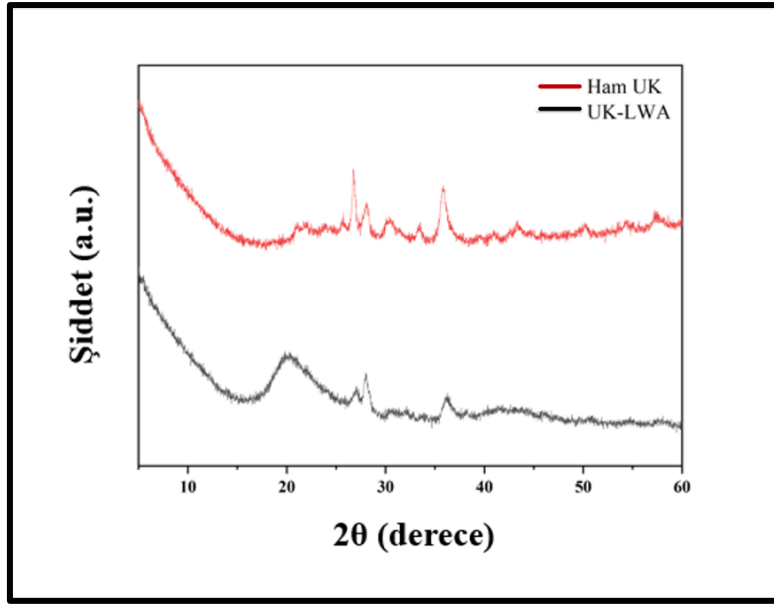
Ham UK, DT ve TK ile bunlardan sentezlenen LWA numunelerinin kristal yapısı XRD yöntemi kullanılarak ortaya konulmuştur. Şekil 4.15'te ham DT numunesinin XRD deseni verilmektedir. Spektrumda  $2\theta$  yaklaşık  $20^\circ$  civarında diatom ve silikanın karakteristiği olan, keskin piklerin neredeyse hiç bulunmadığı, oldukça yayvan ve geniş tepe yapısı gözlenmiştir. Bu pik, tipik amorf silisin karakteristiğidir (Z. Liu vd., 2022). Temelde, opal-A adı verilen amorf  $\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ , XRD spektrumunda  $2\theta$  yaklaşık  $20^\circ$ -  $24^\circ$  aralığında geniş bir tepe olarak görülmektedir. Ham DT, yüksek reaktif ve saf amorf silika kaynağıdır. XRD desenlerinde safsızlık mineralleri olarak kuvars fazı ve muskovit fazı yer almaktadır. XRD, bu yapıyı açıkça ortaya koymaktadır (Z. Hu vd., 2017).



Şekil 4.15. Ham diyatomit ve diyatomitli sentezlenen aerojelin XRD grafiği.

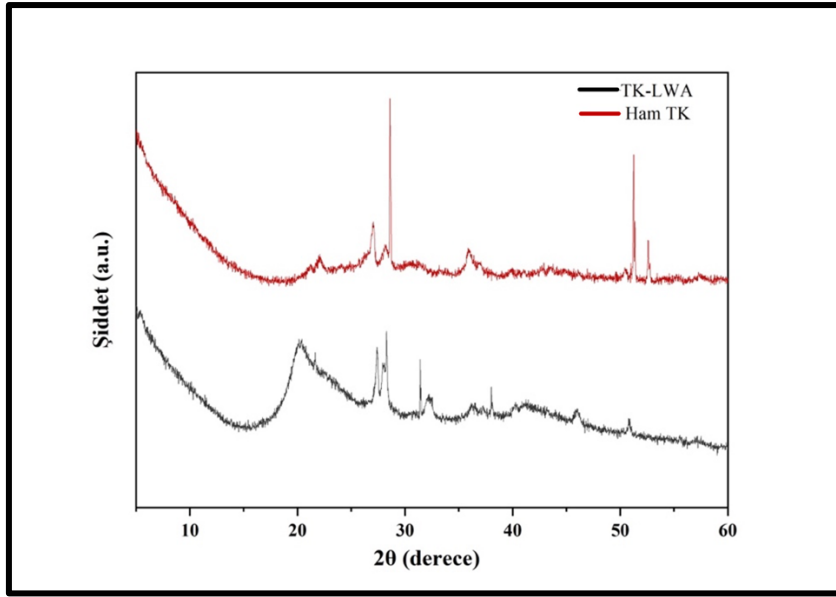
DT-LWA numunesinin XRD deseninde  $2\theta$  yaklaşık  $14^\circ$ ,  $17^\circ$  ve  $24^\circ$  civarında keskin ve yüksek kristalin pik oluşumu mevcuttur ( $2\theta$   $13,87^\circ$ ,  $16,68^\circ$  ve  $25,39^\circ$ ) (Balci vd., 2025). Bu pikler, LWA yapısında yer alan PVA'dan kaynaklanmaktadır.  $2\theta$  yaklaşık  $19,5^\circ$ 'deki pik, PVA'nın ana kristalin pikini gösterirken  $2\theta$  yaklaşık  $40^\circ$  civarındaki daha zayıf ve geniş pik PVA ikincil pikidir.  $2\theta$  yaklaşık  $20-22^\circ$  aralığındaki amorf zemin ise diyatomit matrisin amorf karakterini yansıtmaktadır (Balci vd., 2025; Yi vd., 2024). DT-LWA numunenin XRD grafiğinde gözlenen  $2\theta$  yaklaşık  $26^\circ$  civarındaki zayıf pik, diyatomitin yapısındaki eser miktarda kristalin kuvarsa işaret etmektedir.

Ham UK numunesinin XRD yapısı ham TK ile benzerlik göstermektedir (Şekil 4.16).  $2\theta$  yaklaşık  $27^\circ$  ve  $35^\circ$  civarında keskin pikler burada da görülmektedir.  $2\theta$  yaklaşık  $27^\circ$  kuvars,  $2\theta$  yaklaşık  $35^\circ$  ise mullit varlığına işaret etmektedir. UK, TK'ya göre daha yüksek sıcaklıklara maruz kaldığından XRD deseninde kristalin piklerin ardından geniş amorf tepe oluşumu gözlenmektedir. Bu tepenin yüksekliği ve yayvan oluşu, yüksek oranda amorf silisli cam faza ve yüksek puzolanik aktiviteye işaret etmektedir (C. Wang vd., 2020). UK-LWA numunesinin XRD deseninde  $2\theta$  yaklaşık  $20^\circ$  civarında yaygın halde amorf tepe ile karakterize edilmektedir.  $2\theta$  yaklaşık  $27^\circ$  de numunede polimerik matrisin seyreltme etkisiyle kristalin piklerin şiddeti azalmıştır. Bu bağlamda UK amorf camsı fazının, solün jelleşme sürecinde aktif rol oynadığı düşünülmektedir. Jel yapıda homojen dağılım ve jelleşme eğilimi, kristal piklerin kaybolmasına neden olmaktadır. TK-LWA'ya göre amorf fazın daha baskın olması, UK yapısının reaktivite ve puzolanik etkisi ile açıklanabilmektedir (Ali vd., 2022). UK için XRD deseninde yer alan kristal fazlar; numunenin mullit ve kuvars ile amorf maddeler içerdiğini doğrulamaktadır.



Şekil 4.16. Ham uçucu kül ve uçucu küle sentezlenen aerogelin XRD grafiği.

Ham TK numunesinin XRD grafiği incelendiğinde (Şekil 4.17), numunenin başta kuvars olmak üzere yüksek oranda kristalin fazlar içerdiği görülmektedir. Spektrumda  $2\theta$  yaklaşık  $27^\circ$ ,  $\alpha$ -SiO<sub>2</sub> formundaki kuvarsın varlığına işaret etmektedir.  $2\theta$  yaklaşık  $29^\circ$  ve  $52^\circ$  açılardaki baskın pikler, taban külünün yüksek Ca içeriği ve yavaş soğumasına bağlı olarak gelişen anortit fazını temsil etmektedir. Ayrıca eser miktarda mullit (3Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.2SiO<sub>2</sub>) ve hematit (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) pikleri gözlenmektedir (Xia vd., 2025). TK-LWA numunesinde  $2\theta$  yaklaşık  $20^\circ$  civarında keskin piklerden ziyade yayvan ve geniş amorf tepenin baskın olduğu görülmektedir. Bu durum, sol-jel işlemiyle başlangıçta kristal yapıdaki kuvarsın polimer matriste dağılmasıyla açıklanabilmektedir. Taban külünün puzolanik yapısı sulu ortamda polimer ve reaktiflerle amorf silikat jel matrise katkıda bulunarak amorf yapıya dönüşümünü desteklemektedir (Hanh vd., 2024). XRD grafiği, TK'nin aerogel matrise başarıyla entegre edildiğini açıklamaktadır. XRD deseninde silikanın belirgin piklerinin olmaması, silikanın PVA matrisinin tamamına eşit olarak dağıldığını, amorf tepe varlığı ise gözenekli ve düzensiz yapıdaki aerogel iskeletin oluştuğu göstermektedir (Cong vd., 2024).



Şekil 4.17. Ham taban külü ve taban külü ile sentezlenen aerojelin XRD grafiği.

Sonuç olarak; amorf yapıdaki ham DT, polimerik matris (PVA/CMC) entegrasyonu sırasında polimer zincirler kendi içinde düzenli ve yarı kristalin yapı oluşumunu desteklemektedir. UK ve TK örneklerinde kristalin yapı polimer matrisinde dağılarak seyreltici etki ortaya çıkarmıştır. DT-LWA numunesinde gözlenen polimerik matris düzeni ve diyatomitin doğal gözenekli yapısı malzemenin mikroyapısal kararlılığına katkı sunmaktadır.

#### 4.5. Aerojellerin yoğunluk ve porozite hesaplaması sonuçları

Tez çalışması kapsamında üç farklı malzeme kullanılarak aerjel numuneler sentezlenmiştir. Elde edilen LWA numunelerinin fiziksel parametreleri ve hacim hesaplaması Tablo 4.3'te detaylıca verilmiştir.

Tablo 4.3. Sentezlenen aerjellerin kütle, boyut ve hacimleri.

Numune Adı	Kütle (g)	Genişlik (cm)	Uzunluk (cm)	Yükseklik (cm)	Dış Hacim (cm <sup>3</sup> )
DT-LWA	11,55	8,5	13,2	0,9	100,98
UK-LWA	10,67	8,6	13,9	0,9	107,59
TK-LWA	13,54	8,6	13,9	0,8	95,63

Hemen hemen eş boyutlara sahip aerjel numunelerin kütleleri; DT için 11,55 g, UK için 10,67 g ve TK için 13,54 g olarak ölçülmüştür. Başlangıçta her üç sentez için de aynı miktarda PVA, CMC ve hammadde kullanılmış olmasına rağmen uçucu kül ile sentezlenen nihai numune diğer iki aerjel numunesinden daha düşük kütleyle sahiptir.

Her bir numune için kütlenin toplam hacme oranından elde edilen “yığın yoğunluk” değerleri ( $\rho_a$ ) ve aerojellerin her bir bileşenini kapsayan “gerçek yoğunluk” değerleri ( $\rho_b$ ) hesaplanmıştır. Gerçek yoğunluk ve yığın yoğunluk değerlerinin hesaplanmasıyla birlikte “boşluk hacmi” tespit edilmiştir. Hesaplama sonuçları Tablo 4.4’te verilmiştir.

**Tablo 4.4.** Sentezlenen aerojellerin yoğunluk ve gözeneklilik değerleri.

Numune Adı	Yığın Yoğunluk $\rho_a$ (g/cm <sup>3</sup> )	Gerçek Yoğunluk $\rho_b$ (g/cm <sup>3</sup> )	Boşluk Hacmi $\Phi$ (%)
DT-LWA	0,114	1,341	91,50
UK-LWA	0,099	1,358	92,71
TK-LWA	0,142	1,366	89,60

Tablo 4.4. incelendiğinde; aerojellerin yığın yoğunlukları arasında en düşük yoğunluk değeri 0,099 g/cm<sup>3</sup> ile UK-LWA, en yüksek değer ise TK-LWA numunede tespit edilmiştir (0,142 g/cm<sup>3</sup>). Yığın yoğunluk değerleri, numunelerin ultra hafif yapısını ortaya koymaktadır. Numunelerin gerçek yoğunluk değerleri “karışımlar kuralından” yola çıkılarak hesaplanmış ve 1,341-1,366 g/cm<sup>3</sup> aralığında değişen değerler iskelet yoğunluğunu tutarlı bir şekilde ortaya koymuştur. Gözeneklilik değerleri arasında; %92,71 ile UK-LWA en yüksek gözenekliliğe sahip numune iken TK-LWA numunesinde %89,60 en düşük gözeneklilik değeri hesaplanmıştır. UK-LWA numunesinin yüksek gözenekliliği, silika kaynağının polimer matriste en verimli gözenek yapıyı oluşturduğuna işaret etmektedir.

Literatür çalışmalarıyla karşılaştırıldığında; (Do vd., 2021) tarafından yapılan bir çalışmada uçucu kül katkıli aerjel sentezlenmiş, kütlece %3 uçucu kül katkıli aerjelin 0,072 g/cm<sup>3</sup> yoğunluğa ve %95,78 gözenekliliğe sahip olduğunu bildirmiştir. Sentez sırasında uçucu kül katkı miktarının artmasının yoğunlukta bir artışa ve gözeneklilikte ise azalmaya sebep olmuştur. Bir başka çalışmada (Le vd., 2024), atık lastik ve uçucu kül kullanarak sentezledikleri aerjellerde ultra düşük yoğunluk (0,055 g/cm<sup>3</sup>) ve gözeneklilik (%95,6) elde edildiği rapor edilmiştir. Uçucu kül ve bağlayıcı olarak PVA kullanılarak sentezlenen bir başka aerjel numunesinde 0,10-0,19 g/cm<sup>3</sup> yoğunluk ve %90’a yakın yüksek gözenekli yapı elde edilmiştir. Sentez sırasında uçucu kül ağırlıkça %2,5 ve PVA ağırlıkça %1 oranda kullanılmıştır (Duong vd., 2021). Sonuçlar; sentezlenen numunelerin düşük yoğunluklu, oldukça yüksek gözeneklilikte olduğunu göstermekte ve literatür sonuçları ile de uyum sağlamaktadır.

#### 4.6. Aerojellerin ısı iletkenlik analizi sonuçları

Diyatomitle sentezlenen alçıpsız aerjel numunenin ısı iletkenliği 0,041 W/(m.K) olarak ölçülmüştür (Balci vd., 2025). Bu değer UK-LWA için 0,040 W/(m.K) ve TK-LWA

numunesi için 0,031 W/(m.K) olarak tespit edilmiştir. Literatür çalışmaları incelendiğinde; lastik aerojeller 0,035-0,047 W/(m.K) ısı iletkenlik değeri sergilerken (Ba Thai vd., 2019), termik santrallerde kömür yakılmasından kaynaklanan katı atık olan uçucu külden sentezlenen aerojelin termal iletkenliği 0,042–0,050 W/(m.K) ölçülmüştür (Duong vd., 2021). Bir başka çalışmada uçucu kül ve polimer katkılı aerojelin termal iletkenliği 0,040-0,047 W/(m.K) olarak bildirilmiştir (Do vd., 2021). İçi boş kapok lifleri kullanılarak sentezlenen aerojelin termal iletkenliği ise 0,0531 W/(m.K) olarak ölçülmüştür (Y. Xu vd., 2023). Geleneksel yalıtım malzemelerinden geliştirilmiş polistirenin ısı iletkenlik değeri 0,030-0,040 W/(m.K), mineral yünü 0,030-0,040 W/(m.K) ve cam yünü için 0,033-0,044 W/(m.K) olduğu bilinmektedir (Zhu vd., 2025). Bu bağlamda, tez çalışması kapsamında sentezlenen aerojellerde yüksek ısı yalıtım performansı elde edilmiştir.

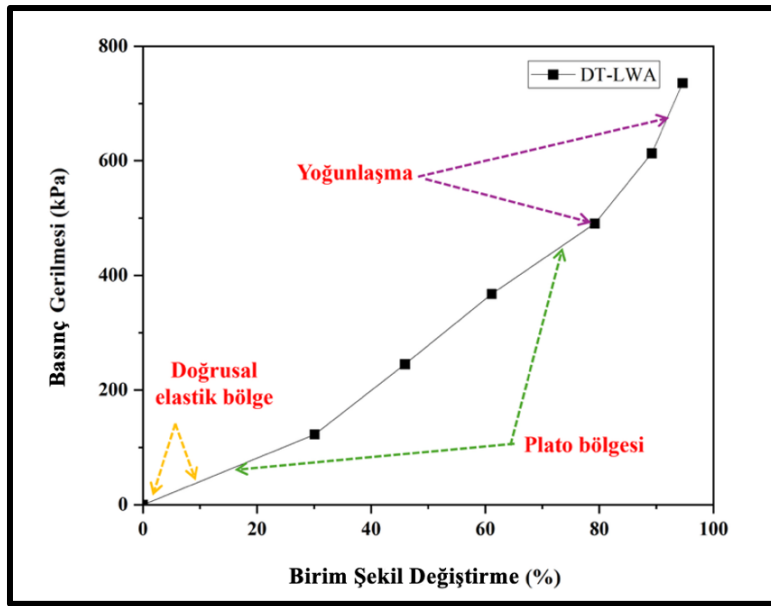
Isıl iletkenlik sonuçlarına göre TK-LWA numunesinin beklenenden daha düşük ısı iletkenlik değerine sahip olduğu dikkat çekicidir. Diğer iki numuneden daha düşük gözenekliliğe sahip olmasına rağmen en düşük ısı iletkenlik değerini vermesi, gözenek boyutu dağılımı ve kapalı hücre gözenek yapısının oranı ile açıklanmaktadır (X. Yang vd., 2013). Ayrıca numunenin daha yüksek yığın yoğunluğa sahip olması, konveksiyonla ısı transferini kısıtlamış ve ısı iletkenlik değerini düşürmüş olabileceği sonucuna varılmıştır. Analiz sonuçları değerlendirildiğinde; ısı iletkenlik sonuçları hem ticari yalıtım malzemeleri hem de laboratuvar ölçekli çalışmalarla elde edilen yeni nesil aerjel yalıtım malzemeleri ile uyumludur. Ayrıca numuneler, düşük ısı iletkenlik değeri ile yalıtım uygulamaları için oldukça umut vericidir.

#### **4.7. Aerojellerin basınç deneyi sonuçları**

Gözenekli malzemelerin basınç gerilmesi karşısındaki birim şekil değıştirmesi üç bölge mekanik modelle temsil edilmektedir. Şekil 4.18.'de DT-LWA numunesinin, Şekil 4.19. 'da TK-LWA numunesinin ve Şekil 4.20. 'de UK-LWA numunesinin gerilme-şekil değıştirme grafiği verilmiştir.

*Doğrusal elastik bölge;* grafikte eğrinin başlangıçtan itibaren lineer bir şekilde yükseldiği kısmıdır. Bu bölge malzemenin yük karşısındaki ilk direncini göstermektedir. Hooke yasasına göre açıklanan bölgenin sınırı, eğimin değışmeye başladığı yer olarak bilinmektedir. Bu bölgede iskelet yapı eğilir, bükülür ama çökmez. Bölge eğimi ne kadar dikse malzeme o kadar sert (rijit) karakterlidir (X. Wang vd., 2025). TK-LWA numunesi bu bölgede sert yapısıyla en iyi performansı gösterirken, UK-LWA numunesi dengeli direnç göstermiştir. DT-LWA numunesinde ise en zayıf performans gözlenmiş, malzeme oldukça yumuşak ve esnemeye meyilli yapı sergilemiştir.

*Plato bölgesi*; malzemenin yük altında deforme olma oranını ve enerji sönümlenme kapasitesini temsil etmektedir. Bu bölgede gerilme (yük) fazla artmasa da malzeme sürekli olarak şekil değiştirmekte ve deformasyon devam etmektedir (enerji sönümlenme yeteneği). Plato bölgesinde iskelet yapının çökmeye başlamasıyla birlikte grafikteki eğri yatay hale gelmiştir. DT-LWA numunesi bu bölgede %15-80 arasında mükemmel plato çizmiştir (Şekil 4.18.). Eğrinin yapısı, diatomitten kaynaklanan gözenek yapıdaki hava boşluklarının ezildiğini ve malzemenin uzun süre enerji sönümlediğini göstermektedir. TK-LWA numunesinde ise taban külü içeriği esnemeksizin hemen yoğunlaşmaya geçtiğinden bu bölge oldukça dardır. UK-LWA ise orta derecede enerji sönümlenmiştir.

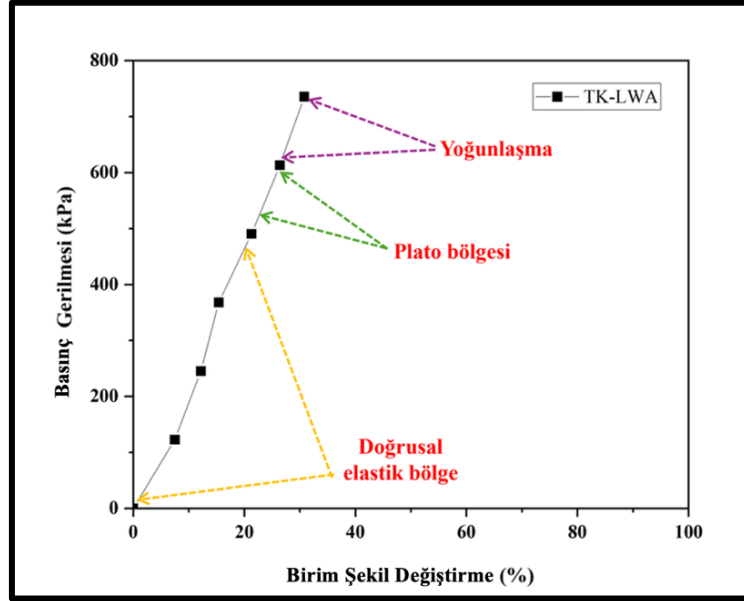


Şekil 4.18. DT-LWA numunesinin gerilme-şekil değiştirme grafiği.

*Yoğunlaşma bölgesi*; malzemenin boşluk hacminin yok olduğu ve tamamen katılaştığı deformasyon miktarını yansıtmaktadır. Bu bölgede plato sonundaki yatay seyir sonlanmakta ve ani yukarı hareket başlamaktadır. Bu noktada hücre duvarları birbirine temas etmekte ve malzeme katı-gözeneksiz hale dönüşmektedir. TK-LWA numunesi hemen sıkışıp katılaşarak %28 civarında yoğunlaşırken, UK-LWA ve DT-LWA numuneleri daha geç yoğunlaşmıştır. Özellikle DT-LWA numunesinin %85 sonrası yoğunlaşmaya başlaması, numunenin yüksek sıkıştırılabilirlik özelliğini ortaya koymaktadır.

TK-LWA numunesinde lineer bölge %0-20, plato bölgesi %22-28 ve yoğunlaşma bölgesi %30'dan sonrasını temsil etmektedir. Mekanik yük taşıma kapasitesi en yüksek değerdeki numunedir (Şekil 4.19.). UK-LWA numunesinde lineer bölgede %0-15, plato bölgesi %22-50 ve yoğunlaşma bölgesinde %55-68 ve sonrasını temsil etmektedir. Numunenin enerji (darbe) sönümlenme oranı en yüksektir. DT-LWA numunesinde ise lineer bölge %0-10, plato bölge %15-

75 ve yoğunlaşma bölgesi %80-95 ve sonrasında temsil etmektedir. Numune yüksek gözenekli yapısı nedeniyle uzun plato bölgesinin ardından eğri aniden dikleşerek yoğunlaşma fazına geçmiştir.

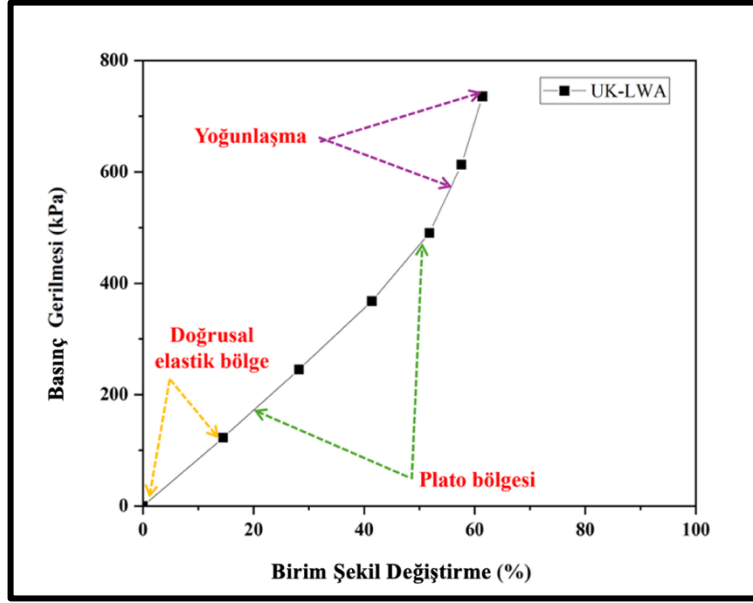


Şekil 4.19. TK-LWA numunesinin gerilme-şekil değiştirme grafiği.

%10 birim deformasyonu gösteren doğrusal elastik bölgedeki numune davranışları değerlendirilmiştir. TK-LWA numunesinde iskelet yapı daha sert olduğundan %10 deformasyon için yaklaşık 165 kPa yük gerekmiştir. UK-LWA için küresel tanelerin sağladığı bir miktar esneklikle aynı deformasyona daha az yük (85 kPa) ulaşmıştır. DT-LWA numunesi ise yüksek gözenekli yapıda olduğu için çok küçük bir yükte (41 kPa) %10 oranda deforme olmuştur.

%30 deformasyona ulaşmak için TK-LWA numunesinde 735 kPa yük ölçülmüştür. Bu noktada malzeme yoğunlaşmayı başlatmış, gözenek yapı bozulmuş ve numune tamamen sıkışmıştır. TK-LWA burada maksimum taşıma kapasitesine ulaşmıştır. UK-LWA ve DT-LWA için %30 deformasyon enerji sönümlenme aşamasını temsil eden plato bölgesini temsil etmektedir. UK-LWA numunesinde 245 kPa civarında plato bölgesi başlamış ve TK-LWA numunesine göre 3 kat daha düşük dirençle sünekliği korumuştur (Şekil 4.20.). DT-LWA numunesi ise TK-LWA'dan 6 kat daha yumuşak davranmaktadır. En rijit numune olan TK-LWA, DT-LWA'dan 4 kat daha fazla yük taşıyabilmektedir. UK-LWA ve DT-LWA için gözenek yapı kapanmaya devam etmekte ve gelen yük hala malzeme tarafından yutulmaktadır (Balci vd., 2025). UK-LWA numunesinde; uçucu külün küresel mikro yapısı, uygulanan yük altında kayarak kontrollü ezilmeyi mümkün kılmakta ve numune darbe emici özellik sergilemektedir. Ayrıca uçucu kül tanecikleri doğası gereği daha paketlenbilir yapıda olduğundan yük altında daha fazla deformasyona olanak tanımaktadır. Taban külü, daha yoğun ve az gözenekli yapıda

olduğundan daha az şekil değiştirmiş ve erkenden yoğunlaşmıştır. DT-LWA ise oldukça esnek ve gözenekli yapıdadır. Numunede, diyatomitin gözenekli yapısı plato bölgesini uzatır, malzeme ezilirken aldığı yükü uzun süre hapseder, mekanik dayanım düşük ama gözeneklilik yüksektir. UK-LWA numunesi, DT-LWA'ya kıyasla daha kısa plato bölgesine sahip olup erken yoğunlaşmıştır. Bu da DT-LWA'dan daha az gözenekli ve daha yüksek birim hacim ağırlıklı olduğunu göstermektedir. Özetlemek gerekirse; TK-LWA duvar gibi davranırken, DT-LWA sünger benzeri yapı sergilemekte, UK-LWA ise hibrit karakter ortaya koymaktadır.



Şekil 4.20. UK-LWA numunesinin gerilme-şekil değiştirme grafiği.

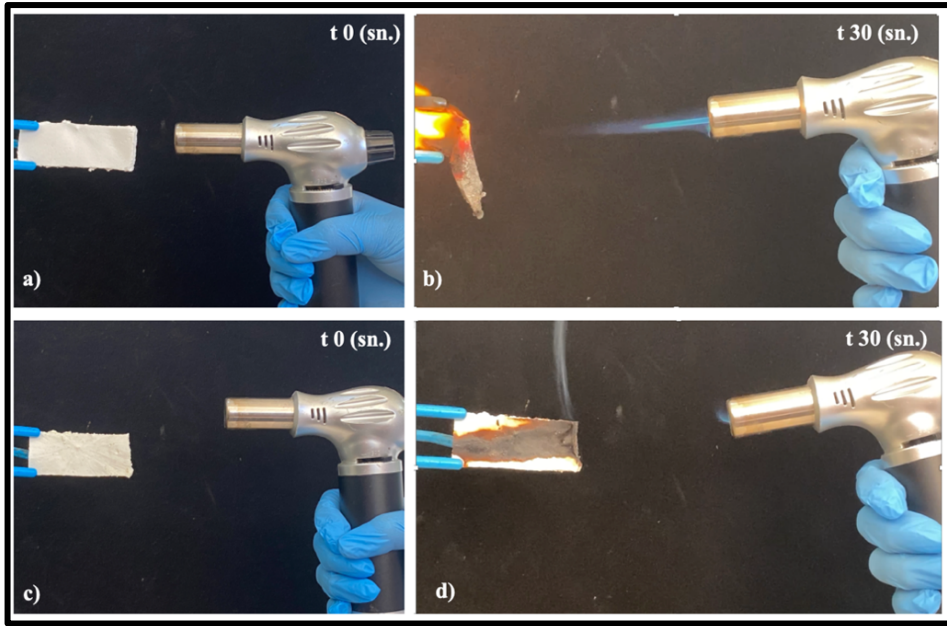
(Paulauskiene vd., 2024) tarafından yapılan bir çalışmada selüloz bazlı aerogelin %5-10 deformasyon karşısında doğrusal elastik davrandığı bildirilmiştir. Bu değer sonrasında numune kalıcı olarak ezilirken, aerojele kenevir lifi katkılmasıyla birlikte doğrusal elastik bölge %20'ye kadar artırılmıştır. Bu değer, TK-LWA numunesi ile benzerlik göstermektedir. Cam elyafı güçlendirilmiş ve yüzey modifikasyonu yoluyla hidrofobik hale getirilmiş silika aerogelde %30 birim deformasyondaki basınç dayanımlarının 95-256 kPa aralığında değiştiği rapor edilmiştir. Bu değerler DT-LWA ve UK-LWA numunelerle uyumlu iken TK-LWA numunesi, cam elyaf/aerogel kompozitlerde kaydedilen en yüksek değer yaklaşık üç katı kadardır (Shafi & Zhao, 2020). Bir başka çalışmada kuvars lif takviyeli fenolik reçine aerogel kompozitlerinin farklı reçine miktarlarındaki basınç dayanımları karşılaştırılmıştır. %10 reçine içeren numunede, %10 birim deformasyon için 237 kPa, %15 reçine içeren numunede ise 734 kPa basınç değeri ölçülmüştür. Sonuçlar UK-LWA ve TK-LWA numuneleri ile uyumludur (D. Zhao vd., 2026). (Q. Wang vd., 2023) tarafından yapılan bir çalışmada, aktif karbonla güçlendirilmiş poliüretan kompozit aerogeller sentezlenmiştir. Termoplastik poliüretan için bu değer 5,4 kPa olarak

bilinmekte olup aktif karbon/PUR kompozit arojellerde %50 birim deformasyon için ölçülen basınç dayanımı 86 kPa olarak bildirilmiştir. En zayıf numune olan DT-LWA bile %30 deformasyonda 123 kPa değeri vermiştir. Literatür verilerine göre poliüretan köpük 5 kPa'dan daha düşük bir gerilimle %10'luk gerinime ulaşarak belirgin bir elastik davranış sergilemektedir. Saf silika arojellerin yaklaşık %12 deformasyon için 30 kPa yükte yapısal bütünlüğün kaybolduğu bilinmektedir. PUR ile güçlendirilmiş silika arojel köpükte, %10 gerinim için 15-20 kPa basınç dayanımı ölçülürken, numuneye %40'tan daha yüksek bir gerilim uygulandığında kalıcı ve geri dönüşümsüz olarak deforme olmuştur. Elde edilen kompozitin gözeneklilik değerlerinin %85,7-92,3 arasında değiştiği raporlanmıştır (Merillas, Lamy-Mendes, vd., 2022).

DT-LWA numunesinin %90'ın üzerindeki deformasyon oranlarına parçalanmadan ulaşabilmesi, literatürdeki arojel monolitlere göre yapısal kararlılığının daha yüksek olduğunu ve numunenin daha esnek olduğunu göstermektedir. UK-LWA numunesine benzer şekilde yapılan bir çalışmada UK katkılı polimerik arojel için 254 kPa basınç dayanımı değeri rapor edilmiş olup bu değer UK-LWA için ölçülen değerle (245 kPa) uyum göstermektedir (Do vd., 2021). Ayrıca geleneksel arojellerle karşılaştırıldığında sentezlenen arojeller, düşük yoğunluk ve yüksek gözeneklilik değerlerine rağmen nispeten yüksek dayanım göstermiştir (Y. Xu vd., 2023).

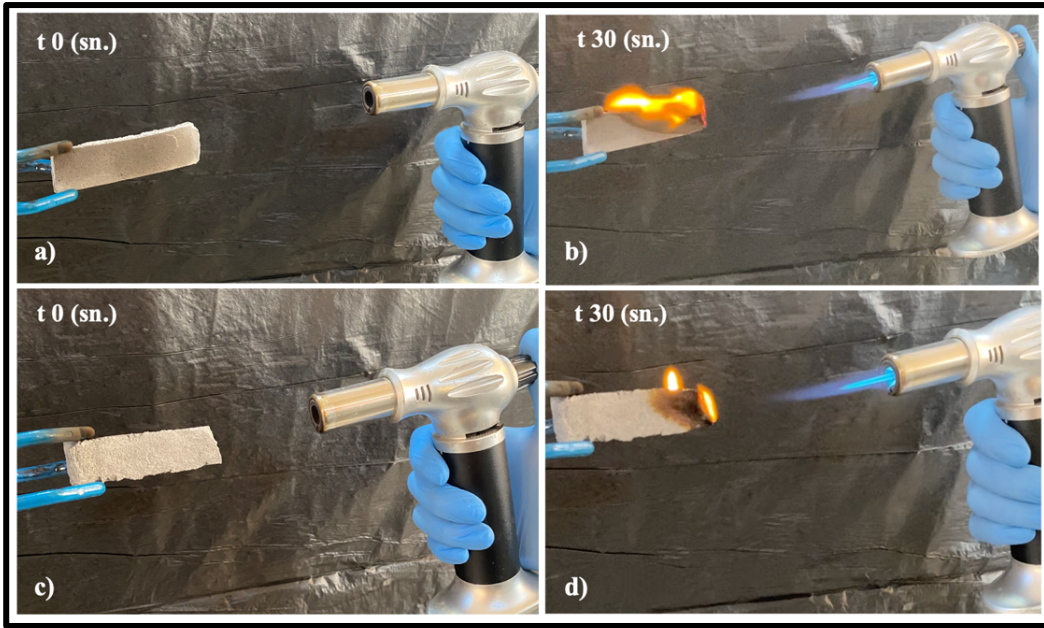
#### **4.8. Arojellerin yanma davranışı testi sonuçları**

Tez çalışması kapsamında LWA numunelerinin yangın karşısındaki davranışını gözlemek ve yangın geciktirici solüsyon uygulamasının LWA-Kaplanmış numunelere nasıl etki ettiğini anlamak amacıyla yanma testi gerçekleştirilmiştir. DT-LWA numunesinin yangın dayanım testi öncesi ve sonrası görüntüleri Şekil 4.21.'de verilmiştir. Şekilde; a-b) kaplanmamış numunenin t0 ve t30 anındaki görünümü, c-d) kaplanmış numunenin t0 ve t30 anındaki görünümünü temsil etmektedir (Balci vd., 2025).



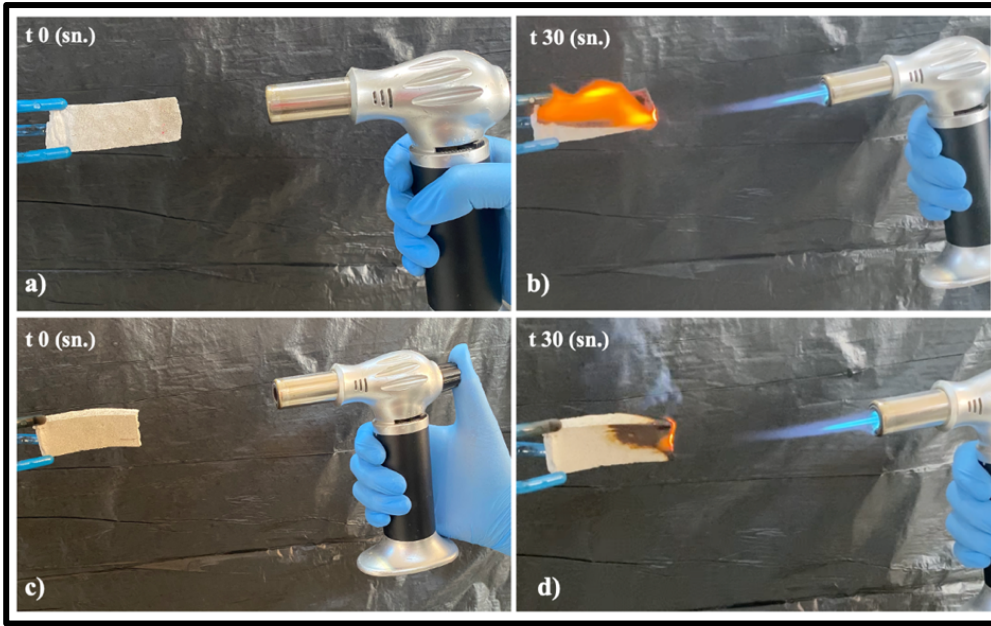
Şekil 4.21. DT- LWA ve DT-LWA kaplanmış numunenin yanma testi.

Yangın geciktirici ile kaplanmamış numune, kesintisiz olarak yakma işleminin başlaması ile birlikte hızla tutuşmuş, alevler numune boyunca ilerlemiş ve yakma işlemi boyunca yoğun duman yayılımı gözlenmiştir. 30. saniye sonunda numune neredeyse tamamen kül haline gelmiştir. Yüzeyi kaplanmış numunede ise tutuşma hızının daha yavaş olduğu gözlenmiştir. Alev, numune boyunca daha yavaş ilerlemiş, çıkan duman miktarı azalmıştır. 30. saniyede kaplamasız numuneye kıyasla kalan numunede kısmi bütünlük korunmuştur. Sentezlenen aerogelin yangına karşı dayanımının yüzey modifikasyonu ile iyileştirilmesinin mümkün olduğu görülmüştür. TK-LWA numunesinin yangın dayanım testi sonrası görüntüleri Şekil 4.22.'de verilmiştir. Şekilde; a-b) kaplanmamış numunenin t0 ve t30 anındaki görünümü, c-d) kaplanmış numunenin t0 ve t30 anındaki görünümünü temsil etmektedir.



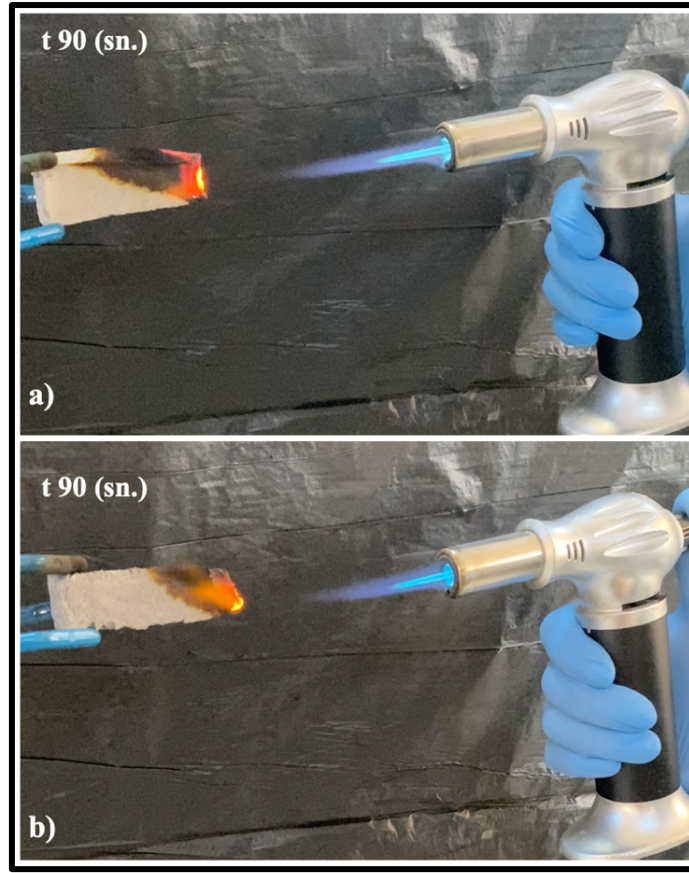
Şekil 4.22. TK- LWA ve TK-LWA-Kaplanmış numunenin yanma testi.

Başlangıçta yangın geciktirici kaplanmamış numune 30 saniyelik doğrudan aleve maruz bırakıldığında numune yüzeyinde yanma ve parlama gözlenmektedir. 30 saniye sonunda alevlerin numune yüzeyinde ilerlemesiyle birlikte malzeme bütünlüğü bozulmuştur. Yangın geciktirici kaplanmış numunede, kaplama etkisiyle numune yüzeyinde ince bir tabaka meydana gelir. Yanmayı geciktirici bu katman sayesinde alevin malzeme yüzeyinde ilerlemesi sınırlanmaktadır. Böylelikle numunede yapısal bütünlük büyük ölçüde korunmuştur. Yangın geciktirici katmanın ısı transferini sınırlaması ve tutuşmayı yavaşlatma performansı ile numunenin yanma davranışı önemli ölçüde iyileşmiştir. UK-LWA numunesinin yangın dayanım testi sonrası görüntüleri Şekil 4.23.'te verilmiştir. Şekilde; a-b) kaplanmamış numunenin t0 ve t30 anındaki görünümü, c-d) kaplanmış numunenin t0 ve t30 anındaki görünümünü temsil etmektedir.



Şekil 4.23. UK- LWA ve UK-LWA-Kaplanmış numunenin yanma testi.

UK-LWA numunesinde gerçekleştirilen yanma testi sonuçları TK-LWA numunesine benzer şekilde sonuçlanmıştır. UK-LWA kaplanmamış numunenin 30 saniye süreyle doğrudan alev maruz bırakılmasıyla numunenin hızla tutuştuğu gözlenmektedir. Yakma sonucu numune yüzeyinde karar ve alev parlaması gelişirken belirgin yüzey bozunması oluşmuştur. Kaplamasız numunenin yanma davranışını sürdürmeye yatkın bir yapı sergilediği söylenebilmektedir. UK-LWA-kaplanmış numunede ise başlangıçtaki homojen yapının büyük ölçüde korunduğu, yanma olayının küçük bir alanla sınırlı kaldığı görülmüştür. Kaplamanın etkisiyle alevlerin numune yüzeyinde ilerlemesi sınırlı olduğundan yapısal bütünlüğün korunması mümkün olmuştur. Ayrıca TK-LWA numunesine göre yangın geciktiriciyle kaplanmış UK-LWA numunesi daha zor tutuşmuş ve alevlerin ilerlemesi daha uzun sürede gerçekleşmiştir. UK-LWA ve TK-LWA numunelerinin uzun süreli (90 saniye) doğrudan alev maruz kalmalarının ardından ortaya çıkan yanma davranışı Şekil 4.24.'te verilmiştir. Şekilde; a) UK- LWA-Kaplanmış numunenin ve b) TK-LWA-Kaplanmış numunenin t90 saniyedeki görünümü temsil edilmektedir.



Şekil 4.24. UK- LWA-Kaplanmış ve TK-LWA-Kaplanmış numunelerin uzun süreli yanma testi.

Her iki numunenin de 90 saniye sonunda yapısal bütünlüğü büyük ölçüde muhafaza etmiş olduğu açıkça görülmektedir. Kaplanmış numunelerde alevin numune yüzeyinde ilerlemesi kaplanmamış numunelere oranla çok daha yavaş ve sınırlı olmuştur. Kaplanmamış numuneler tutuşmaya karşı daha az dirençli ve yanmayı sürdürürken kaplanmış numunelerde tutuşma ve yanma süresi daha uzun olmuştur. Yangın geciktirici kaplama, çeşitli yangın senaryolarında her üç numune için de tutuşmayı ve alev yayılımını engellemeyi sağlayan bariyer etkisi oluşturmuştur. TK-LWA-kaplanmış numunede 90 saniyelik alev maruziyeti sonucunda UK-LWA-kaplanmış numuneye göre yanma reaksiyonu ve alevlerin numune yüzeyinde yayılımı daha sınırlı kalmıştır. Bu durum, yangın geciktirici kaplamanın numune gözeneklerine daha iyi yerleşmesiyle açıklanmaktadır (H. Yang vd., 2025).

Geleneksel yalıtım malzemeleri genellikle inorganik dolgu malzemeleri ile organik bağlayıcılar kullanılarak elde edilmektedir. Bu malzemelerin yangın dayanımının sınırlı olduğu bilinmektedir. Yapı malzemelerinin yangına dayanıklılığı, yangının yayılmasını sınırlamak ve tahliye süresini uzatmak ve bina sakinlerinin güvenliğini sağlamak için oldukça önemlidir. Bu bağlamda, kaplamaların ve yalıtım panellerinin yangına dayanıklı olması alev yayılımını ve toksik duman emisyonunu azaltmada etkilidir (Feng vd., 2024).

Malzemenin alev geciktirici özellik kazanma prensibi temelde iki farklı şekilde çalışmaktadır. Bunlardan ilki fiziksel etkidir. Bu mekanizma; soğutma, malzeme yüzeyinde koruyucu tabaka oluşturma ve yanıcı gaz yoğunluğunun seyreltilmesi şeklinde çalışmaktadır (Shan vd., 2015). Kimyasal etki mekanizmasında ise katı fazda daha çok kömür oluşturmak suretiyle malzemenin daha zor yanması sağlanır. Buna ek olarak gaz fazında etki ile alevlerin ilerlemesi durdurulabilmektedir. Polimerik malzemelerde yanma olayı; ısıtma, piroliz, tutuşma ve ısıl bozulmanın yayılması şeklinde devam eden süreçlerden meydana gelmektedir (Kashiwagi vd., 2008). Alev geciktirici katkı veya ürünler yanma sürecindeki bu adımlara müdahale ederek yanma mekanizmasını yavaşlatmayı ya da durdurmayı amaçlamaktadır. Örneğin; literatürde yer alan bir çalışmada MTMS ile modifiye edilmiş selülozik aerogelin yangın davranışı incelenmiştir. Çapraz bağ yapısını artırmak için ağırlıkça %0,4 oranında PVA içeren numunenin yanma testinde 39 saniye sonunda kendiliğinden sönmeye gözlenmiştir. Teste tabi tutulan numune alanının yalnızca yarısı yanmış ve üç boyutlu ağ yapısının sağlam kaldığı belirtilmiştir (Mo vd., 2025). Buradaki temel prensip, PVA'nın yanma sırasında karbonlaşması ve MTMS'nin yüksek sıcaklıklarda bozunarak SiO<sub>2</sub> üretimini teşvik etmesi olarak açıklanmaktadır. Bu durumda numune yüzeyinde gelişen karbon-seramik hibrit kaplama yanmaya karşı koruyucu tabaka meydana getirmiştir.

Yanma sırasında yüksek oranda çapraz bağ yapıdaki PVA ağı aerogel numunenin yüzeyindeki çatlak ve gözenekleri doldurarak yanıcı gazların numunede yayılımını sınırlandırmaktadır. Bu durum katı faz bariyer etkisiyle açıklanmaktadır (Luo vd., 2025). Yüksek sıcaklık ve dehidratasyon etkisiyle PVA yapısında meydana gelen karbon, MTMS'nin parçalanmasıyla ortaya çıkan SiO<sub>2</sub> parçacıkları kimyasal bağ oluşturarak Si-O-C yapısının gelişimini teşvik etmektedir. Bu yapı yüksek erime noktasına sahip olduğundan termal kararlılığın korunumu mümkün olmaktadır. Böylelikle ısıya dayanıklı, oksijen geçişini sınırlayabilen bariyer ortaya çıkmaktadır. Söz konusu karbon- seramik bariyer oksijen salınımını azaltmakta, ısı transferini sınırlamakta, radyasyonla ısı yayılımını azaltmakta ve malzemenin iç kısmındaki sıcaklık artışını yavaşlatarak yanma reaksiyonunu zayıflatmaktadır. SiO<sub>2</sub> üretimiyle gelişen gaz fazındaki alev inhibisyonu reaksiyonu kesintiye uğratmaktadır. Böylece numune kendiliğinden sönebilme, yüksek sıcaklıklarda yapısal bütünlük korunabilmekte ve aerogelin yangın davranışı yüksek oranda iyileşmektedir (Y.-W. Liu vd., 2024). DT, UK ve TK-LWA numuneleri için de durum benzer şekilde gelişmektedir. PVA ve CMC yanma sırasında karbonlu yapı oluşumunu desteklemektedir. Yüksek sıcaklık etkisiyle PVA yoğun ve ağısı iskelet yapı geliştirirken CMC ise yüksek karbon sayesinde gözenekli, yüksek hacimli ve şişebilen yapıda karbon tabakası meydana getirmektedir. Bu tabaka iki farklı polimerin karbonlaşmasıyla elde

edilen güçlü bir bariyer görevi yapmaktadır (Boruah & Sarma, 2025). DT, TK ve UK bileşiminde bulunan çeşitli metal oksitler yanma sırasında karbon tabakasına entegre olmaktadır. Metal oksitlerin kısmi ergimesi sonucu gelişen seramik film kaplama sayesinde termal bariyer etkisi daha güçlü gelişebilmektedir. Ayrıca PVA ve CMC gibi polimerlerin yanması sonucu ortaya çıkan CO<sub>2</sub> ve su (H<sub>2</sub>O) gibi inert gazlar oksijen yoğunluğunu azaltarak yanıcı etkiyi sınırlandırmaktadır. Bu üçlü kombinasyonla aerojelin, yüksek sıcaklıklarda yapısal çökmesi önlenmekte ve yapısal bütünlüğün korunması sağlanmaktadır (An vd., 2025).

Aerojel numunelerinin alev karşısındaki davranışının incelendiği bu deneyde; her üç numune için yangın geciktirici kaplama uygulaması alevlerin yayılımını büyük ölçüde sınırlamış, yüzeyde gelişecek tahribatı azaltmış ve malzemenin yapısal bütünlüğünün korunmasına katkı sağlamıştır. Bu bağlamda uygulanan yangın geciktirici kaplamanın kısa süreli alev temasında etkin rol oynadığı söylenebilmektedir. Polimerik aerojellerin yanıcılığını önlemek için alev geciktirici ajanların kullanılmasının başarılı sonuçlar vereceği çeşitli çalışmalarda bildirilmiştir. Sonuçların bu çalışmada üretilen aerojel numuneleri ile uyumlu olduğu söylenebilmektedir (Ge vd., 2025). Yanma testi sonrasında numunelerin TS EN 13501-1 standardına göre yangın sınıfları değerlendirilmiştir. DT-LWA numunesi kaplamasız halde E/F sınıfı yanıcı özellik sergilerken, kaplama yapılan numunede yangın sınıfı A2 veya B olarak tanımlanmaktadır. Kaplamasız TK-LWA ve UK-LWA numunelerinde ısı kaynağı çekildiğinde malzeme kendi kendine sönebilme ve bu durumda yangın sınıfları C sınıfına daha yakın olmaktadır. TK-LWA ve UK-LWA numuneleri kaplandığında ise B sınıfı zor alevlenici veya A2 sınıfı sınırlı yanıcılık özelliği sergilediği gözlemlenmiştir.

#### **4.9. Termal kamera analizi sonuçları**

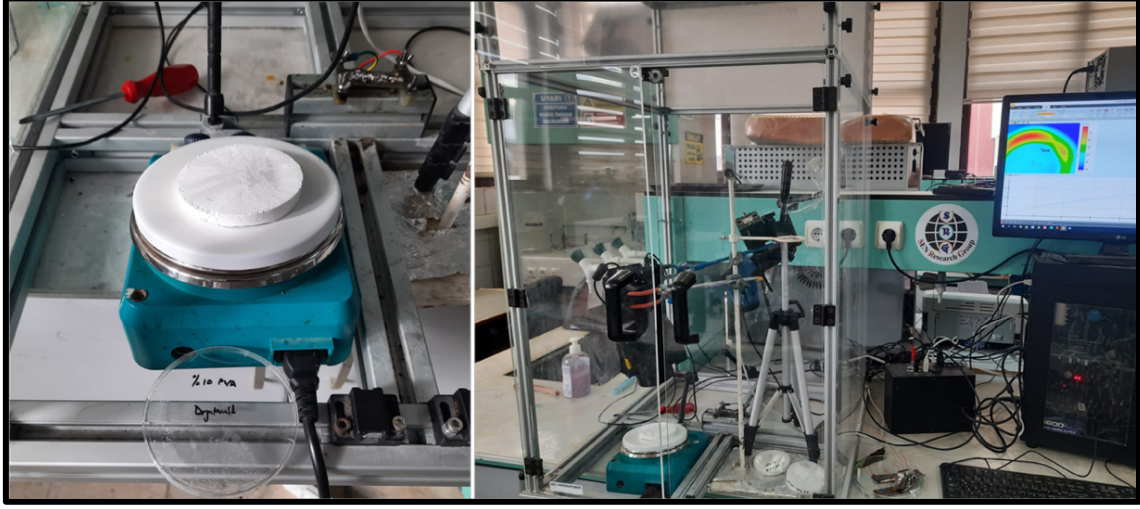
Tez çalışması kapsamında elde edilen LWA, LWA-Kompozit ve LWA-Kutu numunelerin ısınma ve soğuma davranışı karşısında, zamana bağlı sıcaklık değişimi ve termal kamera görüntüleri elde edilmiştir. Termal kamera çekimleri; numunelerin dış ortam koşullarından korunması için pleksi kabin içinde gerçekleştirilmiştir.

##### **4.9.1. Aerojellerin termal kamera analizi sonuçları**

Farklı konsantrasyonlar içeren ve diyatomit kaynağı kullanılarak elde edilmiş aerojel numunelerinin ısıyı iletme ve ısı karşısında kararlılık durumlarını gözlemlemek amacıyla termal görüntüleme yapılmış ve zamana bağlı sıcaklık değişim grafikleri oluşturulmuştur.

Ölçümler için aerojel numuneleri ısıtıcı levha üzerine yerleştirilmiş ve levha ısıtılmaya başlanmıştır. Numuneler yaklaşık 100 °C'ye kadar ısıtılmış sıcak levha üzerine yerleştirilmiş ve zamana bağlı sıcaklık değişimleri üç farklı nokta üzerinden ölçülmüştür. Isıtma işlemi yaklaşık

14 dakika boyunca kesintisiz olarak devam etmiş ve malzemenin ısıl doygunluğa ulaşma süreci takip edilmiştir (Şekil 4.25).



Şekil 4.25. Termal kamera ölçüm düzeneği.

Numune yüzey sıcaklıkları %5 PVA için M3 noktasında, %7,5 PVA için M1 noktasında ve %10 PVA için M3 noktasında ölçülmüştür. Levha yüzey sıcaklıkları ise %5 PVA ve %10 PVA için M1 ve M2 noktalarından ölçülürken, %7,5 PVA için M2 ve M3 noktalarından ölçüm alınmıştır (Tablo 4.5.).

Tablo 4.5. Optimizasyon çalışmalarından elde edilen aerojellerin termal görüntüleme analiz sonuçları.

Numune Adı	%5 PVA	%7,5 PVA	%10 PVA
Numune Yüzey Sıcaklığı Ölçüm Noktası	M3	M1	M3
Levha Yüzey Sıcaklığı Ölçüm Noktası	M1, M2	M2, M3	M1, M2
Levha Yüzeyinde Maksimum Sıcaklık	~ 88 °C	~ 98 °C	~ 93 °C
Numune Yüzeyinde Nihai Sıcaklık	63,6 °C	59,6 °C	59,4 °C

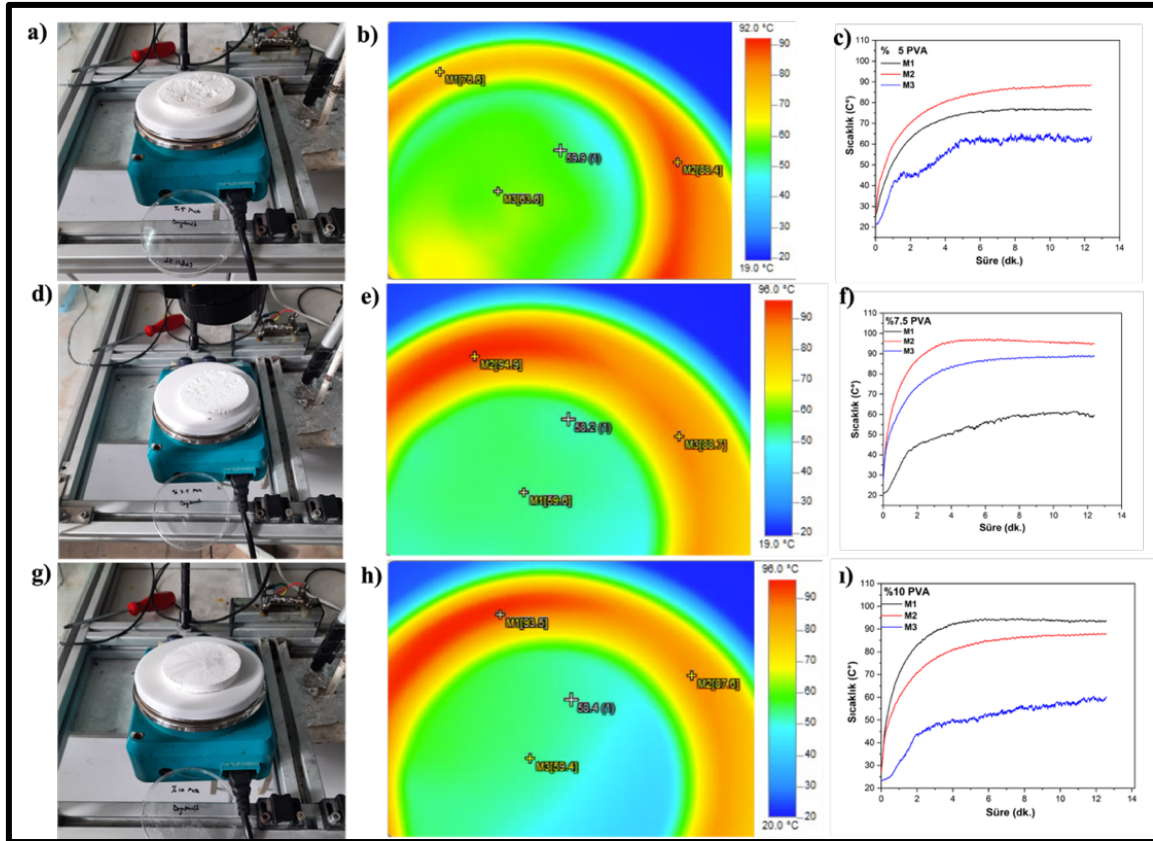
%5 PVA içeren numunede termal kamera görüntüleri ve zamana bağlı sıcaklık değişim grafikleri Şekil 4.26. a-c'de verilmiştir. Yaklaşık 19 °C ile başlayan numune yüzey sıcaklığı (M3) 14. dakikada 63,6 °C ile son bulmuştur. Aynı numune için ısıtma sonunda levha yüzeyindeki maksimum sıcaklık (M2) 88,4 °C olarak ölçülmüş olup sıcaklık farkı yaklaşık 24,4 °C olarak hesaplanmıştır. Numunenin zamana bağlı sıcaklık grafiğinde (Şekil 4.26. c) yaklaşık 6. dakikadan itibaren sıcaklıkların dengeye ulaştığı görülmektedir. Ayrıca M3 noktasında numune yüzeyindeki sıcaklık değişimleri diğer numunelere kıyasla daha dalgalı bir seyir

göstermiştir. Bu durum, düşük konsantrasyonda PVA kullanımının ısı kararlılığı azalttığını düşündürmektedir.

%7,5 PVA içeren numunede ısı kaynağından okunan ortalama sıcaklık yaklaşık 98 °C iken numune yüzeyinde sıcaklık 59,6 °C olarak ölçülmüş ve sıcaklık farkı 38,4 °C olarak hesaplanmıştır (Şekil 4.26. d-f).

%10 PVA içeren numunede, levha yüzey sıcaklığı ortalaması yaklaşık 93 °C iken numune sıcaklığı 59,4 °C olarak ölçülmüştür. Numunede levha yüzeyi ile numune yüzeyi arasındaki sıcaklık farkı yaklaşık 33,6 °C olarak hesaplanmıştır. Bu durum, numunenin yüksek ısı direncini ortaya koymaktadır. Ayrıca numune, 6. dakikadan itibaren ısı doygunluğa ulaşarak sabit sıcaklık rejimi sergileyebileceğini ortaya koymuştur.

%5 PVA oranı %10'a çıkarıldığında, numunenin yüzey sıcaklığı 4,2 °C kadar daha düşük ölçülmüştür. Aynı zamanda %10 PVA numunesi diğer numunelerden daha düşük sıcaklıkta (59,4 °C) stabil hale gelmiştir (Şekil 4.26. g-1).

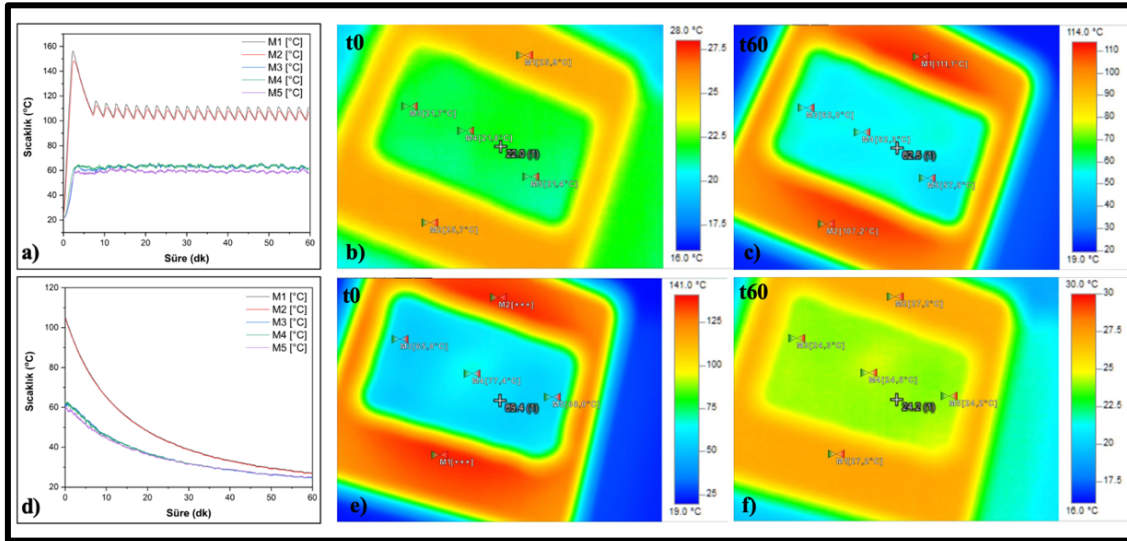


Şekil 4.26. Aerojel numunelerin termal kamera ölçüm sonuçları.

%10 PVA içeren numunede M1 noktasında alınan sıcaklık eğrisi diğer numunelere kıyasla daha stabil bir seyir göstermiştir. Aynı numune için ısı kararlılık daha belirgindir. Grafik, numunenin ısı doygunluğa ulaştıktan sonra enerjiyi daha dengeli şekilde yönettiğini ortaya

koymaktadır. Termal kamera görüntüleri, %10 PVA numunesindeki sıcaklık dağılımının diğer numunelere kıyasla daha düzenli ve homojen olduğunu göstermektedir. Yaklaşık 5. dakikadan itibaren zamana bağlı sıcaklık eğrisi sabit bir seyir göstermiştir. %5 PVA içeren numunede levha yüzeyi daha düşük sıcaklıkta olmasına rağmen numunenin daha fazla ısınmış olması, daha zayıf ısı bariyer sergilediğini ortaya koymaktadır. %10 PVA içeren aerojel numune, %5 PVA içeren göre %6,6 oranda daha iyi yalıtım performansı sağlamaktadır. Polimer oranının artması ısı iletkenliğini azaltacağı gibi ek olarak mekanik dayanımı da destekleyecek dirençli bir matris oluşturabilecektir.

Optimizasyon çalışmalarının ardından nihai reçeteye uygun olarak hazırlanan aerojel numunelerin ısı karşısında nasıl davranacağını anlamak için termal kamera ölçümü yapılmıştır. Bu kapsamda yaklaşık 100 °C'ye ısıtılan bir levha üzerine LWA numuneler konularak 1 saat ısıtma ve ardından 1 saat süreyle doğal soğuma yapılmış, zamana bağlı sıcaklık değişimleri karakterize edilmiştir. TK-LWA numunesinin ısınma grafiği (a), ısınma sırasında t0 ve t60 sürelerindeki termal kamera görüntüleri (b-c), soğuma grafiği (d) ve soğuma sırasında t0 ve t60 sürelerindeki termal kamera görüntüleri (e-f) Şekil 4.27.'de verilmiştir.



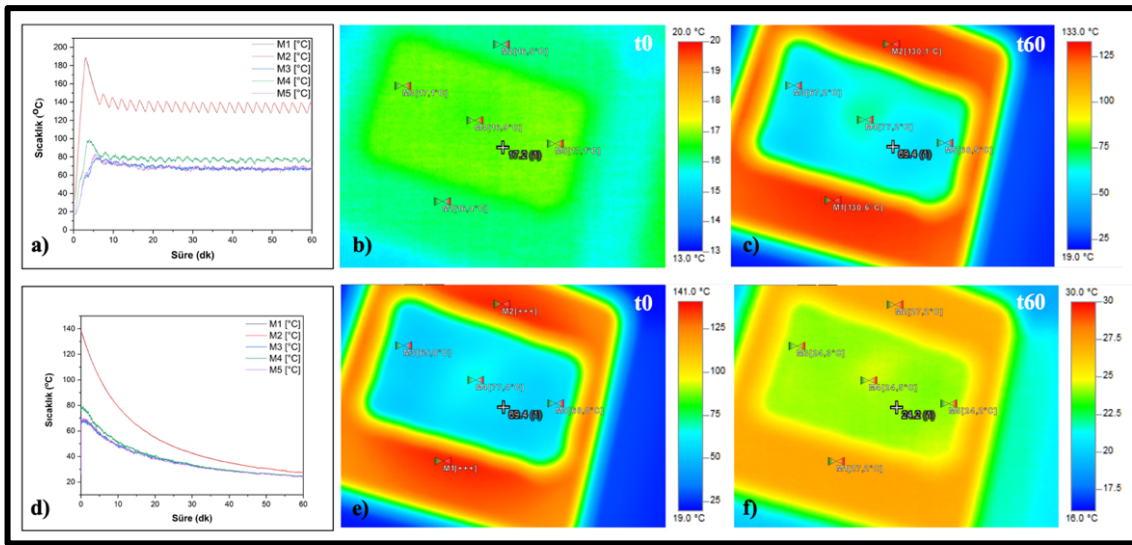
Şekil 4.27. TK-LWA numunesinin ısınma ve soğuma grafikleri ile termal kamera görüntüleri.

TK-LWA numunenin ısıtma başlangıcında levha yüzey sıcaklığı (M1-M2) yaklaşık 26 °C iken 60 dakika sonunda sıcaklık yaklaşık 112 °C'ye yükselmiştir. Malzemenin yüzey sıcaklıkları (M3-M4-M5) ise 22 °C'den başlayıp 60 dakika sonunda 57-62 °C aralığında ölçülmüş, bazı noktalarda 77 °C'ye kadar yükselmiştir. Bu değerler numunenin alt kısımdan gelen yüksek ısıyı yüzeye sınırlı şekilde iletmediğini ve ısı iletimini önemli ölçüde azalttığını göstermektedir. Soğuma evresinde levha sıcaklığı hızlıca 27 °C'ye gerilerken, numune yüzeyinde sıcaklık 24 °C ölçülmüştür. Yüksek sıcaklıklara rağmen numune yüzeyinde sıcaklık

artışının sınırlı olması etkili bir ısı yalıtımı performansını desteklemektedir. Ayrıca TK-LWA numunesinin ısı transferini yavaşlattığı ısınma ve soğuma döngülerinde belirgin olarak görülmektedir.

Isınma grafiği incelendiğinde (a); levha yüzey sıcaklık eğrisi dalgalı seyir gösterirken bu durum numune sıcaklık eğrisine yansımamış, eğri yatay bir seyir göstermiştir. Bu seyir, numunenin ani şok dalgalanmasını mükemmel şekilde sönümlediğini göstermektedir. TK-LWA numunesi, yaklaşık 46 °C kadar düşüşle ısıl direnç oluşturmayı başarmıştır. Numune yüzeyindeki ölçüm noktalarında sıcaklık değerlerinin birbirine yakınlığı, aerogelin homojen yapısını kanıtlamaktadır. Doğal soğumanın başlamasıyla birlikte levha yüzeyi hızla soğurken, numune yüzeyinin daha yavaş ve kademeli olarak soğuması, taban külünün inorganik yapısı ve aerogel numunenin gözeneklerinde ısınan havayı bir miktar tutabilmesi ile ilişkilendirilmektedir.

UK-LWA numunesinin ısınma grafiği (a), ısınma sırasında t0 ve t60 sürelerindeki termal kamera görüntüleri (b-c), soğuma grafiği (d) ve soğuma sırasında t0 ve t60 sürelerindeki termal kamera görüntüleri (e-f) Şekil 4.28.'de verilmiştir.

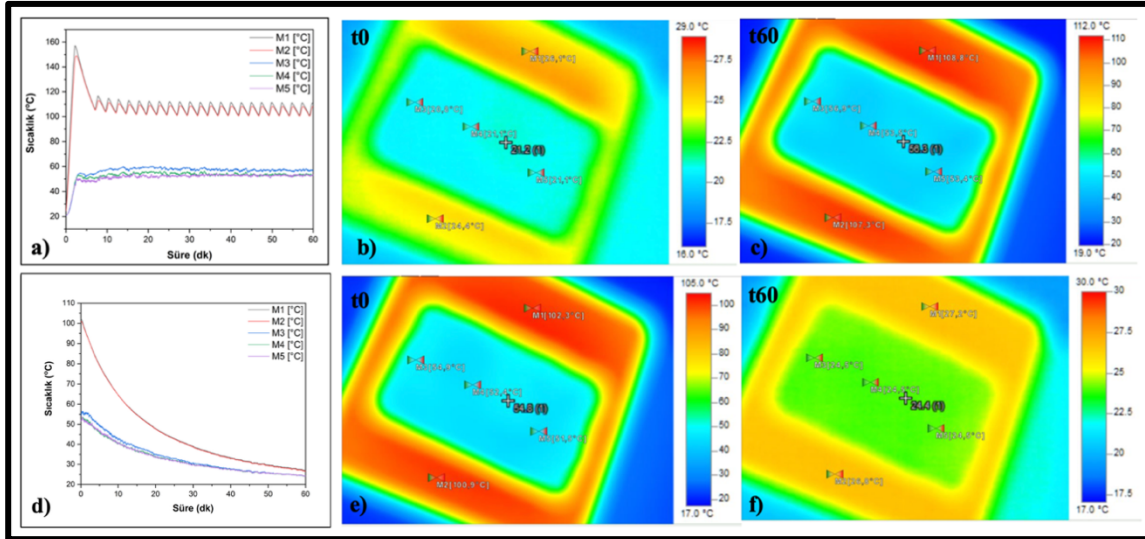


Şekil 4.28. UK-LWA numunesinin ısınma ve soğuma grafikleri ile termal kamera görüntüleri.

Numunenin ısınma grafiği (a) incelendiğinde; ısıtıcı yüzey sıcaklığı (M1-M2) 36 °C ile başlarken, t60 anında 136 °C ile sonlanmıştır. t60 anında numune yüzeyindeki (M4) maksimum sıcaklık 78 °C olarak ölçülmüştür. Numuneye ait soğuma grafiği (d) incelendiğinde; ısıtıcı yüzey sıcaklığı başlangıçta (t0) 138 °C iken t60 sonunda yaklaşık 27 °C olarak ölçülmüştür. Numune yüzey sıcaklığı soğuma başlangıcında yaklaşık 77 °C iken süreç sonunda ölçülen sıcaklıklar yaklaşık 24 °C'ye düşmüştür. Yaklaşık 42-53 °C aralığında bir sıcaklık kaybı, malzemenin ısıyı tutma ve iletme kabiliyetinin dengeli hareket ettiğini ortaya koymaktadır. Numunede başlangıç ısısı TK-LWA'ya göre bir miktar fazla olduğu görülmektedir. Bu sebeple levha yüzey

sıcaklığında daha sert dalgalanma gözlenmiştir. Bu durum numunenin daha yüksek sıcaklığa maruz kaldığını göstermektedir. t60 anında, ısınma fazında numune yüzeyinde ölçülen sıcaklıklar arasında yaklaşık 9 °C kadar fark olması, UK-LWA numunesinin daha az homojenlik gösterdiğini ortaya koymaktadır. Isınma sonunda levha yüzeyi ile numune yüzey sıcaklığı arasında yaklaşık 58 °C'lik fark, ısıtıcının daha yüksek sıcaklıklara çıkması ile birlikte numunenin yüksek oranda sıcaklığı absorbe etmesiyle ilişkilendirilmektedir. TK-LWA numunesi gibi yüksek ısıl direnç gösteren numunede daha az homojenlik görülmektedir. Soğuma fazında numune yüzeyindeki sıcaklık değişiminin yavaş olması, ısının zamanla ve kontrollü şekilde dışarı verildiğine işaret etmektedir. Bu durum, malzemenin ısı depolama kapasitesinin verimliliği ile ilişkilendirilmektedir.

DT-LWA numunesinin ısınma grafiği (a), ısınma sırasında t0 ve t60 sürelerindeki termal kamera görüntüleri (b-c), soğuma grafiği (d) ve soğuma sırasında t0 ve t60 sürelerindeki termal kamera görüntüleri (e-f) Şekil 4.29.'da verilmiştir.



Şekil 4.29. DT-LWA numunesinin ısınma ve soğuma grafikleri ile termal kamera görüntüleri.

Diyatomit katkılı arojel numunesi ısınmanın başlangıcında; levha yüzey sıcaklığı yaklaşık 26 °C iken numune yüzey sıcaklığı yaklaşık 20 °C olarak ölçülmüştür. Isıtma sonunda levha yüzeyinde (M1-M2) sıcaklık yaklaşık 108 °C'ye kadar yükselmesine rağmen numunenin yüzeyindeki maksimum sıcaklık yaklaşık 56 °C olarak ölçülmüştür. Soğuma başlangıcında (t0) numune yüzeyinde ölçülen ısı yaklaşık 54 °C iken levha yüzey sıcaklığı 102 °C ölçülmüştür. Doğal soğuma süresi tamamlandığında (t60) numune yüzey sıcaklığı maksimum 24,6 °C ve levha yüzey sıcaklığı 27,2 °C olarak ölçülmüştür. DT-LWA numunesinde levha yüzey sıcaklığı başlangıçta hızla yükselmesine rağmen numune yüzeyinde ölçülen sıcaklıklar yaklaşık 55 °C civarında, kontrollü bir şekilde artış göstermiştir. Bu durum, numunenin ısıyı tutma ve ısıl direnç

gösterme konusunda diğer iki numuneden daha iyi performans sergilediğini ortaya koymaktadır. Numune yüzeyinden alınan sıcaklık değerlerinin birbirine çok yakın oluşu, numunede homojen yapı varlığını ortaya koyarken aynı zamanda oldukça başarılı yalıtım özelliğine de işaret etmektedir. Doğal soğumanın başlamasıyla birlikte numune ısısının yavaşça kaybedilmesi, ısı tutma kapasitesi, termal kararlılık ve etkin ısı yalıtımını ortaya koymaktadır.

Alçıpan plak kullanılmadan sentezlenen üç farklı aerojel numunesinin (DT-LWA, TK-LWA ve UK-LWA) ısınma ve soğuma döngülerinde alınan sıcaklık değerleri Tablo 4.6.'da verilmiştir. Tablodaki değerler, ölçüm noktalarından alınan maksimum değerleri göstermektedir.

**Tablo 4.6.** LWA numuneleri için ölçüm noktalarından alınan sıcaklık değerleri.

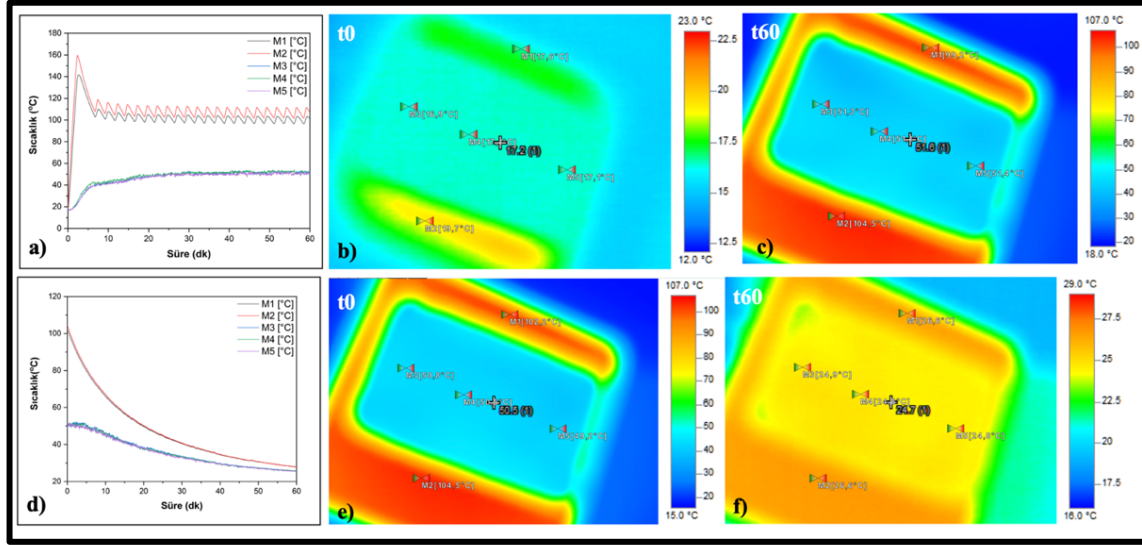
Numune Adı	Ölçüm Noktası	Isınma			Soğuma		
		t0	t60	$\Delta T$	t0	t60	$\Delta T$
TK-LWA	Levha Yüzeyi	~26 °C	~107 °C	81 °C	~105 °C	~27 °C	78 °C
	Numune Yüzeyi	~21 °C	~62 °C	41 °C	~77 °C	~24 °C	53 °C
UK-LWA	Levha Yüzeyi	~16 °C	~130 °C	114 °C	~138 °C	~27 °C	111 °C
	Numune Yüzeyi	~17 °C	~77 °C	60 °C	~77 °C	~24 °C	53 °C
DT-LWA	Levha Yüzeyi	~26 °C	~108 °C	82 °C	~102 °C	~27,2 °C	74,8 °C
	Numune Yüzeyi	~21 °C	~56 °C	35 °C	~54 °C	~24,6 °C	29,4 °C

DT-LWA numunesinin yüzey sıcaklıklarının en düşük değerinde ölçülmesi, numunenin etkili yalıtım performansına sahip olduğunu göstermektedir. TK-LWA numunesi, DT-LWA numunesine benzer şekilde dengeli bir performans göstererek ısıyı sınırlı bir şekilde iletmiş ve yüksek oranda bünyesinde tutabilmiştir. UK-LWA numunesinde ise yüzey sıcaklıkları diğer numunelerden daha fazla ölçülmüştür. Numunede ısı iletimi gecikmeli olarak gerçekleştiğinden orta düzeyde ve sınırlı yalıtım performansı göstermiştir. DT-LWA numunesi yüksek ısı yalıtım gereken uygulamalara iyi bir malzeme olarak öne çıkarken, ekonomiklik ve performans açısından UK-LWA ve TK-LWA numuneleri ortalama değerler sunan dengeli bir profil sergilemiştir.

#### 4.9.2. Aerojel kompozitlerin termal kamera analizi sonuçları

Alçıpan ile birleştirilerek hazırlanan LWA-Kompozit örneklerinin aerojel yüzeyleri ısıtıcı levhaya temas edecek şekilde yerleştirilmiş ve sıcaklık değişimleri izlenmiştir. Uygulamadaki amaç, bina yalıtım uygulamalarında dıştan yalıtımı simüle etmektir.

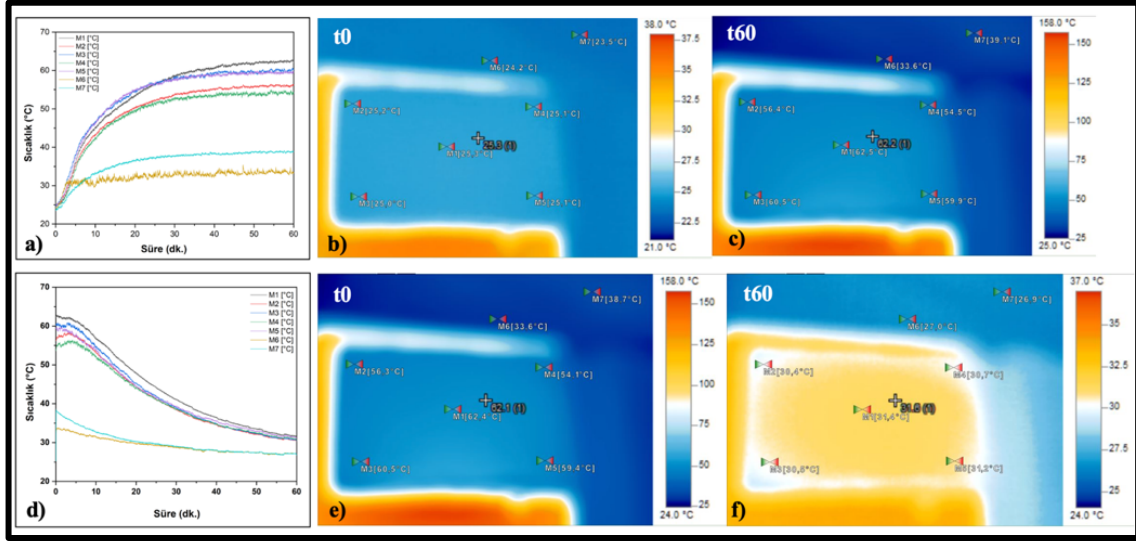
TK-LWA alçıpan kompozit numunesinin ısınma grafiği (a), ısınma sırasında t0 ve t60 sürelerindeki termal kamera görüntüleri (b-c), soğuma grafiği (d) ve soğuma sırasında t0 ve t60 sürelerindeki termal kamera görüntüleri (e-f) Şekil 4.30.'da verilmiştir.



Şekil 4.30. TK-LWA-Kompozitin ısınma ve soğuma grafikleri ile termal kamera görüntüleri.

Taban küllü ile sentezlenen arojel kompozit için ısınma grafiği (a) incelendiğinde; ısıtıcı yüzey sıcaklığı (M1-M2) başlangıç anında (t0) yaklaşık 18 °C iken numune yüzeyinde (M3-M4-M5) sıcaklıklar 20 °C altında ölçülmüştür. Isıtıcı yüzeyi için ölçülen en yüksek sıcaklık t60 anında yaklaşık 105 °C ile sonlanmıştır. Numune yüzeyi sıcaklık t60 anında yaklaşık 50 °C ile son bulmaktadır. Kompozitin soğuma grafiği incelendiğinde; t0 anında ısıtıcı yüzey sıcaklığı yaklaşık 105 °C iken numune yüzeyi sıcaklık 50 °C civarında ölçülmüştür. Isıtıcı yüzeyi t60 anında ani bir düşüşle 28 °C iken numune yüzey sıcaklığı 25 °C olarak ölçülmüştür. M1 ve M2 (ısıtıcı yüzey sıcaklığı) başlangıçtan itibaren ani ve hızlı bir düşüş eğilimindedir. Levha yüzeyinde 100 °C üzeri sıcaklıklara rağmen yüzey sıcaklıklarının 51 °C ile sınırlı kalması ısı geçişinin kontrol altında tutulduğunu göstermektedir. TK-LWA numunesinin termal kamera görüntülemesinde, numune yüzeyinde sıcaklık yaklaşık 62 °C olarak kaydedilirken, TK-LWA-kompozit numunede yüzey sıcaklığı yaklaşık 51 °C'ye inerek 11 °C kadar performans iyileşmesi elde edilmiştir. LWA numuneler alçıpanla birleştirildiğinde, yüzeyden alınan ölçümlerin birbirine yakın değerlerde olması, alçıpanın homojen yapıda olması ile açıklanmaktadır. Soğuma fazında, levha yüzey sıcaklıklarındaki dalgalı seyir, kompozitte gözlenmemiştir. t60 anında levha yüzeyi ile alçıpan yüzeyi sıcaklıkları birbirine çok yakındır. Bu durum, arojel katmanın ısıyı kontrollü ve hızlı bir şekilde salıverdiğini, bünyesinde aşırı ısı depolamadığını göstermektedir. Yalnızca TK-LWA numunesi kullanımı ile kıyaslandığında, kompozit formda yalıtım performansının %18 oranında iyileştiği gözlemlenmiştir.

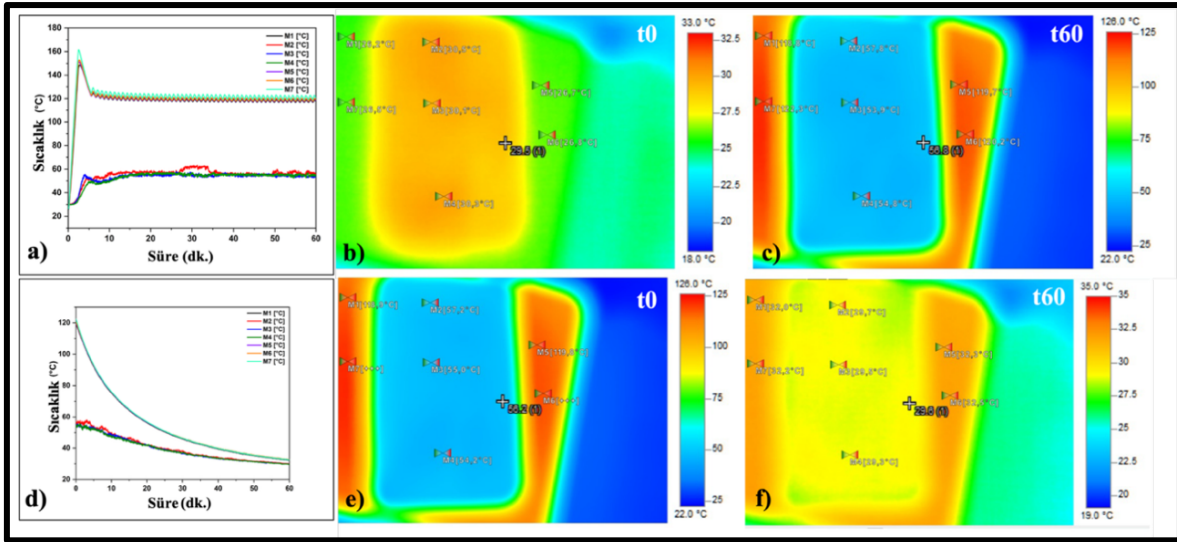
UK-LWA kompozit numunesinin ısınma grafiği (a), ısınma sırasında t0 ve t60 sürelerindeki termal kamera görüntüleri (b-c), soğuma grafiği (d) ve soğuma sırasında t0 ve t60 sürelerindeki termal kamera görüntüleri (e-f) Şekil 4.31.'de verilmiştir.



Şekil 4.31. UK-LWA-Kompozitin ısınma ve soğuma grafikleri ile termal kamera görüntüleri.

Uçucu kül katkılı arojel kompozit numunesinin ısınma ve soğuma grafiği incelendiğinde; ısınmanın başlamasından itibaren yüzey sıcaklıklarındaki artış 29-37 °C arasında kalmıştır. Yüksek levha sıcaklığına rağmen numunenin belli bir oranda yalıtım direnci oluşturduğu söylenebilir. Numune yüzeyindeki sıcaklık farkının 5-8 °C arasında olması, ısının malzeme içinde homojen şekilde dağılabildiğine işaret edebilmektedir. Bu durum malzemede ısı iletiminin kararlı mekanizma sergilediğini kanıtlamaktadır. Soğumanın başlangıcından itibaren 60 dakika içinde yüzey sıcaklıkları 30-31 °C'ye inmiştir. Bu durum numunenin ısıyı bünyesinde tutarak kontrollü bir şekilde dışarı verdiği anlamına gelir. Yüzey sıcaklıklarının kontrollü bir şekilde artmasıyla ısı iletiminin gecikmesi sağlamıştır. Diğer iki numuneden farklı olarak, UK-LWA numunesinde ölçüm noktalarına dış ortam da eklenmiştir. Levha yüzey sıcaklığı, termal skala verileri baz alınarak tespit edilmiştir. Levha sıcaklığı yaklaşık 158 °C'ye kadar çıktığı durumlarda numune yüzey sıcaklıklarının 60 °C civarında ölçülmesi, yüksek ısı etkisindeki direncini göstermektedir. UK-LWA numunesiyle kıyaslandığında kompozit numunenin yaklaşık 20 °C kadar düşürerek yalıtım performansını iyileştirdiği görülmektedir. Numune yüzey sıcaklığı yaklaşık 60 °C civarında iken dış ortam ısısının 39 °C civarında ölçülmesi, kompozitin çevresel ısı yayılımını kontrollü olarak sağladığını göstermektedir.

DT-LWA alçıpan kompozit numunesinin ısınma grafiği (a), ısınma sırasında t0 ve t60 sürelerindeki termal kamera görüntüleri (b-c), soğuma grafiği (d) ve soğuma sırasında t0 ve t60 sürelerindeki termal kamera görüntüleri (e-f) Şekil 4.32.'de verilmiştir.



Şekil 4.32. DT-LWA-Kompozitin ısınma ve soğuma grafikleri ile termal kamera görüntüleri.

Diyatomit ile sentezlenen aerjel kompozit için ısınma grafiği (a) incelendiğinde yaklaşık 26 °C ile başlayan M4-M5 noktalarındaki levha sıcaklığı yaklaşık iki dk. içinde 150 °C'ye çıkarken, aynı sürede numune yüzeyi sıcaklık noktalarında (M1-M2-M3) 32 °C olarak gözlenmiştir. t60 anında ısıtıcı yüzey sıcaklığı yaklaşık 108 °C ile son bulmuştur. 108 °C kadar yüksek sıcaklıklara rağmen numune yüzey sıcaklıklarında yalnızca 24-28 °C sıcaklık artışı, malzemenin etkin yalıtım performansına işaret etmektedir. DT-LWA-Kompozit için levha yüzeyinde sıcaklıklar yaklaşık 120 °C civarında iken numune yüzey sıcaklığı 57 °C civarında ölçülmüştür. Elde edilen yaklaşık 65 °C'lik sıcaklık farkı, numunenin sağladığı ısı bariyerini ortaya koymaktadır. Dış ortam ısısı, t60 anında yaklaşık 33 °C olarak ölçülmüştür. Aynı süre için numune yüzeyinde ölçülen sıcaklık yaklaşık 55 °C olması ısının çevreye iletimini sınırladığının göstergesidir. Soğuma döngüsünde, numune sıcaklığının oda ısısına kadar düşüşünün kontrollü şekilde gerçekleştiği görülmektedir. Ölçüm sonuçları incelendiğinde numune yüzeyinin tüm ölçüm noktalarında (M1-M2-M3) ısı artışının neredeyse aynı değerleri vermesi, numunenin homojen yapıda olduğu ve böylece dengeli ve kararlı bir ısı iletimin mümkün olduğuna işaret etmektedir. Bu durum, ısının yüzeye oldukça dengeli bir şekilde dağıldığını ve alçıpanla aerjel yapının oldukça başarılı şekilde birleştirildiğini göstermektedir. Aynı numune için soğuma grafiği incelendiğinde (d) ısıtıcı yüzeyi başlangıçta (t0) yaklaşık 112 °C iken numune yüzeyi sıcaklığı yaklaşık 50 °C ile başlamaktadır. Numune yüzey sıcaklığı t60 anında yaklaşık 26 °C iken ısıtıcı yüzeyi 29 °C ile sonlanmıştır.

LWA-Kompozit numunelerin ısınma ve soğuma döngülerinde alınan sıcaklık değerleri Tablo 4.7.'de verilmiştir. Tablodaki değerler, ölçüm noktalarından alınan maksimum sıcaklıkları göstermektedir.

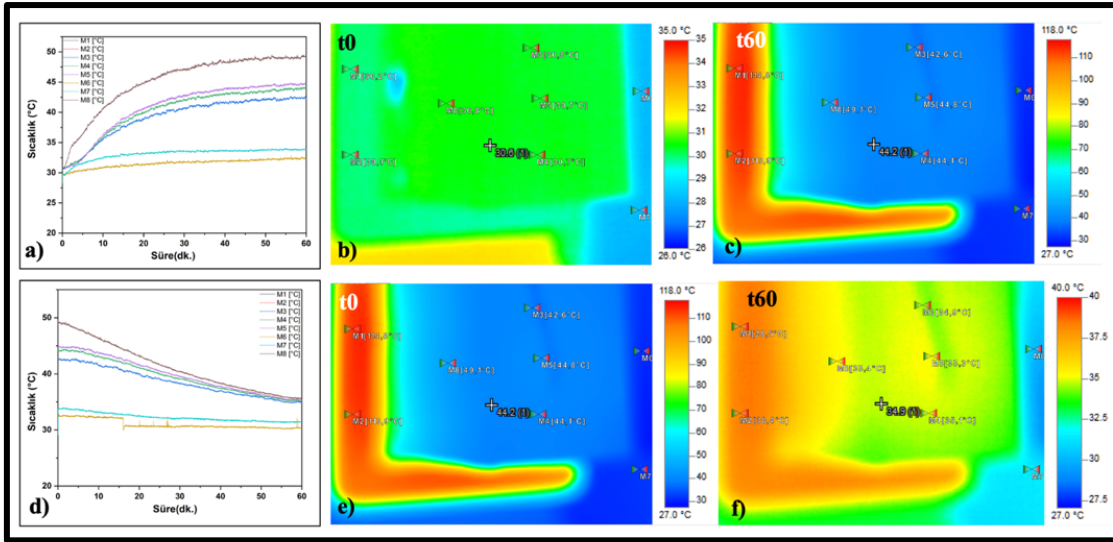
**Tablo 4.7.** LWA-Kompozit numuneleri için ölçüm noktalarından alınan sıcaklık değerleri.

Numune Adı	Ölçüm Noktası	Isınma			Soğuma		
		t0	t60	$\Delta T$	t0	t60	$\Delta T$
TK-LWA-Kompozit	Levha Yüzeyi	~18 °C	~105 °C	87 °C	~105 °C	~28 °C	77 °C
	Numune Yüzeyi	~20 °C	~50 °C	30 °C	~50 °C	~25 °C	25 °C
UK-LWA-Kompozit	Dış Ortam	~24 °C	~158 °C	134 °C	~38 °C	~27 °C	11 °C
	Numune Yüzeyi	~26 °C	~60 °C	34 °C	~62 °C	~31 °C	31 °C
DT-LWA-Kompozit	Levha Yüzeyi	~26 °C	~108 °C	82 °C	~112 °C	~29 °C	83 °C
	Numune Yüzeyi	~32 °C	~53 °C	21 °C	~50 °C	~26 °C	24 °C

Yalıtım performansı açısından üç kompozit numune karşılaştırıldığında DT-LWA-Kompozit numune en iyi yalıtım performansını, TK-LWA-Kompozit numunesi en iyi homojenliği ve UK-LWA-Kompozit numune en yüksek ısıl yük dayanımı göstermiştir. Soğuma fazında; TK-LWA kompozitte hızlı soğuma gözlenmiştir. Numune, ısıyı hızla dışarı iletmiş ve iç ortamın çabuk soğumasına neden olmuştur. UK-LWA kompozit için soğuma hızı orta derecede iken DT-LWA kompozitte yavaş soğuma gözlenmiştir. Bu durum numunenin sıcaklık değişimlerine karşı dirençli olma eğilimini, yüksek sıcaklıkta daha az yüzey ısı ve uzun süreli ısı tutuşu ile en kararlı numune olma özelliğini göstermektedir. UK-LWA-Kompozit için, ekstrem ısınma koşullarında bile ısının alçıpan yüzeyine geçiş miktarının az olması, numunenin ısıl yük altında termal kararlılığını ortaya koymuştur. Ayrıca LWA numunelere göre kompozitler %25'e varan performans iyileşmesi kazanmıştır.

#### 4.9.3. Aerojel kompozit kutuların termal kamera analizi sonuçları

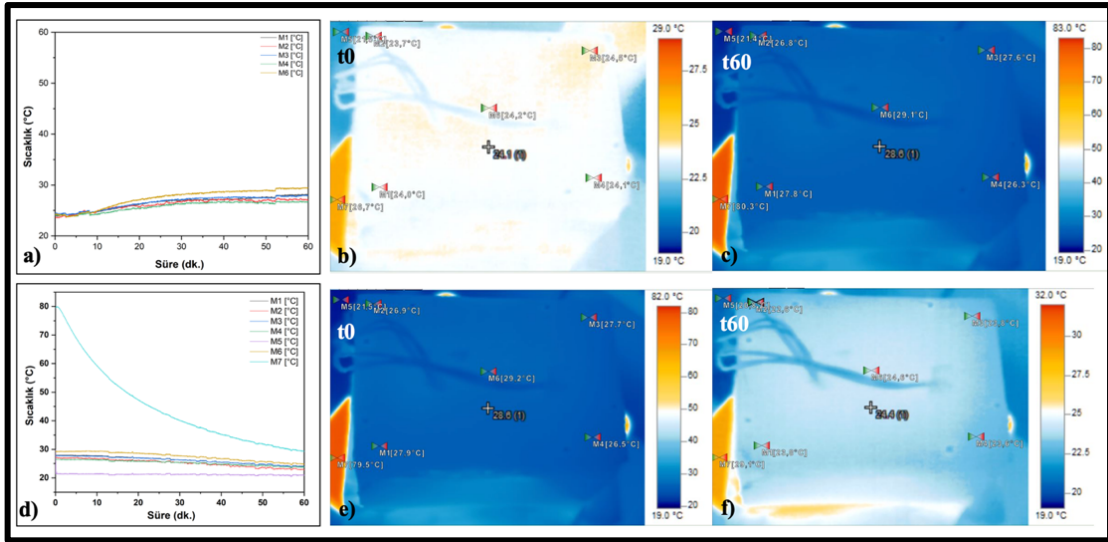
LWA-Kompozitlerin gerçek bir oda modelinde yalıtım performansının nasıl olacağını anlamak için test kutusu hazırlanmıştır. Buradaki amaç, teorik değerlerin ötesinde gerçek uygulama koşullarında ısıl performansın tespitidir. Test kutusunun ana gövdesi alçıpan yapılmış, sıcak levha ile temas eden yüzeye ise kompozit numune entegre edilmiştir. Levhaya temas eden kompozitte LWA katmanı kutunun iç kısmında yer aldığından, bu simülasyon içten yalıtım modelini temsil etmektedir. İlk olarak; LWA kompozitlerin karşılaştırılması amacıyla alçıpan altlığına sahip test kutusu ile ölçümlere başlanmıştır. Alçıpan yapılmış test kutusunun ısınma grafiği (a), ısınma sırasında t0 ve t60 sürelerindeki termal kamera görüntüleri (b-c), soğuma grafiği (d) ve soğuma sırasında t0 ve t60 sürelerindeki termal kamera görüntüleri (e-f) Şekil 4.33.'te verilmiştir.



Şekil 4.33. Alçıpan'dan yapılmış test kutusunun ısınma ve soğuma grafikleri ile termal kamera görüntüleri.

Kontrol numunesinde levha yüzey sıcaklığı t60 anında yaklaşık 116 °C civarında ölçülürken, kutu yüzeyinde maksimum sıcaklık değeri yaklaşık 45 °C olarak ölçülmüştür. Bu durum iç ısı enerjisinin önemli bir kısmının kutu içinde tutulduğunu ve dış yüzeylere sınırlı bir şekilde aktarıldığını göstermektedir. Dış ortam sıcaklığı ise sadece 28 °C'den 31 °C'ye yükselmiştir. Bu durum, kutudan çevreye çok düşük miktarda ısı transferi olduğunu ve yalıtımın dış ortamı koruma açısından etkili olduğunu göstermektedir. Soğuma aşamasında, levha yüzeyi ile numune yüzeyinin soğuma seyri neredeyse paralel gelişmiştir. Isıtıcı levhada sıcaklık 115 °C'den 38 °C'ye hızla soğumasına karşın, kutu yüzeyi (M8) yalnızca 49 °C'den 35 °C'ye düşmüştür. Bu değerler yüzeyin ısıl kütesinin yüksek olduğunu, yani ısıyı tutup yavaşça saldırdığını gösterir. Dış ortamda sadece 2-3 °C'lik bir sıcaklık düşüşü olması, ısı alışverişinin sınırlı kaldığını göstermektedir. Bu bağlamda, kontrol kutusunun hızlı ısınma ve yüksek ısıl geçirgenlik sergilediği söylenebilmektedir.

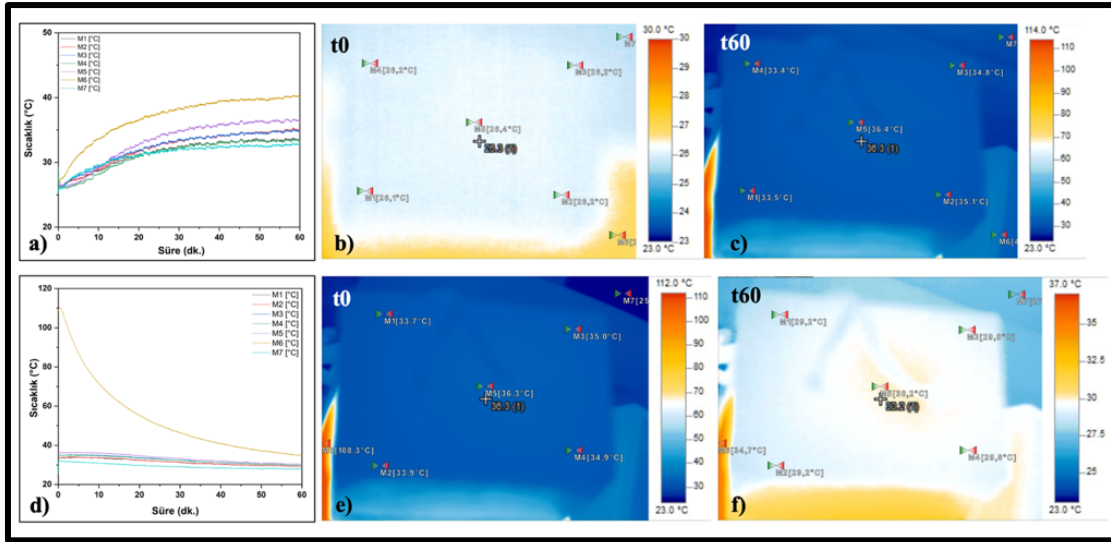
TK-LWA test kutusunun ısınma grafiği (a), ısınma sırasında t0 ve t60 sürelerindeki termal kamera görüntüleri (b-c), soğuma grafiği (d) ve soğuma sırasında t0 ve t60 sürelerindeki termal kamera görüntüleri (e-f) Şekil 4.34.'te verilmiştir.



Şekil 4.34. TK-LWA test kutusunun ısınma ve soğuma grafikleri ile termal kamera görüntüleri.

Isınma sürecinde ısıtıcı levha sıcaklığının  $27\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'den  $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'ye yükseldiği görülmektedir. Kutu yüzeyinde ölçülen sıcaklıkların maksimum  $29\text{ }^{\circ}\text{C}$  olması, TK-LWA-Kompozitin ısı iletimini engellediğini ortaya koymaktadır. Tamamı alçıpandan oluşan kontrol numunesinde dış yüzey sıcaklığı yaklaşık  $45\text{ }^{\circ}\text{C}$  iken kompozitin varlığı sıcaklığı yaklaşık  $18\text{ }^{\circ}\text{C}$  kadar tutmuştur. Aynı zamanda dış ortam sıcaklığının  $21\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'de sabit kaldığı görülmektedir. Düşük sıcaklık artışı kutunun içten dışa ısı iletimini önemli ölçüde sınırladığını, dolayısıyla iyi bir yalıtım sağladığını göstermektedir. Soğuma sürecinde levha sıcaklığı  $79\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'den  $29\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'ye, kutu yüzeyi ise  $28\text{-}29\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'den  $23\text{-}25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'ye kadar düşmüştür. Doğal soğumada levha sıcaklığı hızla düşerken, numune yüzeyinde ölçülen sıcaklıkların daha yavaş bir şekilde azalması, sistemin sıcaklık değişimlerinden daha az etkilendiğini göstermektedir.

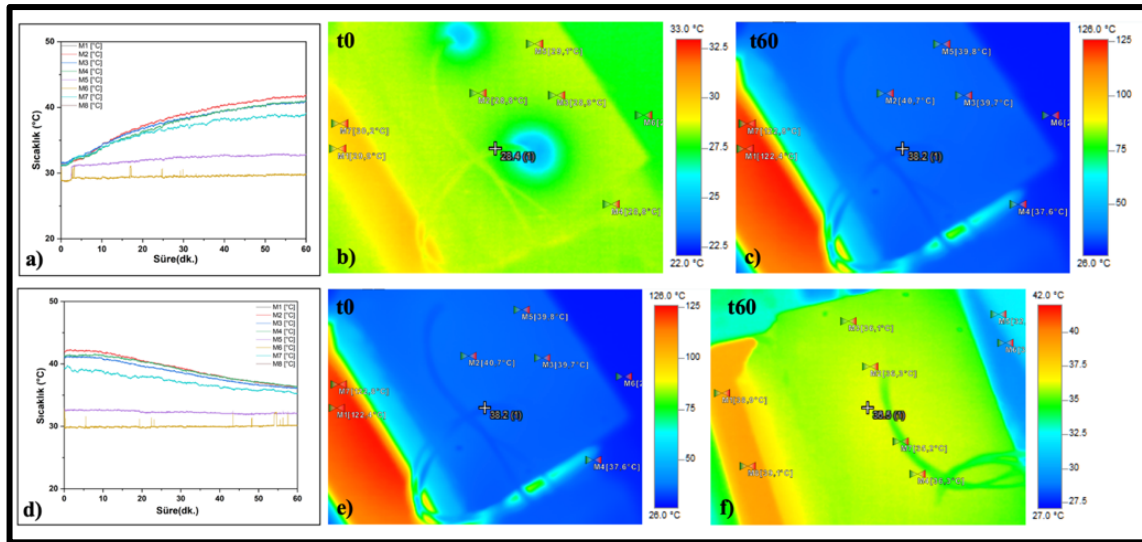
UK-LWA test kutusunun ısınma grafiği (a), ısınma sırasında t0 ve t60 sürelerindeki termal kamera görüntüleri (b-c), soğuma grafiği (d) ve soğuma sırasında t0 ve t60 sürelerindeki termal kamera görüntüleri (e-f) Şekil 4.35.'te verilmiştir.



Şekil 4.35. UK-LWA test kutusunun ısınma ve soğuma grafikleri ile termal kamera görüntüleri.

Isınma aşamasında levha sıcaklığı yaklaşık 100 °C iken kutu yüzeyinde yalnızca 7-10 °C'lik bir sıcaklık artışı gözlemlenmiştir. Isınma grafiği incelendiğinde t30 anından itibaren ısınma eğrisi yatay dengeye ulaşarak malzemenin ısı sönümleme kapasitesini ortaya koymuştur. Başlangıçta 26 °C olan numune yüzey sıcaklıkları, ısıtmanın 60. dakikasında 36 °C'ye ulaşmıştır. Bu durum, uçucu kül katkılı yapının ısı geçişine karşı belirli bir direnç gösterdiğini ve ısıyı yüzeye sınırlı ölçüde ilettiğini ortaya koymaktadır. Soğuma fazında levha yüzey sıcaklığı hızla düşerken, kutu yüzeyinde ölçülen sıcaklık değişimi daha yavaş ilerlemiştir. Soğuma aşamasında yüzey sıcaklıkları 3-6 °C'lik bir düşüş göstermiştir. Bu durum numunenin bir miktar ısıyı bünyesinde tutabildiğini göstermektedir. Dış ortam sıcaklıklarında gerçekleşen yaklaşık 2 °C'lik ısı değişimi de test kutusundaki ısı kaybının son derece düşük seviyelerde olduğuna işaret etmektedir.

DT-LWA test kutusunun ısınma grafiği (a), ısınma sırasında t0 ve t60 sürelerindeki termal kamera görüntüleri (b-c), soğuma grafiği (d) ve soğuma sırasında t0 ve t60 sürelerindeki termal kamera görüntüleri (e-f) Şekil 4.36.'da verilmiştir.



Şekil 4.36. DT-LWA test kutusunun ısınma ve soğuma grafikleri ile termal kamera görüntüleri.

Numunede t60 anında ulaşılan levha sıcaklığı yaklaşık 133 °C değerlerine kadar ulaşırken, kutu yüzeyinde ölçülen sıcaklıklar maksimum 41 °C olarak ölçülmüştür. Oluşan sıcaklık farkı (yaklaşık 80-90 °C) ciddi bir ısı bariyerinin varlığına işaret etmektedir. Bu noktada dış ortam sıcaklıklarının yaklaşık 37 °C iken kutu yüzey sıcaklığının 40 °C civarında ölçülmüş olması, ısının kutu içinde hapsedilme yeteneğiyle ilişkilendirilmektedir. Alçıpan tabanlı test kutusu ile karşılaştırıldığında, LWA kompozit tabanlı kutu, benzer profilde sıcaklık profilleri sergilemesine rağmen LWA'nın varlığı daha düşük yüzey sıcaklıklarının elde edilmesini sağlamıştır. Isı akışının başlamasından itibaren levha yüzeyinde ölçülen sıcaklıklar 30 °C'den 123 °C'ye yükselmiştir. Soğuma döngüsünde kutu yüzey sıcaklığı 36 °C'ye kadar düşmüştür. Soğuma sürecinde kutu yüzey sıcaklıkları iç sıcaklıklara oranla daha yavaş düşüş sergilemektedir. Bu durum malzemenin ısıyı yavaş bıraktığının göstergesidir.

Test kutularının zamana bağlı sıcaklık değişimlerinin gözlemlenmesi için; kutuların ısıtıcı plakayla temas eden alt yüzeyleri dışında tüm yüzeyleri geleneksel alçıpan levhadan yapılmıştır. Bu alt yüzeyler, üç farklı mineral katkı maddesiyle (uçucu kül, taban külü ve diyatomit) sentezlenen aerogelin alçıpanla birleştirilmesinden oluşmuş, böylece alçıpanla çift katmanlı bir yapı elde edilmiştir. Kutuların altına yerleştirilen ısıtıcı manyetik karıştırıcı, ısı kaynağı olarak kullanılmış ve plaka sıcaklığı yaklaşık 100 °C'ye ayarlanmıştır. Yüzey sıcaklıklarının ölçümü ise termal kamera ile gerçekleştirilmiş hem ısınma hem de soğuma süreçleri izlenmiştir. Test kutularına ait ısınma ve soğuma döngülerinde alınan sıcaklık değerleri Tablo 4.8.'de verilmiştir. Tablodaki değerler, ölçüm noktalarından alınan maksimum değerleri göstermektedir.

**Tablo 4.8.** LWA-Kutu numuneleri için ölçüm noktalarından alınan sıcaklık değerleri.

Numune Adı	Ölçüm Noktası	Isınma			Soğuma		
		t0	t60	$\Delta T$	t0	t60	$\Delta T$
Alçıpan-Kutu	Levha Yüzeyi	~30 °C	~115 °C	85 °C	~115 °C	~49 °C	66 °C
	Numune Yüzeyi	~31 °C	~45 °C	14 °C	~38 °C	~35 °C	3 °C
TK-LWA-Kutu	Levha Yüzeyi	~27 °C	~80 °C	53 °C	~79 °C	~29 °C	50 °C
	Numune Yüzeyi	~24 °C	~29 °C	5 °C	~29 °C	~25 °C	4 °C
UK-LWA-Kutu	Dış Ortam	~24 °C	~110 °C	86 °C	~108 °C	~35 °C	73 °C
	Numune Yüzeyi	~26 °C	~36 °C	10 °C	~36 °C	~30 °C	6 °C
DT-LWA-Kutu	Levha Yüzeyi	~26 °C	~133 °C	107 °C	~112 °C	~29 °C	83 °C
	Numune Yüzeyi	~32 °C	~41 °C	9 °C	~50 °C	~36 °C	14 °C

TK-LWA test kutusu, deney süresince en düşük yüzey sıcaklık artışını göstermiştir. Başlangıçta 24 °C civarında olan kutu üst yüzeyi, 60 dakikalık ısıtma sonunda yalnızca 2-5 °C artarak maksimum 29 °C'ye ulaşmıştır. Bu düşük artış, kompozitin yüksek yalıtım kapasitesine işaret etmektedir.

DT-LWA test kutusunda ısınma sonunda yüzey sıcaklıkları 53-57 °C aralığında kalmıştır. Bu değer, taban külüne göre daha yüksek bir ısı iletimine işaret etmekle birlikte, ısıtıcı levha ile kutu yüzeyi arasında yaklaşık 45-50 °C'lik bir sıcaklık farkı bulunması nedeniyle orta seviyede bir yalıtım performansı sergilediği söylenebilir. Ayrıca soğuma evresinde yüzey sıcaklıklarının kademeli şekilde düşmesi DT-LWA numunesinin orta-yüksek düzeyde ısıl atalet gösterdiğini, yani yapının ısıyı absorbe edip bir süre bünyesinde tuttuğunu göstermektedir.

UK-LWA test kutusu ısıtma sonunda 36 °C'lik yüzey sıcaklığına ulaşarak yaklaşık 65-70 °C'lik bir sıcaklık farkı korunmuştur. Bu durum, numunenin belirli bir düzeyde ısı geçişini engellediğini, ancak diyatomit veya taban külüne kıyasla daha fazla ısı ilettiğine işaret etmektedir. Bununla birlikte, yüzey sıcaklıklarının 33-36 °C gibi çok sınırlı bir aralıkta seyretmesi malzemenin homojen ısı dağılımı sağladığını ve üretim kalitesinin yüksek olduğunu düşündürmektedir. Karşılaştırma amacıyla kullanılan klasik alçıpan kutuda ise yüzey sıcaklıkları 60 dakikalık ısıtma sonucunda 43-49 °C seviyelerine ulaşmıştır. Bu değer, alçıpanın belirli bir düzeyde yalıtım sunduğunu ancak katkılı kompozitlere göre daha yüksek ısı geçişine izin verdiğini ortaya koymaktadır. Soğuma sürecinde sıcaklıkların yavaş düşmesi, alçıpanın ısıyı geç iletip uzun süre muhafaza ettiğini göstermektedir. Kutu içinde sınırlı ısınma, yüzeyin geç

soğuması ve dış ortamın etkilenmemesi yalıtım performansı açısından olumlu performansa olanak tanıyacaktır.

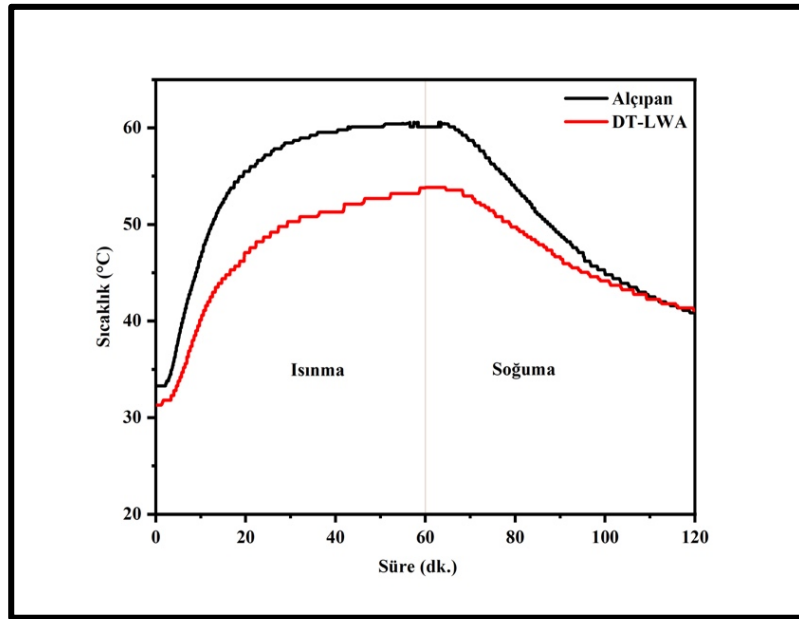
Deney sonuçları değerlendirildiğinde; taban külü katkılı kompozit kutu, yüzey sıcaklığındaki en düşük artışı göstererek en etkili ısı yalıtımını sağlamıştır. Diyatomit katkılı kompozit hem ısı geçişini sınırlaması hem de sıcaklığı zaman içinde dengelemesi bakımından ısı dengeleyici bir özellik sergilemiştir. Uçucu kül katkılı kompozit ise yüzey sıcaklığı bakımından orta düzeyde bir yalıtım sunmakla birlikte, yüzey sıcaklığının homojenliğiyle dikkat çekmiştir. Alçıpan kutu, kompozit katkılı örneklerle karşılaştırıldığında daha zayıf bir yalıtım göstermiştir. Kontrol numunesi olan alçıpan kutu, yaklaşık 114 °C levha sıcaklığı ve yaklaşık 45 °C numune yüzey sıcaklığı değerleriyle en yüksek ısı geçirgenliği göstermiştir. TK-LWA-Kutu için bu değerler sırasıyla 80 °C ve 28 °C olarak ölçülmüş, numunenin düşük ısı etkisinde mükemmel yalıtım sergilediğini ortaya konulmuştur. UK-LWA-Kutu numunesi için; levha yüzeyinde yaklaşık 108 °C ve numune yüzeyinde ortalama 36 °C sıcaklık tespiti, numunenin daha yüksek ısı yükte dengeli yalıtım performansına işaret etmektedir. Aşırı ısınma koşulunun gözlemlendiği DT-LWA-Kutu numunesi için levha yüzeyinde yaklaşık 127 °C sıcaklık ölçülürken, kutu yüzey sıcaklığı yalnızca 40 °C civarında ölçülmüştür. Bu durum, numunenin en iyi performans gösteren kompozit olduğuna işaret etmektedir.

#### 4.9.4. Aerojel kompozit kutuların iç ortam sıcaklık ölçüm sonuçları

LWA-Kutu olarak adlandırılan numunelerin kutu içi sıcaklık ölçümleriyle elde edilen verilerle zamana bağlı sıcaklık değişim grafikleri oluşturulmuştur. Her üç numune için 60 dk. ısınma ve 60 dk. soğuma süreleri sırasındaki ısı performansını, Alçıpan-Kutu olarak adlandırılan kontrol numunesi verileri ile karşılaştırılmıştır. Zamana bağlı sıcaklık değişim grafiğinin eğrisi, malzemenin yalıtım performansı hakkında bilgi sahibi olmayı sağlamaktadır. Buna göre grafik eğrisi ne kadar yatıksa yalıtım performansı o kadar iyi, eğri ne kadar geç yükseliyorsa ısı gecikme kapasitesi o kadar yüksek ve tepe noktası ne kadar düşükse malzemenin ısı direnci o kadar fazladır. Isınma fazında, numunenin yaklaşık 100 °C'lik sıcaklığa maruz kalmasıyla birlikte iç ortam sıcaklığındaki  $\Delta T$  artışı hesaplanmıştır. Numunelerin başlangıç sıcaklıklarındaki değişim ( $\pm 11$  °C), ortam sıcaklığından kaynaklanmaktadır. Bu nedenle numunelerin performans değerlendirmeleri mutlak sıcaklık değerleri üzerinden yapılmayıp, başlangıç durumlarına göre sıcaklık değişimlerini ifade eden  $\Delta T$  üzerinden gerçekleştirilmiştir.

DT-LWA-Kutu numunesinde kutu içi sıcaklıkların, kontrol numunesine kıyasla daha düşük olduğu kaydedilmiştir (Şekil 4.37.). Isınma fazında (0-60 dk.), kontrol numunesinde yaklaşık 60 °C'de tepe noktası gözlemlenirken, DT-LWA-Kutu numunesinde ulaşılan tepe

noktası sıcaklığı yaklaşık 54 °C olarak ölçülmüştür. Bu durumda iç ortam sıcaklığında tespit edilen yaklaşık 6 °C'lik sıcaklık farkı, DT-LWA-Kompozitin yalıtım özelliğinden kaynaklanmaktadır. DT-LWA-Kutu numunesine ait grafik çizgisinin (kırmızı çizgi) daha düşük eğimde olması, ısı iletiminin geleneksel alçıpan numuneye kıyasla daha yavaş olduğunu göstermektedir. DT-LWA-Kutu numunesinde ısınma eğrisinin tepe noktasına ulaşma eğilimi, alçıpana göre daha yayvan şekilde kaydedilmiştir. Bu durum, LWA'nın yüksek gözenekli yapısının ısı bariyeri olarak görev yaptığını göstermektedir. Böylece, yüzey ısısının iç ortama ulaşma süresi gecikmektedir (H. Liu & Zhao, 2022).

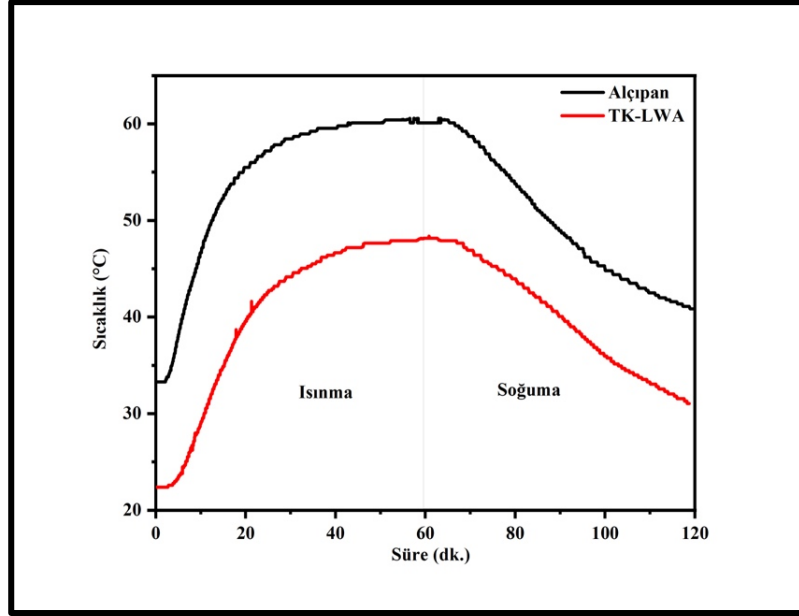


Şekil 4.37. DT-LWA test kutusunun kutu içi sıcaklık grafiği.

Soğuma fazında (60-120 dk.) ise DT-LWA-Kutu numunesine ait sıcaklık eğrisinin, alçıpana benzer bir davranış sergilemekte olduğu gözlenmektedir. 60. dakikadan itibaren ısının kesilmesi ile birlikte, DT-LWA-Kutu numunesinde, mevcut termal kütle ile alçıpanla uyumlu bir karakter sergilediği ve eğrinin bir süre sonra çakıştığı görülmüştür. Alçıpan kontrol numunesinin sıcaklığı ısınma fazında yaklaşık 33,5 °C'den 60,5 °C'ye çıkarak  $\Delta T = \sim 27$  °C ile %86 artış sergilerken, DT-LWA-Kutu numunesi ise  $\sim 32$  °C'den 53,5 °C'ye çıkarak  $\Delta T = \sim 21,5$  °C ile %67,19'luk artış göstermiştir.

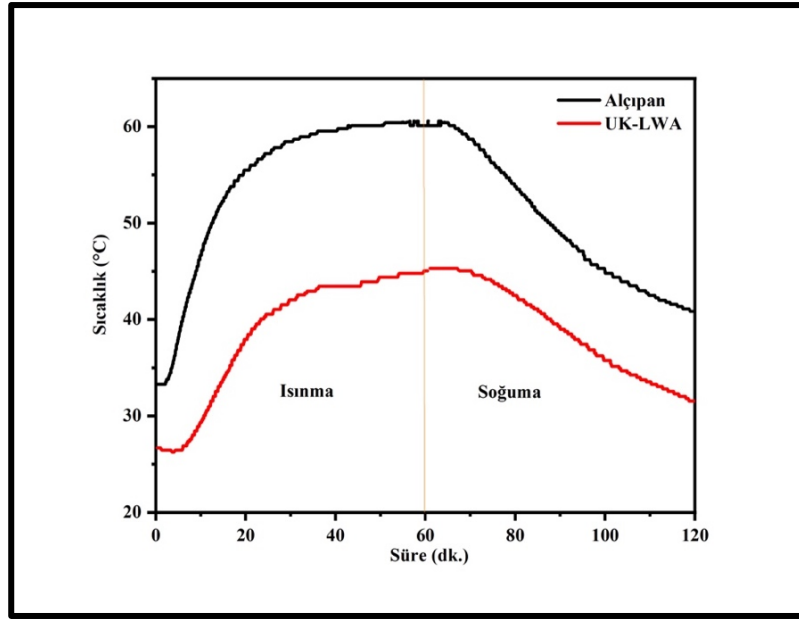
TK-LWA-Kutu numunesinde ise ısınma fazında gözlenen eğrinin, alçıpan numune eğrisine kıyasla daha yatay bir seyir izlediği gözlenmiştir (Şekil 4.38.). Isınmanın başlangıcından itibaren alçıpan kutunun iç ortam ısısı hızla yükselirken ( $\sim 60$  °C), TK-LWA-Kutuda eğri, 40. dakikadan sonra neredeyse hiç artış göstermemektedir. TK-LWA-Kutu numunesinde tepe

noktasında gözlenen sıcaklık  $\sim 48$  °C olarak kaydedilmiştir. Bu veriler, TK-LWA-Kompozitin ısı karşısında gösterdiği direncin yüksek olduğuna işaret etmektedir.



Şekil 4.38. TK-LWA test kutusunun kutu içi sıcaklık grafiği.

Soğuma fazında ise numunede gözlenen sıcaklık düşüşü oldukça istikrarlı bir şekilde seyrederek 120 dakika sonunda yaklaşık 31 °C'ye inmektedir. Bu durum, numunenin dış yüzey sıcaklığının iç ortama transferinde ısı kalkanı olarak çalıştığını ve ısı geçişini büyük ölçüde engellediğini göstermektedir. Buna ek olarak, numuneler oldukça etkili termal kütle davranışı ortaya koymaktadır. Bilindiği üzere, kontrol numunesi ısınma fazında yaklaşık  $\Delta T = \sim 27$  °C'lik sıcaklık artışı sergilerken, TK-LWA-Kutu numunesi ise  $\sim 22,5$  °C'den 48 °C'ye çıkarak  $\Delta T = \sim 25,5$  °C'lik artış göstermiştir. Toplam sıcaklık artışı ( $\Delta T$ ) neredeyse aynı olsa da TK-LWA-Kutu numunede eğrinin 40. dakikadan itibaren yatay seyir göstermesi, numunenin belli bir ısı doygunluğa ulaştıktan sonra ısı geçişini neredeyse sonlandırdığına, dolayısıyla ısı kapasitesinin yüksek olduğuna işaret etmektedir. Kontrol numunesi ve UK-LWA-Kutu numunesinde ısınma ve soğuma fazında kaydedilen kutu içi sıcaklıklardan elde edilen grafik Şekil 4.39.'da verilmiştir.



Şekil 4.39. UK-LWA test kutusunun kutu içi sıcaklık grafiği.

Isınma fazında kontrol numunesi 27 °C'lik artışla yaklaşık 60 °C'ye ulaşırken, LWA-Kutu numunesi başlangıç sıcaklığına göre yalnızca 18,5 °C artış göstermiştir. Ortaya çıkan 8,5 °C'lik sıcaklık farkı, numunenin ısı performansının diğer iki numuneye kıyasla daha iyi olduğunu ortaya koymaktadır. Numunede, alçıpana göre kaydedilen %31,5'lik sıcaklık düşüşü, ısının sönümlenme performansını ortaya koymaktadır. Soğuma fazında, numunenin ısıyı iletme kabiliyeti ortaya konulmuştur. Soğumanın başlangıcından itibaren, yaklaşık 45 °C olan sıcaklıklar süre sonunda 31,5 °C'ye inerek alçıpana kıyasla daha yavaş soğuma davranışı sergilemiştir.

UK-LWA numunesinin zamana bağlı sıcaklık değişim eğrisi incelendiğinde, 40. dakikadan itibaren yatay hale gelen eğrinin yaklaşık 45 °C'de ısı dengeye ulaşarak ısı kalkanı gibi davrandığını göstermektedir. Ortaya çıkan plato etkisi, UK'nin içi boş küreciklerden oluşan mikro yapısına bağlı olarak gelişen kararlı ısı performansının bir sonucu olduğu düşünülmektedir (Latifi vd., 2015). Isınma fazında kontrol numunesinde ( $\Delta T = 27$  °C) %80,6 sıcaklık artışı hesaplanırken, DT-LWA-Kutu numunede ( $\Delta T = 21,5$  °C) %67,2 ve TK-LWA-Kutu numunede ( $\Delta T = 25,5$  °C) %113,3 artış kaydedilmiştir. UK-LWA-Kutu numunesinde ( $\Delta T = 18,5$  °C) %69,8 oranında sıcaklık artışı ölçülmüştür. Numunelerin ısınma fazındaki sıcaklık değişimleri Tablo 4.9.'da verilmiştir.

**Tablo 4.9.** Isınma fazında kaydedilen sıcaklık değişimleri.

Numune Adı	Başlangıç Sıcaklığı ( $T_0$ )	Bitiş Sıcaklığı ( $T_{60}$ )	Sıcaklık Farkı ( $\Delta T$ )
Alçıpan-Kutu	~ 33,5 °C	~ 60,5 °C	27 °C
DT-LWA-Kutu	~ 32 °C	~ 53,5 °C	21,5 °C
TK-LWA-Kutu	~ 22,5 °C	~ 48 °C	25,5 °C
UK-LWA-Kutu	~ 26,5 °C	~ 45 °C	18,5 °C

Isınma fazında DT-LWA-Kompozit numunesi, kontrol numunesine kıyasla sıcaklık artışını %20,4 oranda sönümlerken, TK-LWA-Kompozit numune %5,6 ve UK-LWA-Kompozit numunesi %31,5 oranda sönümlenmiştir. Her üç LWA numunesi karşılaştırıldığında; UK-LWA-Kutu numunesinde en yüksek verim kaydedilirken, DT-LWA-Kutu numunesi onu takip etmektedir. Buna ek olarak TK-LWA-Kutunun sıcaklık artışına karşı gösterdiği direncin yalıtım performansı bakımından daha etkili olduğu söylenebilmektedir.

Soğuma fazında, ısı kaynağının kapatılmasının ardından numunenin iç ortam sıcaklığındaki  $\Delta T$  düşüşü hesaplanmıştır. Numunelerin soğuma fazındaki sıcaklık değişimleri Tablo 4.10.'da verilmiştir.

**Tablo 4.10.** Soğuma fazında kaydedilen sıcaklık değişimleri.

Numune Adı	Başlangıç Sıcaklığı ( $T_{60}$ )	Bitiş Sıcaklığı ( $T_{120}$ )	Sıcaklık Farkı ( $\Delta T$ )
Alçıpan-Kutu	~ 60,5 °C	~ 41 °C	-19,5 °C
DT-LWA-Kutu	~ 53,5 °C	~ 41 °C	-12,5 °C
TK-LWA-Kutu	~ 48 °C	~ 31 °C	-17 °C
UK-LWA-Kutu	~ 45 °C	~ 31,5 °C	-13,5 °C

Soğuma fazında kontrol numunesinde ( $\Delta T = -19,5$  °C) %32,2 oranda sıcaklık düşüşü hesaplanmıştır. DT-LWA-Kompozit numunesi, %23,4 oranda soğuyarak kontrol numunesine kıyasla daha yavaş soğuma performansı sergilerken, UK-LWA-Kompozit buna oranla ( $\Delta T = -13,5$  °C) %6,8 daha yavaş soğuma göstermiştir. TK-LWA-Kompozit numunede ise ( $\Delta T = -17$  °C) %35,4 oranda soğuma gerçekleşmiş ve kontrol numunesinden daha hızlı soğumuştur. DT-LWA-Kutu numunenin ısıyı hapsedme kapasitesi TK-LWA-Kutuya göre daha yüksek performans sergilerken, en iyi yalıtkan olarak UK-LWA-Kutu numunesi öne çıkmaktadır. Isı geçişini engellemede en başarılı numune UK-LWA-Kutu iken ısı kaybını yavaşlatmada DT-

LWA-Kutu numune ön plana çıkmıştır. TK-LWA-Kutu numune ise daha zayıf yalıtım performansına karşın daha stabil bir termal karakteristik sergilemiştir.

DT-LWA numunesinde diatomitin gözenekli yapısı ısı iletimini sınırlandırarak %20 oranında iyileşme sağlarken, TK numunesinde daha zayıf ısı dengeye daha etkili ısı depolama eşlik etmektedir. Buna ek olarak, LWA bileşiminde bulunan PVA ve CMC'nin organik yapısındaki matris bileşenlerinin meydana getirdiği üç boyutlu ağ yapısı, havayı hapsederek ısının fononlar aracılığıyla iletimini sınırlandırdığı sonucuna varılabilmektedir (B. Li vd., 2024).

UK-LWA-Kutu yüksek ısı direnciyle en düşük ısı iletkenlik sunarken, DT-LWA-Kutu dengeli bir ısı direnç performansı sunmaktadır. TK-LWA-Kutu ise geleneksel yapı malzemelerinden (alçıpan) daha iyi performansa sahip olup UK ve DT numunesine göre daha yüksek ısı iletkenlik performansı sergilemektedir. UK-LWA-Kutuda yalıtım verimliliği %31,5 olarak hesaplanmış olup diğer iki LWA numunesine kıyasla daha üstün performans sergilediği ve enerji verimliliği bağlamında en güçlü malzeme olduğu tespit edilmiştir.

Çalışma neticesinde uçucu kül ve taban külü atıkları ile diatomitlerden elde edilen LWA ve LWA kompozitleri hem düşük maliyet hem de üretim kolaylığı dikkate alınarak elde edilmiştir. Aerojel ürünlerin binalarda ısı yalıtım amaçlı kullanımının mümkün olduğu sonucuna varılmıştır.

## 5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Tez çalışması kapsamında; endüstriyel atıklar ve doğal silika kaynakları arojellere dönüştürülmüştür. Araştırmanın temel amacı binalarda enerji verimliliğine katkı sağlayacak ısı yalıtım malzemelerinin geliştirilmesidir. Bu amaçla uygulanan metodoloji, ileri teknolojilere atfedilen ve nano malzeme sentezine olanak tanıyan sol-jel yöntemi olarak seçilmiştir. Sentez sırasında saf su dışında herhangi bir kimyasal çözücü kullanılmamış, silika kaynağı olarak kullanılan hammaddeler hiçbir kimyasal ön işlemden geçirilmemiştir. Böylelikle yeşil sentez koşulları sağlanmış; çevresel etkiler, yüksek maliyet ve uzun üretim süresi minimize edilmiştir. Aerojellerin kurutulmasında laboratuvar ölçekli liyofilizatör kullanılarak dondurularak kurutma yapılmıştır. Bu tez çalışması sonucunda elde edilen bulgular değerlendirildiğinde;

- Diyatomit, uçucu kül ve taban külü ile sentezlenen LWA numunelerin SEM görüntüleri kapalı gözenek yapısını kanıtlamıştır. FT-IR spektrumu, PVA ve CMC varlığını doğrularken aynı zamanda Si-O-Si bağ yapısını açıkça ortaya koymuştur. Aerojellerin yığın yoğunlukları ( $\rho_a$ ) arasında en düşük yoğunluk değeri 0,099 g/cm<sup>3</sup> ile UK-LWA, en yüksek değer ise TK-LWA numunede tespit edilmiştir (0,142 g/cm<sup>3</sup>). Numunelerin gözeneklilik değerleri arasında; %92,71 ile UK-LWA en yüksek gözenekliliğe sahip numune iken TK-LWA numunesinde %89,60 en düşük gözeneklilik değeri hesaplanmıştır. DT-LWA numunesinin ısı iletkenliği 0,041 W/(m.K) olarak ölçülmüştür. Bu değer UK-LWA için 0,040 W/(m.K) ve TK-LWA numunesi için 0,031 W/(m.K) olarak tespit edilmiştir. LWA numunelerin birim-şekil değiştirme grafiğinde; TK-LWA numunesinde %10 deformasyon için yaklaşık 165 kPa yük gerekmiştir. UK-LWA için 85 kPa iken, DT-LWA numunesi ise yüksek gözenekli yapıda olduğu için 41 kPa yük altında %10 oranda deforme olmuştur.
- Aerojellere yapılan yangın geciktirici kaplama, alevlerin yayılımını büyük ölçüde sınırlamış, yüzeyde gelişecek tahribatı azaltmış ve malzemenin yapısal bütünlüğünün korunmasına katkı sağlamıştır.
- Sentezlenen LWA ve LWA-Kompozit numunelerin termal kamera ölçümleri, DT-LWA numunesinin en etkili yalıtım performansı sergilediğini doğrulamıştır. Ayrıca LWA numunelere göre kompozitlerde %25'e varan performans iyileşmesi sağlanmıştır. LWA-Kompozitlerin gerçek bir oda modelinde yalıtım performansının nasıl olacağını anlamak için test kutusu tasarlanmıştır. Sonuçlar değerlendirildiğinde; TK-LWA-Kutu, yüzey sıcaklığındaki en düşük artışı göstererek en etkili ısı yalıtımını sağlamıştır.
- LWA-Kompozitlerin kutu içi sıcaklık ölçümleri Arduino DHT11 sensörü kullanılarak alınmıştır. UK-LWA-Kutunun yalıtım verimliliği %31,5 olarak hesaplanmış, diğer iki LWA

numunesine kıyasla daha üstün performans sergilediği ve enerji verimliliği bağlamında etkili malzeme olduğu ortaya konulmuştur.

- Malzeme üretiminde endüstriyel atık kullanımı yaklaşımı; atık yönetimi, ekonomik fayda ve döngüsel ekonomi hedefleriyle de uyum sağlamaktadır. Bu yenilikçi malzemelerin çağdaş mimari çerçeveye entegre edilmesiyle mühendisler ve mimarlar, binaların termal performansını ve sürdürülebilirliğini önemli ölçüde artırarak yeni nesil yeşil bina teknolojilerinin önünü açabilecektir.
- Gelecek araştırmalarda; geliştirilen aerojellerin üretimindeki enerji tüketimini, geleneksel yalıtım malzemelerinin üretimleriyle kıyaslayan kapsamlı bir YDD gerçekleştirilerek net bir karbon ayak izi hesaplaması yapılabilir. Ayrıca bu çalışmada kullanılan endüstriyel atıklar ve diatomit dışında farklı silika kaynaklarının hammadde olarak kullanımı araştırılabilir. Bir diğer araştırma önerisi olarak; malzemenin fonksiyonelliğini artırmak amacıyla, aerojellere güneş ışığını yansıtıcı pigment eklenerek serin kaplama özelliği kazandırılabilir. Böylelikle binalarda pasif soğutma potansiyelinin araştırılması mümkün olacaktır. Ayrıca daha geniş bir endüstriyel ürün çeşitliliği elde etmek amacıyla farklı matris malzeme kombinasyonları denenebilir. Son olarak, elde edilen aerjel kompozit sistemlerin ısı yalıtım performansının yanısıra ses yalıtım performanslarının araştırılması, çalışmanın literatürdeki çok yönlülüğünü ve araştırma derinliğini artıracaktır.

## KAYNAKÇA

- Abden, M. J., Tao, Z., Alim, M. A., Pan, Z., George, L., & Wuhrer, R. (2022). Combined use of phase change material and thermal insulation to improve energy efficiency of residential buildings. *Journal of Energy Storage*, 56, 105880. <https://doi.org/10.1016/j.est.2022.105880>
- Açıkgüz, Z. Y., Konuk Ege, G., Köse, A., Ege, M., & Canci Matur, U. (2025). Enerji Etkin Otomasyon Sistemleri ile Sürdürülebilir Mimari Tasarımlar. İçinde *Doğanın Ritmi, Enerjinin Dönüşümü, Üretimin Gücü (I. Ulusal Enerji Dönüşümü ve Sürdürülebilirlik Konferansı)* (ss. 90-108). İstanbul Gedik Üniversitesi. <https://doi.org/10.61150/gedikyay.250307>
- Aditya, L., Mahlia, T. M. I., Rismanchi, B., Ng, H. M., Hasan, M. H., Metselaar, H. S. C., Muraza, O., & Aditiya, H. B. (2017). A review on insulation materials for energy conservation in buildings. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 73, 1352-1365. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.02.034>
- Aggrey, P., Nartey, M., Kan, Y., Cvjetinovic, J., Andrews, A., Salimon, A. I., Dragnevski, K. I., & Korsunsky, A. M. (2021). On the diatomite-based nanostructure-preserving material synthesis for energy applications. İçinde *RSC Advances* (C. 11, Sayı 51, ss. 31884-31922). Royal Society of Chemistry. <https://doi.org/10.1039/d1ra05810j>
- Akan, A. E. (2021). Determination and Modeling of Optimum Insulation Thickness for Thermal Insulation of Buildings in All City Centers of Turkey. *International Journal of Thermophysics*, 42(4), 49. <https://doi.org/10.1007/s10765-021-02799-9>
- Akhmetova, I., Fedyukhin, A., Dontsova, A., Berardi, U., Afanaseva, O., Gafiatullina, K., Kraikov, M., Nemova, D., Selicati, V., & Stasi, R. (2025). Long-Term Thermal Stability of Aerogel and Basalt Fiber Pipeline Insulation Under Simulated Atmospheric Aging. *Energies*, 18(16), 4232. <https://doi.org/10.3390/en18164232>
- Akiner, M. E. (2025). Structural Obstacles to Energy Transition in Türkiye and Holistic Solution Proposals: A Political, Economic and Social Dimensional Analysis. *Energies*, 18(10), 2591. <https://doi.org/10.3390/en18102591>
- Al Biajawi, M. I., Embong, R., Muthusamy, K., Ismail, N., & Obiany, I. I. (2022). Recycled coal bottom ash as sustainable materials for cement replacement in cementitious Composites: A review. *Construction and Building Materials*, 338, 127624. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127624>
- Alemán, J. V., Chadwick, A. V., He, J., Hess, M., Horie, K., Jones, R. G., Kratochvíl, P., Meisel, I., Mita, I., Moad, G., Penczek, S., & Stepto, R. F. T. (2007). Definitions of terms relating to the structure and processing of sols, gels, networks, and inorganic-organic hybrid materials (IUPAC Recommendations 2007). *Pure and Applied Chemistry*, 79(10), 1801-1829. <https://doi.org/10.1351/pac200779101801>
- Al-Homoud, Dr. M. S. (2005). Performance characteristics and practical applications of common building thermal insulation materials. *Building and Environment*, 40(3), 353-366. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2004.05.013>
- Ali, A., Chiang, Y. W., & Santos, R. M. (2022). X-ray Diffraction Techniques for Mineral Characterization: A Review for Engineers of the Fundamentals, Applications, and Research Directions. *Minerals*, 12(2), 205. <https://doi.org/10.3390/min12020205>
- Ali, A., Issa, A., & Elshaer, A. (2024). A Comprehensive Review and Recent Trends in Thermal Insulation Materials for Energy Conservation in Buildings. *Sustainability*, 16(20), 8782. <https://doi.org/10.3390/su16208782>

- Almeida, C. M. R., Ghica, M. E., Ramalho, A. L., & Durães, L. (2021). Silica-based aerogel composites reinforced with different aramid fibres for thermal insulation in Space environments. *Journal of Materials Science*, 56(24), 13604-13619. <https://doi.org/10.1007/s10853-021-06142-3>
- Al-Tarbi, S. M., Baghabra Al-Amoudi, O. S., Al-Osta, M. A., Al-Awsh, W. A., Ali, M. R., & Maslehuddin, M. (2022). Development of eco-friendly hollow concrete blocks in the field using wasted high-density polyethylene, low-density polyethylene, and crumb tire rubber. *Journal of Materials Research and Technology*, 21, 1915-1932. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.10.027>
- Altun, M., Meral Akgül, Ç., & Akçamete, A. (2019). Kabuk yalıtımının bina ısıtma enerjisi ihtiyacına, maliyetine ve karbon ayak izine etkisinin yaşam döngüsü bakış açısıyla değerlendirmesi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 35(1), 147-164. <https://doi.org/10.17341/gazimmfd.445751>
- An, X., Ma, C., Wang, R., Gong, L., Liu, C., Lu, X.-Y., Liu, Z., & Li, X. (2025). Anisotropic Biomass Aerogels with Enhanced Mechanical, Flame Retardancy, Smoke Suppression, and Antibacterial Performances for Thermal Insulation. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 13(22), 8469-8480. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.5c03336>
- Arowoia, V. A., Moehler, R. C., & Fang, Y. (2024). Digital twin technology for thermal comfort and energy efficiency in buildings: A state-of-the-art and future directions. *Energy and Built Environment*, 5(5), 641-656. <https://doi.org/10.1016/j.enbenv.2023.05.004>
- Aruta, G., Ascione, F., Iovane, T., & Mastellone, M. (2025). Thermal resilience to climate change of energy retrofit technologies for building envelope. *Energy*, 327, 136489. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2025.136489>
- Asadi, E., da Silva, M. G., Antunes, C. H., & Dias, L. (2012). Multi-objective optimization for building retrofit strategies: A model and an application. *Energy and Buildings*, 44, 81-87. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.10.016>
- Asdrubali, F., D'Alessandro, F., & Schiavoni, S. (2015). A review of unconventional sustainable building insulation materials. *Sustainable Materials and Technologies*, 4, 1-17. <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2015.05.002>
- Ashhar, M. Z. M., & Lim, C. H. (2020). Numerical simulation of heat transfer in a roof assembly with reflective insulation and radiant barrier. *Building Simulation*, 13(4), 897-911. <https://doi.org/10.1007/s12273-020-0624-3>
- Aşıkoğlu Metehan, A. (2025). The Techno-Economic Feasibility of Retrofitting Buildings in Turkey Within the NZEB Framework: A Case Study in Izmir. *Sustainability*, 17(18), 8399. <https://doi.org/10.3390/su17188399>
- Avan, Ç., Yıldız, H., & Avan, E. (2021). TUĞLA, BİMS VE GAZBETONUN ISIL VERİMLİLİK VE MALİYET AÇISINDAN KARŞILAŞTIRILMASI. *Sürdürülebilir Mühendislik Uygulamaları ve Teknolojik Gelişmeler Dergisi*, 4(2), 59-63. <https://doi.org/10.51764/smutgd.948311>
- Axaopoulos, I., Axaopoulos, P., Panayiotou, G., Kalogirou, S., & Gelegenis, J. (2015). Optimal economic thickness of various insulation materials for different orientations of external walls considering the wind characteristics. *Energy*, 90, 939-952. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.07.125>

- Aziz, M. A., Gad, I. A. M., Mohammed, E. S. F. A., & Mohammed, R. H. (2012). Experimental and numerical study of influence of air ceiling diffusers on room air flow characteristics. *Energy and Buildings*, 55, 738-746. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.09.027>
- Azmi, A., Lau, K. S., Chin, S. X., Khiew, P. S., Zakaria, S., & Chia, C. H. (2021). Zinc oxide-filled polyvinyl alcohol–cellulose nanofibril aerogel nanocomposites for catalytic decomposition of an organic dye in aqueous solution. *Cellulose*, 28(4), 2241-2253. <https://doi.org/10.1007/s10570-021-03695-z>
- Azum, N., Rub, M. A., Khan, A., Khan, A. A. P., & Asiri, A. M. (2021). Aerogel applications and future aspects. *Çinde Advances in Aerogel Composites for Environmental Remediation* (ss. 357-367). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-820732-1.00019-9>
- Ba Thai, Q., Ee Siang, T., Khac Le, D., Shah, W. A., Phan-Thien, N., & Duong, H. M. (2019). Advanced fabrication and multi-properties of rubber aerogels from car tire waste. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 577(June), 702-708. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2019.06.029>
- Bae, M., Ahn, H., Kang, J., Choi, G., & Choi, H. (2022). Determination of the Long-Term Thermal Performance of Foam Insulation Materials through Heat and Slicing Acceleration. *Polymers*, 14(22), 4926. <https://doi.org/10.3390/polym14224926>
- Baetens, R., Jelle, B. P., & Gustavsen, A. (2010). Phase change materials for building applications: A state-of-the-art review. *Energy and Buildings*, 42(9), 1361-1368. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2010.03.026>
- Baig, N., Kammakam, I., & Falath, W. (2021). Nanomaterials: a review of synthesis methods, properties, recent progress, and challenges. *Materials Advances*, 2(6), 1821-1871. <https://doi.org/10.1039/D0MA00807A>
- Baimenov, A., Daulbayev, C., Pouloupoulos, S. G., & Mochalin, V. N. (2024). MXene filled hydrogel and aerogel composites. *Materials Today*, 78, 75-91. <https://doi.org/10.1016/j.mattod.2024.06.011>
- Balaji, D., Sivalingam, S., Bhuvaneshwari, V., Amarnath, V., Adithya, J., Balavignesh, V., & Ganesh surya, R. (2022). Aerogels as alternatives for thermal insulation in buildings – A comparative teeny review. *Materials Today: Proceedings*, 62, 5371-5377. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.03.541>
- Balci, M. P., Bayat, R., Altinok, B. Y., Karakurt, C., & Sen, F. (2025). Development of next-generation eco-friendly diatomite-based aerogels: Application in dye removal and evaluation of biological potentials. *Next Research*, 2(4), 100907. <https://doi.org/10.1016/j.nexres.2025.100907>
- Balci, M. P., Bayat, R., Karakurt, C., & Sen, F. (2025). Development of environmentally friendly lightweight aerogel composites as sustainable building materials: high insulation performance and application potential. *International Journal of Environmental Science and Technology*. <https://doi.org/10.1007/s13762-025-06506-1>
- Bera, M., Das, S., Garai, S., Dutta, S., Roy Choudhury, M., Tripathi, S., & Chatterjee, G. (2025). Advancing energy efficiency: innovative technologies and strategic measures for achieving net zero emissions. *Carbon Footprints*, 4(1), 3. <https://doi.org/10.20517/cf.2024.48>
- Bergmann Becker, P. F., Effting, C., & Schackow, A. (2022). Lightweight thermal insulating coating mortars with aerogel, EPS, and vermiculite for energy conservation

- in buildings. *Cement and Concrete Composites*, 125, 104283. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2021.104283>
- Birdsong, B. K., Wu, Q., Hedenqvist, M. S., Capezza, A. J., Andersson, R. L., Svagan, A. J., Das, O., Mensah, R. A., & Olsson, R. T. (2024). Flexible and fire-retardant silica/cellulose aerogel using bacterial cellulose nanofibrils as template material. *Materials Advances*, 5(12), 5041-5051. <https://doi.org/10.1039/D3MA01090B>
- Bisson, A., Rigacci, A., Lecomte, D., Rodier, E., & Achard, P. (2003). Drying of Silica Gels to Obtain Aerogels: Phenomenology and Basic Techniques. *Drying Technology*, 21(4), 593-628. <https://doi.org/10.1081/DRT-120019055>
- Boccia, A. C., Pulvirenti, A., García-González, C. A., Grisi, F., & Neagu, M. (2023). Compendium of Safety Regulatory for Safe Applications of Aerogels. *Gels*, 9(11), 842. <https://doi.org/10.3390/gels9110842>
- Bodin, A., Coloigner, A., Pietri, T., & Simonato, J. (2025). The Core–Shell Approach for Thermally Conductive and Electrically Insulating Polymer Nanocomposites: A Review. *Macromolecular Rapid Communications*, 46(15). <https://doi.org/10.1002/marc.202500078>
- Boruah, M., & Sarma, A. (2025). Dry Gels: Concept, Current Trends, and New Avenues in Drug Delivery and Biomedical Application. *Advanced Healthcare Materials*, 14(29). <https://doi.org/10.1002/adhm.202500863>
- Bozsaky, D. (2016). Application of Nanotechnology-Based Thermal Insulation Materials in Building Construction. *Slovak Journal of Civil Engineering*, 24(1), 17-23. <https://doi.org/10.1515/sjce-2016-0003>
- Braish, T., Tinel, L., Depelchin, L., Gaudion, V., Andres, Y., Caudron, C., Antczak, E., Brachelet, F., & Locoge, N. (2023). Evaluation of the seasonal variation of VOC surface emissions and indoor air concentrations in a public building with bio-based insulation. *Building and Environment*, 238, 110312. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2023.110312>
- Brolinson, B., Palmer, K., & Walls, M. (2023). Does Energy Star Certification Reduce Energy Use in Commercial Buildings? *Journal of the Association of Environmental and Resource Economists*, 10(1), 55-93. <https://doi.org/10.1086/720952>
- Bruck, A., Diaz Ruano, S., & Auer, H. (2022). Values and implications of building envelope retrofitting for residential Positive Energy Districts. *Energy and Buildings*, 275, 112493. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.112493>
- Burger, N., Laachachi, A., Ferriol, M., Lutz, M., Toniazzo, V., & Ruch, D. (2016). Review of thermal conductivity in composites: Mechanisms, parameters and theory. *Progress in Polymer Science*, 61, 1-28. <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2016.05.001>
- Cai, S., Deng, X., Beiyuan, J., Chen, X., Liu, D., Lv, D., Duan, C., Lin, L., Cha, R., Xie, W., Chen, H., Zhou, J., Lu, Z., Huang, L., & Yuan, W. (2024). Review of synthetic polymer-based thermal insulation materials in construction and building. *Journal of Building Engineering* (C. 97). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.job.2024.110846>
- Caner, İ. (2021). Calculation of energy consumption and emissions of buildings in capitals of european with the degree-day method. *Journal of Sustainable Construction Materials and Technologies*. <https://doi.org/10.14744/jscmt.2021.03>
- Cantero, D., Pinilla-Peñalver, E., Romero, A., & Sánchez-Silva, L. (2023). Synthesis of waterborne polyurethane aerogels-like materials via freeze-drying: an innovative

- approach. *Journal of Materials Science*, 58(21), 9087-9102. <https://doi.org/10.1007/s10853-023-08579-0>
- Cavagnoli, S., Fabiani, C., de Albuquerque Landi, F. F., & Pisello, A. L. (2024). Advancing sustainable construction through comprehensive analysis of thermal, acoustic, and environmental properties in prefabricated panels with recycled PET materials. *Energy and Buildings*, 312, 114218. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2024.114218>
- Cetiner, I., & Shea, A. D. (2018). Wood waste as an alternative thermal insulation for buildings. *Energy and Buildings*, 168, 374-384. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.03.019>
- Chemere, E. B., Mhlabeni, T. L., Mhike, W., Mavhungu, M. L., & Shongwe, M. B. (2025). A comprehensive review of types, synthesis strategies, advanced designing and applications of aerogels. *Royal Society Open Science*, 12(5). <https://doi.org/10.1098/rsos.241975>
- Chen, Y., Ran, J., Yue, X., Yang, D., Zhang, T., & Qiu, F. (2025). Cellulose-based thermal management composites: An emerging material for multi-industry sustainability. *Çinde Renewable and Sustainable Energy Reviews* (C. 218). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2025.115801>
- Chen, Y. X., Klima, K. M., Brouwers, H. J. H., & Yu, Q. (2022). Effect of silica aerogel on thermal insulation and acoustic absorption of geopolymers foam composites: The role of aerogel particle size. *Composites Part B: Engineering*, 242, 110048. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2022.110048>
- Chen, Y. X., & Yu, Q. (2024). Surface modification of miscanthus fiber with hydrophobic silica aerogel for high performance bio-lightweight concrete. *Construction and Building Materials*, 411. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.134478>
- Cheng, X., Chang, X., Wu, F., Liao, Y., Pan, K., Fong, H., Yu, J., Liu, Y.-T., & Ding, B. (2024). Advanced nanofabrication for elastic inorganic aerogels. *Nano Research*, 17(10), 8842-8862. <https://doi.org/10.1007/s12274-023-6369-4>
- Chiang, C., Ma, C. M., Wu, D., & Kuan, H. (2003). Preparation, characterization, and properties of novolac-type phenolic/SiO<sub>2</sub> hybrid organic-inorganic nanocomposite materials by sol-gel method. *Journal of Polymer Science Part A: Polymer Chemistry*, 41(7), 905-913. <https://doi.org/10.1002/pola.10624>
- Chmutina, K., & Goodier, C. I. (2013). *Case Study Analysis of Urban Decentralised Energy Systems* (ss. 307-323). [https://doi.org/10.1007/978-3-642-37753-2\\_23](https://doi.org/10.1007/978-3-642-37753-2_23)
- Cho, H., Sung, M., Choi, J., Lee, H., Prabakaran, L., & Kim, J. W. (2024). Ultralight, Robust, Thermal Insulating Silica Nanolace Aerogels Derived from Pickering Emulsion Templates. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 16(7), 9255-9263. <https://doi.org/10.1021/acsami.3c17200>
- Cong, R., Cai, T., Ge-Zhang, S., Yang, H., & Zhang, C. (2024). Fabrication of PVA-Silica Sol Wood Composites via Delignification and Freezing Pretreatment. *Polymers*, 16(13), 1949. <https://doi.org/10.3390/polym16131949>
- Cosentino, L., Fernandes, J., & Mateus, R. (2023). A Review of Natural Bio-Based Insulation Materials. *Energies*, 16(12), 4676. <https://doi.org/10.3390/en16124676>
- Cuce, E., Cuce, P. M., Wood, C. J., & Riffat, S. B. (2014). Toward aerogel based thermal superinsulation in buildings: A comprehensive review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 34, 273-299. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.03.017>

- Cuce, P. M., & Cuce, E. (2025). Ventilated Facades for Low-Carbon Buildings: A Review. *Processes*, 13(7), 2275. <https://doi.org/10.3390/pr13072275>
- Członka, S., Bertino, M. F., Kośny, J., & Shukla, N. (2018). Freeze-drying method as a new approach to the synthesis of polyurea aerogels from isocyanate and water. *Journal of Sol-Gel Science and Technology*, 87(3), 685-695. <https://doi.org/10.1007/s10971-018-4769-9>
- Davraz, M., Koru, M., & Isildar, N. (2025). Design of Perlite Based Thermal Insulation Plate and Determination of its Physical, Mechanical and Thermal Properties. *International Journal of Thermophysics*, 46(3), 31. <https://doi.org/10.1007/s10765-025-03503-x>
- De Pooter, S., Latré, S., Desplentere, F., & Seveno, D. (2018). Optimized synthesis of ambient pressure dried thermal insulating silica aerogel powder from non-ion exchanged water glass. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 499, 217-226. <https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2018.07.028>
- Dhua, S., Gupta, A. K., & Mishra, P. (2022). Aerogel: Functional Emerging Material for Potential Application in Food: a Review. *Food and Bioprocess Technology*, 15(11), 2396-2421. <https://doi.org/10.1007/s11947-022-02829-w>
- di Filippo, R., Maracchini, G., Albatici, R., Di Maggio, R., & Bursi, O. S. (2025). A novel prescriptive approach for buildings' insulation design considering embodied carbon. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 212. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2025.115369>
- Di Ruocco, G. (2024). Renovation Wave in Europe: Low-Carbon Design for the Refurbishment of Social Housing in Southern Italy. *Buildings*, 14(6), 1535. <https://doi.org/10.3390/buildings14061535>
- Di, Z., Ma, S., Wang, H., Guan, Z., Lian, B., Qiu, Y., & Jiang, Y. (2022). Modulation of Thermal Insulation and Mechanical Property of Silica Aerogel Thermal Insulation Coatings. *Coatings*, 12(10), 1421. <https://doi.org/10.3390/coatings12101421>
- Dicha, H. M., Chaudhary, S., Husain, M. N., & Krishnaraj, R. (2025). Banana fibre-reinforced diatomaceous earth slurry treatment of recycled aggregate for enhanced structural concrete performance. *Scientific Reports*, 15(1), 4717. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-84762-w>
- Do, N. H. N., Tran, H. G., Doan, H. L. X., Pham, N. Q., Le, K. A., & Le, P. K. (2021). Advanced Fabrication of Lightweight Aerogels from Fly Ash for Thermal Insulation. *Science & Technology Development Journal - Engineering and Technology*, 3(4), first. <https://doi.org/10.32508/stdjet.v3i4.786>
- Doke, S. D., Patel, C. M., & Lad, V. N. (2021). Improving physical properties of silica aerogel using compatible additives. *Chemical Papers*, 75(1), 215-225. <https://doi.org/10.1007/s11696-020-01281-4>
- Domljan, I., & Domljan, V. (2024). *Major Challenges in the Construction Industry* (ss. 396-403). [https://doi.org/10.1007/978-3-031-66271-3\\_43](https://doi.org/10.1007/978-3-031-66271-3_43)
- Douk, A. S., Saravani, H., & Farsadrooh, M. (2019). Three-dimensional inorganic polymer of Pd aerogel as a highly active support-less anode catalyst toward formic acid oxidation. *International Journal of Hydrogen Energy*, 44(33), 18028-18037. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.05.084>
- Duong, H. M., Ling, N. R. B., Thai, Q. B., Le, D. K., Nguyen, P. T. T., Goh, X. Y., & Phan-Thien, N. (2021). A novel aerogel from thermal power plant waste for thermal and

- acoustic insulation applications. *Waste Management*, 124, 1-7. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2021.01.031>
- Dzięcioł, J., Szlachetka, O., & Rodrigues Tavares, J. M. (2025). From Volcanic Popcorn to the Material of the Future: A Critical Review of Expanded Perlite Applications and Environmental Impacts. *Sustainability*, 17(4), 1454. <https://doi.org/10.3390/su17041454>
- Eksi, M., Akarsu, R. T., & Ozcan, M. (2025). Net-zero energy building transformation: Techno-economic and environmental evaluation in the Mediterranean Region. *Environment, Development and Sustainability*. <https://doi.org/10.1007/s10668-025-06389-9>
- El-Naggar, M. E., Othman, S. I., Allam, A. A., & Morsy, O. M. (2020). Synthesis, drying process and medical application of polysaccharide-based aerogels. *International Journal of Biological Macromolecules*, 145, 1115-1128. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2019.10.037>
- Erzen, B., Karataş, M., Orhan, R., & Aydoğmuş, E. (2025). Innovative Insulation Materials: A Comprehensive Review of Current Trends, Challenges, and Future Directions in Sustainable Building Technologies. *Polymer-Plastics Technology and Materials*, 64(10), 1538-1561. <https://doi.org/10.1080/25740881.2025.2472378>
- Esposito, S. (2019). “Traditional” Sol-Gel Chemistry as a Powerful Tool for the Preparation of Supported Metal and Metal Oxide Catalysts. *Materials*, 12(4), 668. <https://doi.org/10.3390/ma12040668>
- Fawaier, M., & Bokor, B. (2022). Dynamic insulation systems of building envelopes: A review. *Energy and Buildings*, 270, 112268. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.112268>
- Feng, J., Ma, Z., Wu, J., Zhou, Z., Liu, Z., Hou, B., Zheng, W., Huo, S., Pan, Y. T., Hong, M., Gao, Q., Sun, Z., Wang, H., & Song, P. (2024). Fire-Safe Aerogels and Foams for Thermal Insulation: From Materials to Properties. İçinde *Advanced Materials*. John Wiley and Sons Inc. <https://doi.org/10.1002/adma.202411856>
- Feng, J., Zhang, C., & Feng, J. (2012). Carbon fiber reinforced carbon aerogel composites for thermal insulation prepared by soft reinforcement. *Materials Letters*, 67(1), 266-268. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2011.09.076>
- Fesmire, J. E. (2019). Aerogel-Based Insulation Materials for Cryogenic Applications. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 502, 012188. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/502/1/012188>
- Fijalkowski, M., Ali, A., Qamer, S., Coufal, R., Adach, K., & Petrik, S. (2023). Hybrid and Single-Component Flexible Aerogels for Biomedical Applications: A Review. *Gels*, 10(1), 4. <https://doi.org/10.3390/gels10010004>
- Filonchuk, M., Peterson, M. P., Zhang, L., Hurynovich, V., & He, Y. (2024). Greenhouse gases emissions and global climate change: Examining the influence of CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, and N<sub>2</sub>O. İçinde *Science of the Total Environment* (C. 935). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.173359>
- Firoozi, A. A., Firoozi, A. A., El-Abbasy, A. A., & Aati, K. (2025). Enhanced perspectives on silica aerogels: Novel synthesis methods and emerging engineering applications. İçinde *Results in Engineering* (C. 25). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.103615>

- Formanek, M., Rovigatti, L., Zaccarelli, E., Sciortino, F., & Moreno, A. J. (2021). Gel Formation in Reversibly Cross-Linking Polymers. *Macromolecules*, *54*(14), 6613-6627. <https://doi.org/10.1021/acs.macromol.0c02670>
- Füchsl, S., Rheude, F., & Röder, H. (2022). Life cycle assessment (LCA) of thermal insulation materials: A critical review. *Cleaner Materials*, *5*. <https://doi.org/10.1016/j.clema.2022.100119>
- Gan, G., Li, X., Fan, S., Wang, L., Qin, M., Yin, Z., & Chen, G. (2019). Carbon Aerogels for Environmental Clean-Up. *European Journal of Inorganic Chemistry*, *2019*(27), 3126-3141. <https://doi.org/10.1002/ejic.201801512>
- Ganobjak, M., Brunner, S., Hofmann, J., Klar, V., Ledermann, M., Herzog, V., Kämpfen, B., Kilian, R., Wehdorn, M., & Wernery, J. (2023). Current Trends in Aerogel Use in Heritage Buildings: Case Studies from the Aerogel Architecture Award 2021. *Gels*, *9*(10), 814. <https://doi.org/10.3390/gels9100814>
- Ganobjak, M., Brunner, S., & Wernery, J. (2020). Aerogel materials for heritage buildings: Materials, properties and case studies. *Journal of Cultural Heritage*, *42*, 81-98. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2019.09.007>
- Gao, J., Yan, Z., Ma, S., & Guo, Y. (2024). Novel process for high value utilization of high-alumina fly ash: valuable metals recovery and mesoporous silica *in situ* preparation. *RSC Advances*, *14*(3), 1782-1793. <https://doi.org/10.1039/D3RA06921D>
- Gautam, B., Tsai, T.-H., & Chen, J.-T. (2024). Towards sustainable solutions: A review of polystyrene upcycling and degradation techniques. *Polymer Degradation and Stability*, *225*, 110779. <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2024.110779>
- Ge, H., Liu, G., & Liu, F. (2025). Review on the application of biomass-based aerogels in the field of thermal insulation. *International Journal of Biological Macromolecules*, *140*230. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2025.140230>
- Ghanim, H. A. A. E., Alengaram, U. J., Bunnori, N. M., & Ibrahim, M. S. I. (2025). Innovative in-house sodium silicate derived from coal bottom ash and its impact on geopolymer mortar. *Journal of Building Engineering*, *99*, 111428. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2024.111428>
- Ghazi Wakili, K., & Remhof, A. (2017). Reaction of aerogel containing ceramic fibre insulation to fire exposure. *Fire and Materials*, *41*(1), 29-39. <https://doi.org/10.1002/fam.2367>
- Ghazwani, K., Beach, T., & Rezugui, Y. (2025). Energy retrofitting using advanced building envelope materials for sustainable housing: A review. *Çinde Building and Environment* (C. 267). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2024.112243>
- Gorur Avsaroglu, E. B. (2025). Investigation of Hollow Block Production by Substituting Chicken Feather, Cotton and Rock Wool Waste Fibers for Pumice Aggregate. *Buildings*, *15*(15), 2587. <https://doi.org/10.3390/buildings15152587>
- Goryunova, K., Gahramanli, Y., & Gurbanova, R. (2023). Adsorption properties of silica aerogel-based materials. *RSC Advances*, *13*(27), 18207-18216. <https://doi.org/10.1039/D3RA02462H>
- Goryunova, K. I., & Gahramanli, Y. N. (2024). Insulating materials based on silica aerogel composites: synthesis, properties and application. *Çinde RSC Advances* (C. 14, Sayı 47, ss. 34690-34707). Royal Society of Chemistry. <https://doi.org/10.1039/d4ra04976d>

- Grabias-Blicharz, E., & Franus, W. (2023). A critical review on mechanochemical processing of fly ash and fly ash-derived materials. *Science of the Total Environment*, 860(September 2022), 160529. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.160529>
- Gu, P., Lu, L., Yang, X., Hu, Z., Zhang, X., Sun, Z., Liang, X., Liu, M., Sun, Q., Huang, J., & Zu, G. (2024). Highly Stretchable Semiconducting Aerogel Films for High-Performance Flexible Electronics. *Advanced Functional Materials*, 34(33). <https://doi.org/10.1002/adfm.202400589>
- Guo, T., Mashhadimoslem, H., Choopani, L., Salehi, M. M., Maleki, A., Elkamel, A., Yu, A., Zhang, Q., Song, J., Jin, Y., & Rojas, O. J. (2024). Recent Progress in MOF-Aerogel Fabrication and Applications. *Small*, 20(43). <https://doi.org/10.1002/sml.202402942>
- Guo, Y., Ruan, K., Shi, X., Yang, X., & Gu, J. (2020). Factors affecting thermal conductivities of the polymers and polymer composites: A review. *Composites Science and Technology*, 193, 108134. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2020.108134>
- Gupta, V., & Deb, C. (2023). Envelope design for low-energy buildings in the tropics: A review. *Çinde Renewable and Sustainable Energy Reviews* (C. 186). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113650>
- Gurav, J. L., Jung, I.-K., Park, H.-H., Kang, E. S., & Nadargi, D. Y. (2010). Silica Aerogel: Synthesis and Applications. *Journal of Nanomaterials*, 2010(1). <https://doi.org/10.1155/2010/409310>
- Haberl, J., & Schuster, M. (2019). Solubility of elements in waste incineration fly ash and bottom ash under various leaching conditions studied by a sequential extraction procedure. *Waste Management*, 87, 268-278. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.02.001>
- Hæreid, S., Dahle, M., Lima, S., & Einarsrud, M.-A. (1995). Preparation and properties of monolithic silica xerogels from TEOS-based alcogels aged in silane solutions. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 186, 96-103. [https://doi.org/10.1016/0022-3093\(95\)00039-9](https://doi.org/10.1016/0022-3093(95)00039-9)
- Hagenau, M., & Jradi, M. (2020). Dynamic modeling and performance evaluation of building envelope enhanced with phase change material under Danish conditions. *Journal of Energy Storage*, 30, 101536. <https://doi.org/10.1016/j.est.2020.101536>
- Ham, H. J., Lee, S., & Kim, H.-J. (2024). The Impact of Residential Building Insulation Standards on Indoor Thermal Environments and Heat-Related Illness Risks During Heatwaves: A Case Study in Korea. *Sustainability*, 16(22), 9831. <https://doi.org/10.3390/su16229831>
- Hanh, P. T. H., Suwunwong, T., Chantrapromma, S., Choto, P., Thanomsilp, C., & Phoungthong, K. (2024). Preparation and characterization of polyvinyl alcohol (PVA)-glycerol composite films incorporating nanosilica from municipal solid waste incinerator bottom ash. *Heliyon*, 10(4), e25963. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e25963>
- Hardiane, E. R., Purba, G. E. M., & Dahliyanti, A. (2023). Transparency and Thermal Stability of Silica Aerogel Synthesized From Sodium Silicate Using Ambient Pressure Drying. *Journal of Emerging Supply Chain, Clean Energy, and Process Engineering*, 2(2), 125-130. <https://doi.org/10.57102/jescee.v2i2.68>
- Hardianto, R., Setiono, & Handayani, F. (2025). Greenhouse Gas Emission Analysis Using the Life Cycle Assessment Method for the CO2 Compressor Machine Foundation at

- PT Kaltim Methanol Industri. *Sustainable Civil Building Management and Engineering Journal*, 2(1), 10. <https://doi.org/10.47134/scbmej.v2i1.3580>
- Hasanpour, M., Hatami, M., & Afsari, B. (2024). Natural polymer gels, hydrogels, and aerogels for absorbent applications. *Çinde Engineering of Natural Polymeric Gels and Aerogels for Multifunctional Applications* (ss. 159-204). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-823135-7.00005-X>
- Hassani, A. R., Domenighini, P., Belloni, E., Ihara, T., & Buratti, C. (2022). Evaluation of the solar heat gain coefficient of innovative aerogel glazing systems: Experimental campaigns and numerical results. *Journal of Building Engineering*, 62, 105354. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2022.105354>
- He, F., Qi, Z., Zhen, W., Wu, J., Huang, Y., Xiong, X., & Zhang, R. (2019). Thermal Conductivity of Silica Aerogel Thermal Insulation Coatings. *International Journal of Thermophysics*, 40(10), 92. <https://doi.org/10.1007/s10765-019-2565-6>
- He, J., Ma, C., Yang, J., Zou, X., Sun, B., Sun, Y., & Wang, C. (2023). Transparent ultrathin SiO<sub>2</sub> nanowire aerogel displaying novel properties when interacting with water: A promising versatile functional platform. *Fundamental Research*, 3(1), 118-125. <https://doi.org/10.1016/j.fmre.2022.01.019>
- He, P., Gao, X., Li, X., Jiang, Z., Yang, Z., Wang, C., & Gu, Z. (2014). Highly transparent silica aerogel thick films with hierarchical porosity from water glass via ambient pressure drying. *Materials Chemistry and Physics*, 147(1-2), 65-74. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2014.04.007>
- Henry, M., & Merlis, T. M. (2019). The Role of the Nonlinearity of the Stefan–Boltzmann Law on the Structure of Radiatively Forced Temperature Change. *Journal of Climate*, 32(2), 335-348. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-17-0603.1>
- Hernández-Contreras, M., Cruz, J. C., Gurrola, M. P., Pamplona Solis, B., & Vega-Azamar, R. E. (2024). Application of nanosilica in the construction industry: A bibliometric analysis using Methodi Ordinatio. *MethodsX*, 12, 102642. <https://doi.org/10.1016/j.mex.2024.102642>
- Hill, C., Norton, A., & Dibdiakova, J. (2018). A comparison of the environmental impacts of different categories of insulation materials. *Energy and Buildings*, 162, 12-20. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.12.009>
- Hofmeister, A. M. (2024). Theory and Measurement of Heat Transport in Solids: How Rigidity and Spectral Properties Govern Behavior. *Materials*, 17(18), 4469. <https://doi.org/10.3390/ma17184469>
- Hossain, J., Kadir, Aida. F. A., Hanafi, Ainain. N., Shareef, H., Khatib, T., Baharin, Kyairul. A., & Sulaima, Mohamad. F. (2023). A Review on Optimal Energy Management in Commercial Buildings. *Energies*, 16(4), 1609. <https://doi.org/10.3390/en16041609>
- Hu, P., Wu, F., Ma, B., Luo, J., Zhang, P., Tian, Z., Wang, J., & Sun, Z. (2024). Robust and Flame-Retardant Zylon Aerogel Fibers for Wearable Thermal Insulation and Sensing in Harsh Environment. *Advanced Materials*, 36(6). <https://doi.org/10.1002/adma.202310023>
- Hu, X., Liu, L., & Wang, J. (2025). Silica aerogels as functional units for shapeable thermal management materials: Synthesis, mechanisms, and emerging applications. *Chemical Engineering Journal*, 522, 167640. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2025.167640>

- Hu, Z., Zheng, S., Tan, Y., & Jia, M. (2017). Preparation and characterization of diatomite/silica composite humidity control material by partial alkali dissolution. *Materials Letters*, *196*, 234-237. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2017.03.056>
- Hung Anh, L. D., & Pásztor, Z. (2021). An overview of factors influencing thermal conductivity of building insulation materials. *Journal of Building Engineering*, *44*, 102604. <https://doi.org/10.1016/j.job.2021.102604>
- Huo, B., Jiang, D., Cao, X., Liang, H., Liu, Z., Li, C., & Liu, J. (2019). N-doped graphene /carbon hybrid aerogels for efficient solar steam generation. *Carbon*, *142*, 13-19. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2018.10.008>
- Huo, D., Zhao, J., Zhao, Z., & Zeng, X. (2025). A comprehensive life cycle cost model for high-temperature pipe insulation: balancing heat dissipation, temperature resistance and economic benefits. *Case Studies in Thermal Engineering*, *73*, 106492. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2025.106492>
- Ijjada, N., & Nayaka, R. R. (2022). Review on properties of some thermal insulating materials providing more comfort in the building. *Materials Today: Proceedings*, *58*, 1354-1359. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.02.230>
- Innocenzi, P. (2019). *The Sol-to-Gel Transition*. Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-20030-5>
- Iswar, S., Galmarini, S., Bonanomi, L., Wernery, J., Roumeli, E., Nimalshantha, S., Ben Ishai, A. M., Lattuada, M., Koebel, M. M., & Malfait, W. J. (2021). Dense and strong, but superinsulating silica aerogel. *Acta Materialia*, *213*, 116959. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2021.116959>
- Iswar, S., Malfait, W. J., Balog, S., Winnefeld, F., Lattuada, M., & Koebel, M. M. (2017). Effect of aging on silica aerogel properties. *Microporous and Mesoporous Materials*, *241*, 293-302. <https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2016.11.037>
- Iswar, S., Snellings, G. M. B. F., Zhao, S., Erni, R., Bahk, Y. K., Wang, J., Lattuada, M., Koebel, M. M., & Malfait, W. J. (2018). Reinforced and superinsulating silica aerogel through in situ cross-linking with silane terminated prepolymers. *Acta Materialia*, *147*, 322-328. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2018.01.031>
- İmert, H., & Fitoz, İ. (2025). SÜRDÜRÜLEBİLİR VE EKOLOJİK MEKÂN TASARIMI BİLİNCİNİN GELİŞTİRİLMESİNE YÖNELİK BİR STÜDYO DENEYİMİ. *Anadolu Üniversitesi Sanat & Tasarım Dergisi*, *15*(1), 587-607. <https://doi.org/10.20488/sanattasarim.1718038>
- İpek, Ö., & İpek, E. (2022). Determinants of energy demand for residential space heating in Turkey. *Renewable Energy*, *194*, 1026-1033. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.05.158>
- J. Silvestre, A. Castelo, J. Silva, J. Brito, & M. Pinheiro. (2022). Reabilitação energética da envolvente de edifícios: desempenho económico, energético e ambiental de ETICS com ICB ou EPS. *Engenharia Civil UM*, (62), 18-32. <https://doi.org/10.21814/ecum.4486>
- Jahed, F. S., Hamidi, S., Zamani-Kalajahi, M., & Siahi-Shadbad, M. (2023). Biomedical applications of silica-based aerogels: a comprehensive review. *Macromolecular Research*, *31*(6), 519-538. <https://doi.org/10.1007/s13233-023-00142-9>
- Jalali, M. S., Kumar, S., Madani, M., & Nian-Feng Tzeng. (2013). Microhotplates for low power, and ultra dense gaseous sensor arrays using recessed silica aerogel for heat

- insulation. *2013 IEEE Sensors Applications Symposium Proceedings*, 133-136. <https://doi.org/10.1109/SAS.2013.6493572>
- Jensen, P. G., Belmonte, L., Solvang, M., & Yue, Y. (2023). Quantification of high temperature stability of mineral wool for fire-safe insulation. *Journal of Non-Crystalline Solids*, *622*, 122680. <https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2023.122680>
- Jin, C., Xu, C., & Xu, W. (2025). Integrating 3D-printed clay formwork into thin-vaulted green roof. *Architectural Intelligence*, *4*(1), 8. <https://doi.org/10.1007/s44223-025-00088-1>
- Jin, H.-Q., Yao, X.-L., Fan, L.-W., Xu, X., & Yu, Z.-T. (2016). Experimental determination and fractal modeling of the effective thermal conductivity of autoclaved aerated concrete: Effects of moisture content. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, *92*, 589-602. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2015.08.103>
- Jose, J. P., & Joseph, K. (2012). Advances in Polymer Composites: Macro- and Microcomposites – State of the Art, New Challenges, and Opportunities. İçinde *Polymer Composites* (ss. 1-16). Wiley. <https://doi.org/10.1002/9783527645213.ch1>
- Josefsson, P., Henriksson, G., & Wågberg, L. (2008). The Physical Action of Cellulases Revealed by a Quartz Crystal Microbalance Study Using Ultrathin Cellulose Films and Pure Cellulases. *Biomacromolecules*, *9*(1), 249-254. <https://doi.org/10.1021/bm700980b>
- Júlio, M. de F., Soares, A., Ilharco, L. M., Flores-Colen, I., & de Brito, J. (2016). Silica-based aerogels as aggregates for cement-based thermal renders. *Cement and Concrete Composites*, *72*, 309-318. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2016.06.013>
- Kang, D., Jia, S., Zhao, C., Ni, Y., Qi, J., Kang, Z., Sui, Y., Wei, F., Xiao, B., & Meng, Q. (2024). High-temperature resistance performance of silica aerogel composites through fiber reinforcement. *Ceramics International*, *50*(15), 26829-26838. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2024.04.411>
- Kang, J. W., Kim, J. M., Kim, M. S., Kim, Y. H., Kim, W. N., Jang, W., & Shin, D. S. (2009). Effects of nucleating agents on the morphological, mechanical and thermal insulating properties of rigid polyurethane foams. *Macromolecular Research*, *17*(11), 856-862. <https://doi.org/10.1007/BF03218626>
- Karamanos, A., Hadiarakou, S., & Papadopoulos, A. M. (2008). The impact of temperature and moisture on the thermal performance of stone wool. *Energy and Buildings*, *40*(8), 1402-1411. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2008.01.004>
- Karamikamkar, S., Naguib, H. E., & Park, C. B. (2020). Advances in precursor system for silica-based aerogel production toward improved mechanical properties, customized morphology, and multifunctionality: A review. *Advances in Colloid and Interface Science*, *276*, 102101. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2020.102101>
- Kashiwagi, T., Mu, M., Winey, K., Cipriano, B., Raghavan, S. R., Pack, S., Rafailovich, M., Yang, Y., Grulke, E., Shields, J., Harris, R., & Douglas, J. (2008). Relation between the viscoelastic and flammability properties of polymer nanocomposites. *Polymer*, *49*(20), 4358-4368. <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2008.07.054>
- Kim, J.-H., Kim, S.-M., & Kim, J.-T. (2024). Comparison of Thermal Conductivity and Long-Term Change of Building Insulation Materials According to Accelerated Laboratory Test Methods of ISO 11561 and EN 13166 Standard. *Energies*, *17*(23), 6105. <https://doi.org/10.3390/en17236105>

- Kim, M.-Y., Kim, H.-G., Kim, J.-S., & Hong, G. (2022). Investigation of Thermal and Energy Performance of the Thermal Bridge Breaker for Reinforced Concrete Residential Buildings. *Energies*, *15*(8), 2854. <https://doi.org/10.3390/en15082854>
- Kim, Y. U., Yang, S., & Kim, S. (2024). Thermal characteristics of cementitious building materials with carbon and PCM for improved heat storage performance. *Construction and Building Materials*, *449*, 138550. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.138550>
- Klemczak, B., Kucharczyk-Brus, B., Sulimowska, A., & Radziejewicz-Winnicki, R. (2024). Historical Evolution and Current Developments in Building Thermal Insulation Materials—A Review. *Energies*, *17*(22), 5535. <https://doi.org/10.3390/en17225535>
- Koru, M. (2016). Determination of Thermal Conductivity of Closed-Cell Insulation Materials That Depend on Temperature and Density. *Arabian Journal for Science and Engineering*, *41*(11), 4337-4346. <https://doi.org/10.1007/s13369-016-2122-6>
- Kośny, J., Miller, W. A., Yarbrough, D., Kossecka, E., & Biswas, K. (2020). Application of Phase Change Materials and Conventional Thermal Mass for Control of Roof-Generated Cooling Loads. *Applied Sciences*, *10*(19), 6875. <https://doi.org/10.3390/app10196875>
- Kozub, B. (2024). Mineral wool: composites and applications. İçinde *Synthetic and Mineral Fibers, Their Composites and Applications* (ss. 321-336). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-13623-8.00011-3>
- Köse, E., & Kutlu Kaynar, S. (2025). Energy Demand Forecasting and Policy Development in Turkey. *Energies*, *18*(13), 3301. <https://doi.org/10.3390/en18133301>
- Kuczyński, T., Staszczuk, A., & Gortych, M. (2025). Comparison of heavy building envelopes and PCM: Impact on indoor temperature peaks and cooling energy use during heat events. *Energy*, *325*, 136213. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2025.136213>
- Kumar, D., Alam, M., Memon, R. A., & Bhayo, B. A. (2022). A critical review for formulation and conceptualization of an ideal building envelope and novel sustainability framework for building applications. *Cleaner Engineering and Technology*, *11*, 100555. <https://doi.org/10.1016/j.clet.2022.100555>
- Kumar, D., Alam, M., & Sanjayan, J. G. (2021). Retrofitting building envelope using phase change materials and aerogel render for adaptation to extreme heatwave: A multi-objective analysis considering heat stress, energy, environment, and cost. *Sustainability (Switzerland)*, *13*(19). <https://doi.org/10.3390/su131910716>
- Kumar, D., Alam, M., Zou, P. X. W., Sanjayan, J. G., & Memon, R. A. (2020). Comparative analysis of building insulation material properties and performance. İçinde *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (C. 131). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110038>
- Kytinou, V. K., Metaxa, Z. S., Zapris, A. G., Kosheleva, R. I., Prokopiou, V. D., & Alexopoulos, N. D. (2024). Exploitation of extruded polystyrene (XPS) waste for lightweight, thermal insulation and rehabilitation building applications. *Developments in the Built Environment*, *20*, 100580. <https://doi.org/10.1016/j.dibe.2024.100580>
- Lafond, C., & Blanchet, P. (2020). Technical Performance Overview of Bio-Based Insulation Materials Compared to Expanded Polystyrene. *Buildings*, *10*(5), 81. <https://doi.org/10.3390/buildings10050081>

- Lakatos, Á. (2023). Thermal insulation capability of nanostructured insulations and their combination as hybrid insulation systems. *Case Studies in Thermal Engineering*, 41. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2022.102630>
- Lakreb, N., Knapic, S., Machado, J. S., Bezzazi, B., & Pereira, H. (2018). Properties of multilayered sandwich panels with an agglomerated cork core for interior applications in buildings. *European Journal of Wood and Wood Products*, 76(1), 143-153. <https://doi.org/10.1007/s00107-017-1198-3>
- Lakreb, N., Şen, U., Toussaint, E., Amziane, S., Djakab, E., & Pereira, H. (2023). Physical properties and thermal conductivity of cork-based sandwich panels for building insulation. *Construction and Building Materials*, 368, 130420. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.130420>
- Lamy-Mendes, A., Pontinha, A. D. R., Alves, P., Santos, P., & Durães, L. (2021). Progress in silica aerogel-containing materials for buildings' thermal insulation. *Construction and Building Materials*, 286. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122815>
- Laseter, T. M., Heckel, K., & Huang, A. (2017). Competitive-Cost Analysis: Cost-Driver Framework. *SSRN Electronic Journal*. <https://doi.org/10.2139/ssrn.2974924>
- Latifi, N., Marto, A., Rashid, A. S. A., & Yii, J. L. J. (2015). Strength and Physico-chemical Characteristics of Fly Ash–Bottom Ash Mixture. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 40(9), 2447-2455. <https://doi.org/10.1007/s13369-015-1647-4>
- Lázár, I., & Fábrián, I. (2016). A Continuous Extraction and Pumpless Supercritical CO<sub>2</sub> Drying System for Laboratory-Scale Aerogel Production. *Gels*, 2(4), 26. <https://doi.org/10.3390/gels2040026>
- Le, C. T., Truong, T. Q., Nguyen, D. P. T., Bui, N. T. K., Goh, X. Y., Huynh, H. K. P., Nguyen, A. T., Phan, A. N., Ngo, T. M., & Nguyen, S. T. (2024). Advanced aerogels from waste tires and coal ash for thermal and acoustic insulation applications- insights into the effect of synthesis conditions and precursors contents on aerogel characteristics. *Journal of Porous Materials*, 31(1), 335-350. <https://doi.org/10.1007/s10934-023-01517-0>
- Lee, O.-J., Lee, K.-H., Jin Yim, T., Young Kim, S., & Yoo, K.-P. (2002). Determination of mesopore size of aerogels from thermal conductivity measurements. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 298(2-3), 287-292. [https://doi.org/10.1016/S0022-3093\(01\)01041-9](https://doi.org/10.1016/S0022-3093(01)01041-9)
- Leichter, M., & Piccardo, C. (2024). Assessing life cycle sustainability of building renovation and reconstruction: A comprehensive review of case studies and methods. *Building and Environment*, 262, 111817. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2024.111817>
- Leo Samuel, D. G., Dharmasastha, K., Shiva Nagendra, S. M., & Maiya, M. P. (2017). Thermal comfort in traditional buildings composed of local and modern construction materials. *International Journal of Sustainable Built Environment*, 6(2), 463-475. <https://doi.org/10.1016/j.ijjsbe.2017.08.001>
- Lewandowski, K. (2025). Modern Energy Sources for Sustainable Buildings: Innovations and Energy Efficiency in Green Construction. *Energies*, 18(5), 1121. <https://doi.org/10.3390/en18051121>
- Li, B., Chen, M., Wu, Y., Liu, B., & Huang, G. (2024). Effects of glycerol and PVA on gelatin/Gum Arabic aerogels: Microstructure, mechanical properties, and applications

- for food monitoring. *Food Hydrocolloids*, 149, 109515. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2023.109515>
- Li, C., Chen, Z., Dong, W., Lin, L., Zhu, X., Liu, Q., Zhang, Y., Zhai, N., Zhou, Z., Wang, Y., Chen, B., Ji, Y., Chen, X., Xu, X., Yang, Y., & Zhang, H. (2021). A review of silicon-based aerogel thermal insulation materials: Performance optimization through composition and microstructure. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 553, 120517. <https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2020.120517>
- Li, D., Ma, Y., Zhang, S., Yang, R., Zhang, C., & Liu, C. (2022). Photothermal and energy performance of an innovative roof based on silica aerogel-PCM glazing systems. *Energy Conversion and Management*, 262, 115567. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.115567>
- Li, H., An, J., Wang, C., & Yan, D. (2025). Simulation analysis on synergistic energy-saving effect of building envelope insulation and radiative cooling technology. *Energy and Buildings*, 339, 115759. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2025.115759>
- Li, L., Jiang, X., Huang, K., & Xiang, X. (2025). Carboxymethyl Cellulose Composite Aerogel Loaded With Silica Aerogel for Flexible Thermal Insulation Materials. *Polymer Engineering & Science*, 65(10), 5482-5490. <https://doi.org/10.1002/pen.70080>
- Li, M., & Lin, Z. (2021). Numerical study of the feasibility of coupling vacuum isolation panels with phase change material for enhanced energy-efficient buildings. *Energy and Buildings*, 251, 111369. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111369>
- Li, P., Wu, H., Liu, Y., Yang, J., Fang, Z., & Lin, B. (2019). Preparation and optimization of ultra-light and thermal insulative aerogel foam concrete. *Construction and Building Materials*, 205, 529-542. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.01.212>
- Li, X., Xu, Y., An, X. yu, Gong, L., Wang, R., & Liu, Z. ming. (2025). Eco-friendly and efficient flame retardant rigid polyurethane foam reinforced with lignin and silica aerogel. *International Journal of Biological Macromolecules*, 304. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2025.140947>
- Li, Z., Nabhai, A., Wasson, O. C., Mainardi, I. S., Wang, J., Springstead, J., Wu, Q., & Li, J. (2025). Transformation from Hydrogels to Nanostructured Aerogels: Review and Future Perspectives. *ACS Applied Nano Materials*, 8(28), 13954-13974. <https://doi.org/10.1021/acsanm.5c02544>
- Liang, Y., Ding, Y., Liu, Y., Yang, J., & Zhang, H. (2020). Modeling Microstructure Effect on Thermal Conductivity of Aerogel-Based Vacuum Insulation Panels. *Heat Transfer Engineering*, 41(9-10), 882-895. <https://doi.org/10.1080/01457632.2019.1576443>
- Lin, H., Shen, Q., Ma, M., Ji, R., Guo, H., Qi, H., Xing, W., & Tang, H. (2024). 3D Printing of Porous Ceramics for Enhanced Thermal Insulation Properties. *Advanced Science*. John Wiley and Sons Inc. <https://doi.org/10.1002/advs.202412554>
- Lin, J. (2018). The Pay As You Save program in rural Arkansas: An opportunity for rural distribution cooperative profits. *The Electricity Journal*, 31(6), 33-39. <https://doi.org/10.1016/j.tej.2018.07.001>
- Lindstad, E., Ask, T. Ø., Cariou, P., Eskeland, G. S., & Riialand, A. (2023). Wise use of renewable energy in transport. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 119, 103713. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2023.103713>
- Linhares, T., Pessoa de Amorim, M. T., & Durães, L. (2019). Silica aerogel composites with embedded fibres: a review on their preparation, properties and applications.

- Lisowski, P., & Glinicki, M. A. (2023). Promising biomass waste-derived insulation materials for application in construction and buildings. *Çinde Biomass Conversion and Biorefinery*. Springer Science and Business Media Deutschland GmbH. <https://doi.org/10.1007/s13399-023-05192-8>
- Liszkowska, J., Stepczyńska, M., Trafarski, A., Miłek, J., & Karasiewicz, T. (2025). Utilization of Coniferous and Deciduous Tree and Paper Ashes as Fillers of Rigid Polyurethane/Polyisocyanurate (PU/PIR) Foams. *Materials*, 18(5), 1165. <https://doi.org/10.3390/ma18051165>
- Liu, G., Zhou, B., Ni, X., Shen, J., Wu, G., Du, A., & Zu, G. (2012). Influence of thermal process on microstructural and physical properties of ambient pressure dried hydrophobic silica aerogel monoliths. *Journal of Sol-Gel Science and Technology*, 62(2), 126-133. <https://doi.org/10.1007/s10971-012-2694-x>
- Liu, H., & Zhao, X. (2022). Thermal Conductivity Analysis of High Porosity Structures with Open and Closed Pores. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 183, 122089. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.122089>
- Liu, J., Buahom, P., Lu, C., Yu, H., & Park, C. B. (2022). Microscopic revelation of the solid-gas coupling and Knudsen effect on the thermal conductivity of silica aerogel with inter-connected pores. *Scientific Reports*, 12(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-022-24133-5>
- Liu, P., Gong, Y. F., Tian, G. H., & Miao, Z. K. (2021). Preparation and experimental study on the thermal characteristics of lightweight prefabricated nano-silica aerogel foam concrete wallboards. *Construction and Building Materials*, 272, 121895. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121895>
- Liu, S., Zhu, K., Cui, S., Shen, X., & Tan, G. (2018). A novel building material with low thermal conductivity: Rapid synthesis of foam concrete reinforced silica aerogel and energy performance simulation. *Energy and Buildings*, 177, 385-393. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.08.014>
- Liu, Y. L., Yang, D. G., Wang, D. H., & Liu, X. (2023). Research on Thermal and Heat Insulation Properties of Aerogel Heat-Insulating Reflective Coatings. *Applied Sciences (Switzerland)*, 13(17). <https://doi.org/10.3390/app13179700>
- Liu, Y.-W., Nong, Z.-S., Man, T.-N., Lu, S.-W., & Dong, L.-H. (2024). SiO<sub>2</sub> aerogel coating with organic montmorillonite compounded with flame retardants: A strategy for design of a multifunctional thermal barrier coating. *Journal of Materials Research and Technology*, 30, 318-331. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2024.03.083>
- Liu, Z., Ding, Y., Wang, F., & Deng, Z. (2016). Thermal insulation material based on SiO<sub>2</sub> aerogel. *Construction and Building Materials*, 122, 548-555. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.06.096>
- Liu, Z., Jin, X., Zhang, Y., & Jiang, J. (2023). Numerical simulation of the effective thermal conductivity of cement-based composites: Microscopic insights into diatomite/silica aerogel. *Materials and Design*, 233. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2023.112281>
- Liu, Z., Liu, T., Dong, H., Yang, B., Li, X., Li, X., Wu, Y., & Xu, K. (2025). Diatom-Inspired Nanoscale Heterogeneous Assembly Strategy for Constructing Thermal Insulating Wood-Based Aerogels with Exceptional Strength, Resilience,

- Degradability, and Flame Retardancy. *ACS Nano*.  
<https://doi.org/10.1021/acsnano.4c11549>
- Liu, Z., Zhang, Z., Zhang, S., Zhang, Y., Yuan, Z., Li, H., & Jiang, J. (2022). Microstructure and performance characterization of thermal-insulating and water-resistive aerogel incorporated cement-based materials. *Cement and Concrete Composites*, 130. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2022.104535>
- Lou, C., Zhai, C., Li, L., Shang, Y., Li, X., & Li, D. (2025). Thermal insulation design for superheated steam pipeline transport: Balancing technical and economic factors for optimal performance. *Applied Thermal Engineering*, 269, 126134. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2025.126134>
- Lou, F., Dong, S., Zhu, K., Chen, X., & Ma, Y. (2023). Thermal Insulation Performance of Aerogel Nano-Porous Materials: Characterization and Test Methods. *Gels*, 9(3), 220. <https://doi.org/10.3390/gels9030220>
- Lozinsky, C. H., Casquero-Modrego, N., & Walker, I. S. (2025). The health and indoor environmental quality impacts of residential building envelope retrofits: A literature review. *Içinde Building and Environment* (C. 270). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2025.112568>
- Lu, L., Wang, H., Yun, S., Hu, J., & Wang, M. (2024). A state-of-the-art review of novel aerogel insulation materials for building exterior walls. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization and Environmental Effects*, 46(1), 16231-16252. <https://doi.org/10.1080/15567036.2024.2424915>
- Luo, X., He, L., Sun, L., Chen, X., Liu, L., Yao, J., & Cai, Y. (2025). Gas-solid dual barrier strategy to efficiently enhance flame-retardancy and smoke-suppression of cellulose aerogel. *Carbohydrate Polymers*, 368, 124266. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2025.124266>
- Ma, B., Cheng, Y., Hu, P., Fang, D., & Wang, J. (2023). Passive Daytime Radiative Cooling of Silica Aerogels. *Nanomaterials*, 13(3), 467. <https://doi.org/10.3390/nano13030467>
- Ma, H., Zheng, X., Luo, X., Yi, Y., & Yang, F. (2018). Simulation and analysis of mechanical properties of silica aerogels: From rationalization to prediction. *Materials*, 11(2). <https://doi.org/10.3390/ma11020214>
- Ma, S., Li, H., Fei, J., & Huang, Q. (2024). Robust micro-nano hybrid aerogel derived from waste resources for thermal management and high-efficiency adsorption. *Chemical Engineering Journal*, 486, 150223. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2024.150223>
- Mazrouei-Sebdani, Z., Begum, H., Schoenwald, S., Horoshenkov, K. V., & Malfait, W. J. (2021). A review on silica aerogel-based materials for acoustic applications. *Içinde Journal of Non-Crystalline Solids* (C. 562). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2021.120770>
- Mazur, K. E., Wardal, W. J., Barwicki, J., & Tseyko, M. (2025). Thermal Insulation of Agricultural Buildings Using Different Biomass Materials. *Energies*, 18(3), 636. <https://doi.org/10.3390/en18030636>
- Mekonnen, B. T., Ding, W., Liu, H., Guo, S., Pang, X., Ding, Z., & Seid, M. H. (2021). Preparation of aerogel and its application progress in coatings: a mini overview. *Journal of Leather Science and Engineering*, 3(1), 25. <https://doi.org/10.1186/s42825-021-00067-y>

- Mekuye, B., & Abera, B. (2023a). Nanomaterials: An overview of synthesis, classification, characterization, and applications. *Nano Select*, 4(8), 486-501. <https://doi.org/10.1002/nano.202300038>
- Mekuye, B., & Abera, B. (2023b). Nanomaterials: An overview of synthesis, classification, characterization, and applications. *Nano Select*, 4(8), 486-501. <https://doi.org/10.1002/nano.202300038>
- Meng, C., & Yuan, H. (2021). Examination on aerogel based on the heat transfer characteristics of nanotechnology. *Ferroelectrics*, 580(1), 26-41. <https://doi.org/10.1080/00150193.2021.1905719>
- Merillas, B., Lamy-Mendes, A., Villafañe, F., Durães, L., & Rodríguez-Pérez, M. Á. (2022). Silica-Based Aerogel Composites Reinforced with Reticulated Polyurethane Foams: Thermal and Mechanical Properties. *Gels*, 8(7), 392. <https://doi.org/10.3390/gels8070392>
- Merillas, B., Villafañe, F., & Rodríguez-Pérez, M. Á. (2022). Super-Insulating Transparent Polyisocyanurate-Polyurethane Aerogels: Analysis of Thermal Conductivity and Mechanical Properties. *Nanomaterials*, 12(14), 2409. <https://doi.org/10.3390/nano12142409>
- Merli, F., Anderson, A. M., Carroll, M. K., & Buratti, C. (2018). Acoustic measurements on monolithic aerogel samples and application of the selected solutions to standard window systems. *Applied Acoustics*, 142, 123-131. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2018.08.008>
- Meti, P., Mahadik, D. B., Lee, K.-Y., Wang, Q., Kanamori, K., Gong, Y.-D., & Park, H.-H. (2022). Overview of organic–inorganic hybrid silica aerogels: Progress and perspectives. *Materials & Design*, 222, 111091. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2022.111091>
- Mihlayanlar, E., & Meral, S. (2023). Mevcut Binalarda Enerji Verimli Yenileme ve EKB Uygulaması. *Kırklareli Üniversitesi Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi*, 9(2), 478-497. <https://doi.org/10.34186/klujes.1379762>
- Miao, C., Liang, L., Zhang, F., Chen, S., Shang, K., Jiang, J., Zhang, Y., & Ouyang, J. (2022). Review of the fabrication and application of porous materials from silicon-rich industrial solid waste. İçinde *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials* (C. 29, Sayı 3, ss. 424-438). University of Science and Technology Beijing. <https://doi.org/10.1007/s12613-021-2360-9>
- Michalak, J., Czernik, S., Marcinek, M., & Michałowski, B. (2020). Environmental burdens of External Thermal Insulation Systems. Expanded Polystyrene vs. Mineral Wool: Case Study from Poland. *Sustainability*, 12(11), 4532. <https://doi.org/10.3390/su12114532>
- Mika, Ł., Radomska, E., Sztékler, K., Gołdasz, A., & Zima, W. (2025). Review of Selected PCMs and Their Applications in the Industry and Energy Sector. *Energies*, 18(5), 1233. <https://doi.org/10.3390/en18051233>
- Miracco, G., Nicoletti, F., & Arcuri, N. (2025). Adaptive thermal insulation for energy-efficient buildings: Design and analysis of an innovative thermal switch panel with variable transmittance. *Energy*, 334, 137623. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2025.137623>
- Mo, Y., Hong, X., Huang, T., Chen, M., & Guo, Z. (2025). An environmentally friendly hydrophobic composite aerogel based on pineapple straw for oil-water separation,

- thermal insulation and flame retardancy. *Chemical Engineering Journal*, 521, 167051. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2025.167051>
- Mollo, L. G., & Chomey, T. (2025). An Analysis of Barriers to the Implementation of Energy-Efficient Technologies in Residential Buildings: A Quantitative Approach. *Buildings*, 15(19), 3520. <https://doi.org/10.3390/buildings15193520>
- Moura, B., Ramos da Silva, T., Soares, N., & Monteiro, H. (2025). Eco-Efficiency of Concrete Sandwich Panels with Different Insulation Core Materials. *Sustainability*, 17(4), 1687. <https://doi.org/10.3390/su17041687>
- Nasr, Y., El Zakhem, H., Hamami, A., El Bachawati, M., & Belarbi, R. (2023). Comprehensive Review of Innovative Materials for Sustainable Buildings' Energy Performance. *Energies*, 16(21), 7440. <https://doi.org/10.3390/en16217440>
- Nasri, W., Djebali, R., Chamkha, A. J., Bezazi, A., Mechighel, F., Reis, P., & Driss, Z. (2024). Thermal Behavior of Mesoporous Aramid Fiber Reinforced Silica Aerogel Composite for Thermal Insulation Applications: Microscale Modeling. *Journal of Applied and Computational Mechanics*, 10(1), 140-151. <https://doi.org/10.22055/jacm.2023.44601.4247>
- Navas, D., Fuentes, S., Castro-Alvarez, A., & Chavez-Angel, E. (2021). Review on Sol-Gel Synthesis of Perovskite and Oxide Nanomaterials. *Gels*, 7(4), 275. <https://doi.org/10.3390/gels7040275>
- Négrier, M., El Ahmar, E., Sescousse, R., Sauceau, M., & Budtova, T. (2023). Upcycling of textile waste into high added value cellulose porous materials, aerogels and cryogels. *RSC Sustainability*, 1(2), 335-345. <https://doi.org/10.1039/D2SU00084A>
- Ng, S., Sandberg, L. I. C., & Jelle, B. P. (2014). Insulating and Strength Properties of an Aerogel-Incorporated Mortar Based on UHPC Formulations. *Key Engineering Materials*, 629-630, 43-48. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.629-630.43>
- Nguyen, S. T., Huynh, H. K. P., Le, N. T. D., Nguyen, P. T. T., Truong, M. N. T., Le, D. K., Thai, Q. B., Tran, T. D., Ho, D. K., Cao, O. T. H., & Nguyen, M. T. X. (2020). Effects of phenyltrimethoxysilane and polyvinyl alcohol on the properties of methyltrimethoxysilane-based silica aerogels. *Chemical Engineering Transactions*, 78, 313-318. <https://doi.org/10.3303/CET2078053>
- Ni, X., Ke, F., Xiao, M., Wu, K., Kuang, Y., Corke, H., & Jiang, F. (2016). The control of ice crystal growth and effect on porous structure of konjac glucomannan-based aerogels. *International Journal of Biological Macromolecules*, 92, 1130-1135. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2016.08.020>
- Niculescu, A. G., Tudorache, D. I., Bocioagă, M., Mihaiescu, D. E., Hadibarata, T., & Grumezescu, A. M. (2024). An Updated Overview of Silica Aerogel-Based Nanomaterials. *În* *Nanomaterials* (C. 14, Sayı 5). Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). <https://doi.org/10.3390/nano14050469>
- Noman, M. A., Miao, L., Macreadie, P. I., & Adyel, T. M. (2025). Time to count plastics in climate action. *Science*, 387(6738), 1048-1048. <https://doi.org/10.1126/science.adu2738>
- Obinna Iwuanyanwu, Ifechukwu Gil-Ozoudeh, Azubuike Chukwudi Okwandu, & Chidiebere Somadina Ike. (2024). The role of green building materials in sustainable architecture: Innovations, challenges, and future trends. *International Journal of*

- Applied Research in Social Sciences*, 6(8), 1935-1950.  
<https://doi.org/10.51594/ijarss.v6i8.1476>
- Oey, T., Kumar, A., Bullard, J. W., Neithalath, N., & Sant, G. (2013). The Filler Effect: The Influence of Filler Content and Surface Area on Cementitious Reaction Rates. *Journal of the American Ceramic Society*, 96(6), 1978-1990.  
<https://doi.org/10.1111/jace.12264>
- Onwe, J. C., Ullah, E., Ansari, M. A., Sahoo, M., & Dhayal, K. S. (2024). Industrialization meets sustainability: Analysing the role of technological innovations, energy efficiency and urbanisation for major industrialized economies. *Journal of Environmental Management*, 372, 123297.  
<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.123297>
- Ouda, M., Abu Sanad, A. A., Abdelaal, A., Krishna, A., Kandah, M., & Kurdi, J. (2025). A Comprehensive Review of Sustainable Thermal and Acoustic Insulation Materials from Various Waste Sources. *Buildings*, 15(16), 2876.  
<https://doi.org/10.3390/buildings15162876>
- Oyedotun, T. D. T. (2018). X-ray fluorescence (XRF) in the investigation of the composition of earth materials: a review and an overview. *Geology, Ecology, and Landscapes*, 2(2), 148-154. <https://doi.org/10.1080/24749508.2018.1452459>
- Papadopoulos, A. M. (2005). State of the art in thermal insulation materials and aims for future developments. *Energy and Buildings*, 37(1), 77-86.  
<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2004.05.006>
- Parale, V. G., Kim, T., Choi, H., Phadtare, V. D., Dhavale, R. P., Kanamori, K., & Park, H. (2024). Mechanically Strengthened Aerogels through Multiscale, Multicompositional, and Multidimensional Approaches: A Review. *Advanced Materials*, 36(18).  
<https://doi.org/10.1002/adma.202307772>
- Park, S.-H., Kim, S.-H., Jeong, J.-Y., Kim, H.-J., & Seo, D.-H. (2025). Detailed Building Energy Impact Analysis of XPS Insulation Degradation Using Existing Long-Term Experimental Data. *Energies*, 18(13), 3260. <https://doi.org/10.3390/en18133260>
- Paul, K. T., Satpathy, S., Manna, I., Chakraborty, K., & Nando, G. (2007). Preparation and Characterization of Nano structured Materials from Fly Ash: A Waste from Thermal Power Stations, by High Energy Ball Milling. *Nanoscale Research Letters*, 2(8), 397.  
<https://doi.org/10.1007/s11671-007-9074-4>
- Paulauskiene, T., Sirtaute, E., Tadzijevas, A., & Uebe, J. (2024). Mechanical Properties of Cellulose Aerogel Composites with and without Crude Oil Filling. *Gels*, 10(2), 135.  
<https://doi.org/10.3390/gels10020135>
- Peavy, B. A. (1996). A Heat Transfer Note on Temperature Dependent Thermal Conductivity. *Journal of Thermal Insulation and Building Envelopes*, 20(1), 76-90.  
<https://doi.org/10.1177/109719639602000107>
- Peng, F., Jiang, Y., Feng, J., Cai, H., Feng, J., & Li, L. (2021). Thermally insulating, fiber-reinforced alumina–silica aerogel composites with ultra-low shrinkage up to 1500 °C. *Chemical Engineering Journal*, 411, 128402.  
<https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.128402>
- Pereira, J., Souza, R., Moreira, A., & Moita, A. (2024). Enhanced Interfaces for High-Temperature Purposes—Practical Methodology and Characterization. *Processes*, 12(10). <https://doi.org/10.3390/pr12102265>

- Petcu, C., Hegyi, A., Stoian, V., Dragomir, C. S., Ciobanu, A. A., Lăzărescu, A.-V., & Florean, C. (2023). Research on Thermal Insulation Performance and Impact on Indoor Air Quality of Cellulose-Based Thermal Insulation Materials. *Materials*, *16*(15), 5458. <https://doi.org/10.3390/ma16155458>
- Pfundstein, M., Gellert, R., Spitzner, M., & Rudolphi, A. (2008). *Insulating Materials*. DETAIL - Institut für internationale Architektur-Dokumentation GmbH & Co. KG. <https://doi.org/10.11129/detail.9783034614757>
- Pisarek, A. M., Nowak, B., Jobda, R., & Gac, J. M. (2025). VTMS-based aerogel structure preservation: the influence of the sol–gel synthesis composition, aging process, and double-crosslinking. *New Journal of Chemistry*, *49*(26), 11397-11411. <https://doi.org/10.1039/D5NJ00656B>
- Poudhar, A., & Ghosh, A. (2025). Phase change materials for energy efficiency in photovoltaic systems and buildings: A review. *Journal of Building Engineering*, *104*, 112360. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2025.112360>
- Qian, X., Zhou, J., & Chen, G. (2021). Phonon-engineered extreme thermal conductivity materials. *Nature Materials*, *20*(9), 1188-1202. <https://doi.org/10.1038/s41563-021-00918-3>
- Qu, Z. G., Fu, Y. D., Liu, Y., & Zhou, L. (2018). Approach for predicting effective thermal conductivity of aerogel materials through a modified lattice Boltzmann method. *Applied Thermal Engineering*, *132*, 730-739. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.01.013>
- Ramzi Hannan, N. I. R., Shahidan, S., Ali, N., & Maarof, M. Z. (2017). A Comprehensive Review on the Properties of Coal Bottom Ash in Concrete as Sound Absorption Material. *MATEC Web of Conferences*, *103*, 01005. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201710301005>
- Rashidi, S., Esfahani, J. A., & Karimi, N. (2018). Porous materials in building energy technologies—A review of the applications, modelling and experiments. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *91*, 229-247. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.03.092>
- Rawson, S. D., Bayram, V., McDonald, S. A., Yang, P., Courtois, L., Guo, Y., Xu, J., Burnett, T. L., Barg, S., & Withers, P. J. (2022). Tailoring the Microstructure of Lamellar Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub>T<sub>x</sub> MXene Aerogel by Compressive Straining. *ACS Nano*, *16*(2), 1896-1908. <https://doi.org/10.1021/acsnano.1c04538>
- Reignier, J., Méchin, F., & Sarbu, A. (2021). Chemical gradients in PIR foams as probed by ATR-FTIR analysis and consequences on fire resistance. *Polymer Testing*, *93*, 106972. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2020.106972>
- Reka, A. A., Pavlovski, B., Fazlija, E., Berisha, A., Pacarizi, M., Daghmehchi, M., Sacalis, C., Jovanovski, G., Makreski, P., & Oral, A. (2021). Diatomaceous Earth: Characterization, thermal modification, and application. *Open Chemistry*, *19*(1), 451-461. <https://doi.org/10.1515/chem-2020-0049>
- Resalati, S., Okoroafor, T., Henshall, P., Simões, N., Gonçalves, M., & Alam, M. (2021). Comparative life cycle assessment of different vacuum insulation panel core materials using a cradle to gate approach. *Building and Environment*, *188*, 107501. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.107501>
- Reynoso, L. E., Carrizo Romero, Á. B., Viegas, G. M., & San Juan, G. A. (2021). Characterization of an alternative thermal insulation material using recycled expanded

- polystyrene. *Construction and Building Materials*, 301, 124058. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124058>
- Rocha, B. M., Tenório, M., Branco, J. M., & Silva, S. M. (2025). A Comprehensive Comparison of Insulation Materials for Timber Building Systems. *Energies*, 18(10), 2420. <https://doi.org/10.3390/en18102420>
- Rocha, P. F., Ferreira, N. O., Queiroz, D., & Pereira, N. B. (2023). Modular and Prefabricated System for Waterproofing and Insulation of Flat Roofs. *Buildings*, 13(6), 1438. <https://doi.org/10.3390/buildings13061438>
- Rostami, J., Khandel, O., Sedighardekani, R., Sahneh, A. R., & Ghahari, S. (2021). Enhanced workability, durability, and thermal properties of cement-based composites with aerogel and paraffin coated recycled aggregates. *Journal of Cleaner Production*, 297, 126518. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126518>
- Rubino, C., Lama, G. C., Liuzzi, S., Martellotta, F., Liguori, B., Recupido, F., Verdolotti, L., & Sorrentino, L. (2024). Tailoring porosity and acoustic properties in bi-layered diatomite-based foams through multiscale structural approach. *Construction and Building Materials*, 430. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.136480>
- Rungrueng, P., Hankoy, M., Kitiwan, M., Keawprak, N., & Tunthawiroon, P. (2025). Fabrication and characterization of lightweight aggregates with expanded perlite and NPK nutrient incorporation. *Open Ceramics*, 22, 100790. <https://doi.org/10.1016/j.oceram.2025.100790>
- Sáez de Guinoa, A., Zambrana-Vasquez, D., Alcalde, A., Corradini, M., & Zabalza-Bribián, I. (2017). Environmental assessment of a nano-technological aerogel-based panel for building insulation. *Journal of Cleaner Production*, 161, 1404-1415. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.06.102>
- Sai, H., Xing, L., Xiang, J., Cui, L., Jiao, J., Zhao, C., Li, Z., Li, F., & Zhang, T. (2014). Flexible aerogels with interpenetrating network structure of bacterial cellulose–silica composite from sodium silicate precursor via freeze drying process. *RSC Advances*, 4(57), 30453. <https://doi.org/10.1039/C4RA02752C>
- Sako, E. Y., Orsolini, H. D., Moreira, M., de Meo, C. E., Pelissari, P. I. B. G. B., Salvini, V. R., & Pandolfelli, V. C. (2020). Review: Thermal ceramic coatings as energy saving alternatives for high temperature processes. *International Journal of Applied Ceramic Technology*, 17(6), 2492-2508. <https://doi.org/10.1111/ijac.13606>
- Salimian, S., Zadhoush, A., Naeimirad, M., Kotek, R., & Ramakrishna, S. (2018). A review on aerogel: 3D nanoporous structured fillers in polymer-based nanocomposites. *Polymer Composites*, 39(10), 3383-3408. <https://doi.org/10.1002/pc.24412>
- Sánchez-Calderón, I., Merillas, B., Bernardo, V., & Rodríguez-Pérez, M. Á. (2022). Methodology for measuring the thermal conductivity of insulating samples with small dimensions by heat flow meter technique. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 147(22), 12523-12533. <https://doi.org/10.1007/s10973-022-11457-7>
- Santos, A. C., Cruz, C., Font, E., French, D., Guedes, A., Moreira, K., Sant'Ovaia, H., Vieira, B. J. C., Waerenborgh, J. C., & Valentim, B. (2023). Physicochemical Properties of Fe-Bearing Phases from Commercial Colombian Coal Ash. *Minerals*, 13(8), 1055. <https://doi.org/10.3390/min13081055>
- Santos, C. S. C., Gabriel, B., Blanchy, M., Menes, O., García, D., Blanco, M., Arconada, N., & Neto, V. (2015). Industrial Applications of Nanoparticles – A Prospective

- Overview. *Materials Today: Proceedings*, 2(1), 456-465. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2015.04.056>
- Sarcinella, A., Cunha, S., Aguiar, I., Aguiar, J., & Frigione, M. (2025). Sustainable Organic Phase Change Materials for Sustainable Energy Efficiency Solutions. *Polymers*, 17(10), 1343. <https://doi.org/10.3390/polym17101343>
- Sawadogo, M., Benmahiddine, F., Hamami, A. E. A., Belarbi, R., Godin, A., & Duquesne, M. (2022). Investigation of a novel bio-based phase change material hemp concrete for passive energy storage in buildings. *Applied Thermal Engineering*, 212, 118620. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2022.118620>
- Saygın, M., Dolgun, E. C., Say, S., & Öztürk, İ. Y. (2025). Customized Insulation Strategies for Türkiye: Life Cycle Cost Analysis and Impact on Business Competitiveness. *Buildings*, 15(8), 1252. <https://doi.org/10.3390/buildings15081252>
- Schiavoni, S., D'Alessandro, F., Bianchi, F., & Asdrubali, F. (2016). Insulation materials for the building sector: A review and comparative analysis. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 62, 988-1011. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.05.045>
- Sebbar, E. H., Khouya, O. A., Laaroussi, N., Hajji, A., & Garoum, M. (2025). Assessment of the thermal performance of recycled PVC window frames using experimental and numerical simulations. *Journal of Building Engineering*, 102, 111935. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2025.111935>
- Sedaghat, A., Salem, H., Hussam, W. K., Mahdizadeh, A., Al-Khiami, M. I., Malayer, M. A., Soleimani, S. M., Sabati, M., Narayanan, R., Rasul, M., & Khan, M. M. K. (2023). Exploring energy-efficient building solutions in hot regions: A study on bio-phase change materials and cool roof coatings. *Journal of Building Engineering*, 76, 107258. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.107258>
- Seraya, N., Litvinov, V., Daumova, G., Shaikhov, M., Ramazanov, R., & Aubakirova, R. (2025). Features of Ash and Slag Formation During Incomplete Combustion of Coal from the Karazhyra Deposit in Small- and Medium-Scale Power Plants. *Processes*, 13(8), 2467. <https://doi.org/10.3390/pr13082467>
- Sergi, C., Bavasso, I., Frigetto, G., Tirillò, J., Sarasini, F., & Casalini, S. (2024). Linoleum waste as PLA filler for components cost reduction: Effects on the thermal and mechanical behavior. *Polymer Testing*, 138, 108548. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2024.108548>
- Seun Samuel Owoeye, Segun Michael Abegunde, & Babatunde Oji. (2021). A novel low temperature synthesis of sodium silicate (water glass) from silica-rich wastes using hydrothermal method. *Global Journal of Engineering and Technology Advances*, 6(1), 066-075. <https://doi.org/10.30574/gjeta.2021.6.1.0001>
- Shafi, S., & Zhao, Y. (2020). Superhydrophobic, enhanced strength and thermal insulation silica aerogel/glass fiber felt based on methyltrimethoxysilane precursor and silica gel impregnation. *Journal of Porous Materials*, 27(2), 495-502. <https://doi.org/10.1007/s10934-019-00834-7>
- Shah, S. N., Mo, K. H., Yap, S. P., & Radwan, M. K. H. (2021). Towards an energy efficient cement composite incorporating silica aerogel: A state of the art review. *Çinde Journal of Building Engineering* (C. 44). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.103227>

- Shahee, A., Abdoos, M., Aslani, A., & Zahedi, R. (2024). Reducing the energy consumption of buildings by implementing insulation scenarios and using renewable energies. *Energy Informatics*, 7(1), 18. <https://doi.org/10.1186/s42162-024-00311-9>
- Shan, G., Jin, W., Chen, H., Zhao, M., Surampalli, R., Ramakrishnan, A., Zhang, T., & Tyagi, R. D. (2015). Flame-Retardant Polymer Nanocomposites and Their Heat-Release Rates. *Journal of Hazardous, Toxic, and Radioactive Waste*, 19(4). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HZ.2153-5515.0000269](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HZ.2153-5515.0000269)
- Sharma, R., Joshi, A., & Baral, B. (2025). Gate to gate life cycle assessment of greenhouse gas emissions and acidification potential in plastic recycling technologies in Nepal. *Results in Engineering*, 26, 105367. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.105367>
- Shin, S.-R., & Lee, D.-S. (2025). The Effect of Isosorbide Content on the Thermal and Compressive Properties of Closed-Cell Rigid Polyurethane Foam. *Polymers*, 17(4), 495. <https://doi.org/10.3390/polym17040495>
- Silva, T., Vicente, R., Soares, N., & Ferreira, V. (2012). Experimental testing and numerical modelling of masonry wall solution with PCM incorporation: A passive construction solution. *Energy and Buildings*, 49, 235-245. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.02.010>
- Smitha, S., Shajesh, P., Aravind, P. R., Kumar, S. R., Pillai, P. K., & Warriar, K. G. K. (2006). Effect of aging time and concentration of aging solution on the porosity characteristics of subcritically dried silica aerogels. *Microporous and Mesoporous Materials*, 91(1-3), 286-292. <https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2005.11.051>
- Smolka-Danielowska, D., Kądziołka-Gaweł, M., & Krzykowski, T. (2019). Chemical and mineral composition of furnace slags produced in the combustion process of hard coal. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 16(10), 5387-5396. <https://doi.org/10.1007/s13762-018-2122-z>
- Sohail, A. (2025). Progress in nanomaterials: Synthesis, characterization, and applications. *Next Nanotechnology*, 8, 100263. <https://doi.org/10.1016/j.nxnano.2025.100263>
- Soleimani Dorcheh, A., & Abbasi, M. H. (2008). Silica aerogel; synthesis, properties and characterization. *Journal of Materials Processing Technology*, 199(1-3), 10-26. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2007.10.060>
- Soloveva, O. V., Solovev, S. A., Vankov, Y. V., & Shakurova, R. Z. (2022). Experimental Studies of the Effective Thermal Conductivity of Polyurethane Foams with Different Morphologies. *Processes*, 10(11), 2257. <https://doi.org/10.3390/pr10112257>
- Song, A., Kim, Y., Hwang, S., Shin, M., & Lee, S. (2024). A Comprehensive Review of Thermal Transmittance Assessments of Building Envelopes. *Buildings*, 14(10), 3304. <https://doi.org/10.3390/buildings14103304>
- Stazi, F., Urlietti, C., Di Perna, C., Chiappini, G., Rossi, M., & Tittarelli, F. (2019). Thermal and mechanical optimization of nano-foams for sprayed insulation. *Construction and Building Materials*, 201, 828-841. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.12.177>
- Stojanovic, A., Paz Comesaña, S., Rentsch, D., Koebel, M. M., & Malfait, W. J. (2019). Ambient pressure drying of silica aerogels after hydrophobization with mono-, di- and tri-functional silanes and mixtures thereof. *Microporous and Mesoporous Materials*, 284, 289-295. <https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2019.04.038>
- Strzałkowski, J., & Garbalińska, H. (2022). The dynamic thermal properties of aerogel-incorporated concretes. *Construction and Building Materials*, 340, 127706. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127706>

- Su, G., Jiang, P., Guo, L., Zhang, H., Cheng, X., & Zhang, H. (2024). Robust cellulose composite aerogels with enhanced thermal insulation and mechanical properties from cotton waste. *Industrial Crops and Products*, 211, 118242. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2024.118242>
- Sutcu, M., Erdogmus, E., Gencel, O., Gholampour, A., Atan, E., & Ozbakkaloglu, T. (2019). Recycling of bottom ash and fly ash wastes in eco-friendly clay brick production. *Journal of Cleaner Production*, 233, 753-764. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.06.017>
- Szabó, Á., & Lakatos, Á. (2024). Thermal analysis of aerogels and their vacuum-formed forms, their potential uses, and their effects on the environment. *Case Studies in Thermal Engineering*, 56. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2024.104284>
- Tabata, M., Adachi, I., Hatakeyama, Y., Kawai, H., Morita, T., & Nishikawa, K. (2012). Optical and Radiographical Characterization of Silica Aerogel for Cherenkov Radiator. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 59(5), 2506-2511. <https://doi.org/10.1109/TNS.2012.2208479>
- Tahmasbi, F., Khadair, A. I., Aburumman, G. A., Tahmasebi, M., Thi, N. H., & Afrand, M. (2025). Energy-efficient building façades: A comprehensive review of innovative technologies and sustainable strategies. İçinde *Journal of Building Engineering* (C. 99). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2024.111643>
- Takeshita, S., Mine, S., & Ono, T. (2025). Data-Driven Review on Aerogels and Polymeric Aerogels. *Angewandte Chemie International Edition*, 64(28). <https://doi.org/10.1002/anie.202504250>
- Takeshita, S., Sadeghpour, A., Malfait, W. J., Konishi, A., Otake, K., & Yoda, S. (2019). Formation of Nanofibrous Structure in Biopolymer Aerogel during Supercritical CO<sub>2</sub> Processing: The Case of Chitosan Aerogel. *Biomacromolecules*, 20(5), 2051-2057. <https://doi.org/10.1021/acs.biomac.9b00246>
- Tang, M., Bourbigot, S., Rogaume, T., Bensabath, T., Batiot, B., & Drean, V. (2025). Fire Performance Comparison of Expanded Polystyrene External Thermal Insulation Composites Systems and Expandable Graphite-Modified Surface Covers at Different Scales. *Fire*, 8(2), 45. <https://doi.org/10.3390/fire8020045>
- That Buu, T., Minh Tu, P., Quang Cong, C., Duy Hai, N., Thanh Cong Minh, D., Thanh Hoai Nam, N., Minh Quan, V., Khanh Ngoc, B., Gia Han, L., Ky Phuong Ha, H., Truong Son, N., Huu Hieu, N., & Chi, H. (2023). *Tea grounds inspiration for a renewable biomass-based carbon aerogel with CMC and PVA reinforcements: Dye adsorption and supercapacitor prospects*. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-3151346/v1>
- Thie, C., Quallen, S., Ibrahim, A., Xing, T., & Johnson, B. (2023). Study of Energy Saving Using Silica Aerogel Insulation in a Residential Building. *Gels*, 9(2). <https://doi.org/10.3390/gels9020086>
- Timuralp, C., Aras, N., Sisman, N., & Aras, H. (2025). Evaluation of Optimum Insulation Thickness According to External Wall Types to Be Used in Buildings to Be Reconstructed in Turkey. *Applied Sciences*, 15(5), 2497. <https://doi.org/10.3390/app15052497>
- Tingley, D. D., Hathway, A., Davison, B., & Allwood, D. (2017). The environmental impact of phenolic foam insulation boards. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Construction Materials*, 170(2), 91-103. <https://doi.org/10.1680/coma.14.00022>

- Torres Sevilla, L., & Radulovic, J. (2021). Effectiveness of Thermal Properties in Thermal Energy Storage Modeling. *Frontiers in Mechanical Engineering*, 7. <https://doi.org/10.3389/fmech.2021.690793>
- Torres-Regalado, P., Merillas, B., & Rodríguez-Pérez, M. Á. (2025). Environmentally Friendly Blowing Agents for Producing Polyisocyanurate (PIR) Foams: Study of the Thermal Conductivity Aging and Mechanical Properties. *Nano Select*. <https://doi.org/10.1002/nano.70034>
- Touina, A., Chernai, S., Mansour, B., Hadjar, H., Ouakouak, A., & Hamdi, B. (2021). Characterization and efficient dye discoloration of Algerian diatomite from Ouled Djilali-Mostaganem. *SN Applied Sciences*, 3(4), 476. <https://doi.org/10.1007/s42452-021-04334-9>
- Tsakalou, C., Papamarkou, S., Tsakiridis, P. E., Bartzas, G., & Tsakalakis, K. (2018). Characterization and leachability evaluation of medical wastes incineration fly and bottom ashes and their vitrification outgrowths. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 6(1), 367-376. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2017.12.012>
- Ubeyitogullari, A., & Ciftci, O. N. (2017). Generating phytosterol nanoparticles in nanoporous bioaerogels via supercritical carbon dioxide impregnation: Effect of impregnation conditions. *Journal of Food Engineering*, 207, 99-107. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2017.03.022>
- Väntsi, O., & Kärki, T. (2014). Mineral wool waste in Europe: a review of mineral wool waste quantity, quality, and current recycling methods. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 16(1), 62-72. <https://doi.org/10.1007/s10163-013-0170-5>
- Vareda, J. P., Matias, P. M. C., Paixão, J. A., Murtinho, D., Valente, A. J. M., & Durães, L. (2024). Chitosan–Silica Composite Aerogel for the Adsorption of Cupric Ions. *Gels*, 10(3), 192. <https://doi.org/10.3390/gels10030192>
- Vėjelis, S., Skulskis, V., Kremensas, A., Vaitkus, S., & Kairyte, A. (2023). Performance of Thermal Insulation Material Produced from Lithuanian Sheep Wool. *Journal of Natural Fibers*, 20(2). <https://doi.org/10.1080/15440478.2023.2237682>
- Venturelli, M., Saponelli, R., Milani, M., & Montorsi, L. (2023). Combined numerical approach for the evaluation of the energy efficiency and economic investment of building external insulation technologies. *Energy Nexus*, 10, 100198. <https://doi.org/10.1016/j.nexus.2023.100198>
- Villasmil, W., Fischer, L. J., & Worlitschek, J. (2019). A review and evaluation of thermal insulation materials and methods for thermal energy storage systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 103, 71-84. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.12.040>
- Violano, A., & Cannaviello, M. (2023). The Carbon Footprint of Thermal Insulation: The Added Value of Circular Models Using Recycled Textile Waste. *Energies*, 16(19). <https://doi.org/10.3390/en16196768>
- Vivod, S. L., Meador, M. A. B., Pugh, C., Wilkosz, M., Calomino, K., & McCorkle, L. (2020). Toward Improved Optical Transparency of Polyimide Aerogels. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 12(7), 8622-8633. <https://doi.org/10.1021/acsami.9b17796>
- Vogt, M., Buchholz, C., Thiede, S., & Herrmann, C. (2022). Energy efficiency of Heating, Ventilation and Air Conditioning systems in production environments through model-predictive control schemes: The case of battery production. *Journal of Cleaner Production*, 350, 131354. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131354>

- Wahba, T. F., Wahba, M. N., Abo-Elfadl, M. T., El-Bassyouni, G. T., & Mousa, S. M. (2025). Efficacy and characterization of synthesized metal oxide nanoparticles and diatomaceous earth on stored product insect control. *Journal of Stored Products Research*, *112*, 102622. <https://doi.org/10.1016/j.jspr.2025.102622>
- Walsh, P. J., Clarke, S. A., Julius, M., & Messersmith, P. B. (2017). Exploratory Testing of Diatom Silica to Map the Role of Material Attributes on Cell Fate. *Scientific Reports*, *7*(1), 14138. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-13285-4>
- Wang, C., Yang, R., & Wang, H. (2020). Synthesis of ZIF-8/Fly Ash Composite for Adsorption of Cu<sup>2+</sup>, Zn<sup>2+</sup> and Ni<sup>2+</sup> from Aqueous Solutions. *Materials*, *13*(1), 214. <https://doi.org/10.3390/ma13010214>
- Wang, K., & Gao, W. (2025). DOPO-modified HNTs reinforced silica aerogel composites: enhanced flame retardancy, thermal insulation, and environmental stability for silicone resins. *Progress in Organic Coatings*, *206*, 109362. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2025.109362>
- Wang, Q., Zhu, J., Yu, F., Li, Y., Zhang, Y., Peng, X., He, D., Zhao, S., Zheng, W., Shang, J., Li, S., Wang, H., Shu, Y., Uyama, H., & Mao, G. (2023). A thermoplastic polyurethane-based composite aerogel with low shrinkage and high specific surface area enhanced by activated carbon for highly efficient oil/water separation. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, *11*(5), 111077. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2023.111077>
- Wang, X., Tian, X., Mohan, M., Zhou, K., Lei, T., Kang, M., Hao, J., Liu, Y., Wu, L., Mu, Q., Zhang, Q., Chen, L., & Wei, Y. (2025). Tunable Stress-Responsive Biomimetic Multi-Stage Porous Aerogels as Advanced Wideband Acoustic Absorbers with Superior Flame Resistance. *Advanced Functional Materials*, *35*(34). <https://doi.org/10.1002/adfm.202503142>
- Wang, Y., Zhang, S., Wang, D., & Liu, Y. (2023). Experimental study on the influence of temperature and humidity on the thermal conductivity of building insulation materials. *Energy and Built Environment*, *4*(4), 386-398. <https://doi.org/10.1016/j.enbenv.2022.02.008>
- Wei, J., Yang, Z., Sun, Y., Wang, C., Fan, J., Kang, G., Zhang, R., Dong, X., & Li, Y. (2019). Nanocellulose-based magnetic hybrid aerogel for adsorption of heavy metal ions from water. *Journal of Materials Science*, *54*(8), 6709-6718. <https://doi.org/10.1007/s10853-019-03322-0>
- Wei, J., Zhu, P., & Sun, H. (2022). Ambient-Dried Silica Aerogel Powders Derived from Coal Gangue by Using One-Pot Method. *Materials*, *15*(4), 1454. <https://doi.org/10.3390/ma15041454>
- Wu, B., Qi, Q., Liu, L., Liu, Y., & Wang, J. (2024). Wearable Aerogels for Personal Thermal Management and Smart Devices. *ACS Nano*, *18*(14), 9798-9822. <https://doi.org/10.1021/acsnano.4c00967>
- Wu, H., Zhang, H., Zhang, G., Liu, J., Liu, Z., & Du, F. (2023). Study on preparation and performance of advanced aerogel foamed concrete with ultra-light aerogel. *Construction and Building Materials*, *366*, 130166. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.130166>
- Wu, K., Zhou, Q., Cao, J., Qian, Z., Niu, B., & Long, D. (2022). Ultrahigh-strength carbon aerogels for high temperature thermal insulation. *Journal of Colloid and Interface Science*, *609*, 667-675. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2021.11.067>

- Wu, Q., & Ge, J. (2021). Experimental investigation of the entanglement network and nonlinear viscoelastic behavior of a nano-SiO<sub>2</sub> strengthened polymer gel. *Journal of Molecular Liquids*, 339, 117288. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2021.117288>
- Wu, X., Fan, M., Mclaughlin, J. F., Shen, X., & Tan, G. (2018). A novel low-cost method of silica aerogel fabrication using fly ash and trona ore with ambient pressure drying technique. *Powder Technology*, 323, 310-322. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2017.10.022>
- Xia, J., Zhao, B., Guo, Y., Li, K., Na, Q., He, S., & Zhang, J. (2025). Synergistic alkali fusion-acid leaching strategy for silica aerogel synthesis from fly ash and performance optimization. *Scientific Reports*, 15(1), 40299. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-24059-8>
- Xiao, J., Lv, W., Song, Y., & Zheng, Q. (2018). Graphene/nanofiber aerogels: Performance regulation towards multiple applications in dye adsorption and oil/water separation. *Chemical Engineering Journal*, 338, 202-210. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2017.12.156>
- Xu, J., Song, W., Wu, N., Tong, J., & Ren, L. (2021). Preparation and characterization of chitosan/polyvinyl porous alcohol aerogel microspheres with stable physicochemical properties. *International Journal of Biological Macromolecules*, 187, 614-623. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2021.07.127>
- Xu, T., Garrecht, H., Jiang, C., & Lu, C. (2025). The Application and Effects of Aerogel in Ultra-Lightweight Mineralised Foams. *Buildings*, 15(15), 2671. <https://doi.org/10.3390/buildings15152671>
- Xu, Y., Yan, C., Du, C., Xu, K., Li, Y., Xu, M., Bourbigot, S., Fontaine, G., Li, B., & Liu, L. (2023). High-strength, thermal-insulating, fire-safe bio-based organic lightweight aerogel based on 3D network construction of natural tubular fibers. *Composites Part B: Engineering*, 261. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2023.110809>
- Yang, H., Guo, S., Kang, K., Zhao, M., Zhang, F., Guo, X., Qiao, W., & Tan, G. (2025). Applications and Research Progress of Aerogels in Fire-Resistant Coatings. *Polymers*, 17(20), 2777. <https://doi.org/10.3390/polym17202777>
- Yang, J., Wu, H., Liang, Y., Cen, J., & Zhang, X. (2023). A Comparative Assessment of Different Aerogel-Insulated Building Walls for Enhanced Thermal Insulation Performance. *Gels*, 9(12), 943. <https://doi.org/10.3390/gels9120943>
- Yang, X., Lu, T., & Kim, T. (2013). Effective Thermal Conductivity Modelling for Closed-Cell Porous Media with Analytical Shape Factors. *Transport in Porous Media*, 100(2), 211-224. <https://doi.org/10.1007/s11242-013-0212-4>
- Yang, Y., Shen, Z., Wu, W., Zhang, H., Ren, Y., & Yang, Q. (2022). Preparation of a novel diatomite-based PCM gypsum board for temperature-humidity control of buildings. *Building and Environment*, 226. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109732>
- Yang, Y.-L., Zhang, T., Chen, Y., Wang, C.-J., & Cai, G.-J. (2025). A comprehensive review on application of scrap tire rubber for sustainable thermal insulation material in civil engineering. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 217, 115727. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2025.115727>
- Yao, S., Duan, Y., Chen, W., Chen, J., Zhang, H., Peng, L., Wu, X., & Li, Z. (2026). Performance-driven design of aerogel-perlite cement mortars: Particle packing optimization and building energy assessment. *Journal of Building Engineering*, 120, 115567. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2026.115567>

- Yao, Z. T., Ji, X. S., Sarker, P. K., Tang, J. H., Ge, L. Q., Xia, M. S., & Xi, Y. Q. (2015). A comprehensive review on the applications of coal fly ash. *Earth-Science Reviews*, *141*, 105-121. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2014.11.016>
- Yarahmadi, N., Vega, A., & Jakubowicz, I. (2017). Accelerated ageing and degradation characteristics of rigid polyurethane foam. *Polymer Degradation and Stability*, *138*, 192-200. <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2017.03.012>
- Yi, X., Zhang, Z., Niu, J., Wang, H., Li, T., Gong, J., & Zheng, R. (2024). Green Strong Cornstalk Rind-Based Cellulose-PVA Aerogel for Oil Adsorption and Thermal Insulation. *Polymers*, *16*(9), 1260. <https://doi.org/10.3390/polym16091260>
- Yilmaz, D. G., & Cesur, F. (2023). A Study for the Improvement of the Energy Performance Certificate (EPC) System in Turkey. *Sustainability*, *15*(19), 14074. <https://doi.org/10.3390/su151914074>
- Yin, J., Liu, H., Zheng, Y., Zhang, P., Fan, T., Wu, H., Zong, D., Liu, Y., & Li, Y. (2026). Superelastic Fiber Aerogels for Wide-Temperature-Adaptive Monitoring and Personal Protection. *Advanced Fiber Materials*. <https://doi.org/10.1007/s42765-026-00698-y>
- Yin, M., Fu, Z., Yu, X., Wang, X., & Lu, Y. (2025). The Effect of Drying Methods on the Pore Structure of Balsa Wood Aerogels. *Polymers*, *17*(12), 1686. <https://doi.org/10.3390/polym17121686>
- Yu, J., Dong, Y., Wang, T.-H., Chang, W.-S., & Park, J. (2024). U-Values for Building Envelopes of Different Materials: A Review. *Buildings*, *14*(8), 2434. <https://doi.org/10.3390/buildings14082434>
- Yu, S., & Budtova, T. (2024). Creating and exploring carboxymethyl cellulose aerogels as drug delivery devices. *Carbohydrate Polymers*, *332*, 121925. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2024.121925>
- Zach, J., Novák, V., Peterková, J., Bubeník, J., Košir, M., Božiček, D., & Krejza, Z. (2023). The Use of Advanced Environmentally Friendly Systems in the Insulation and Reconstruction of Buildings. *Buildings*, *13*(2), 404. <https://doi.org/10.3390/buildings13020404>
- Zhan, W., Chen, L., Kong, Q., Li, L., Chen, M., Jiang, J., Li, W., Shi, F., & Xu, Z. (2023). The Synthesis and Polymer-Reinforced Mechanical Properties of SiO<sub>2</sub> Aerogels: A Review. *Molecules*, *28*(14), 5534. <https://doi.org/10.3390/molecules28145534>
- Zhang, H., Yang, J., Wu, H., Fu, P., Liu, Y., & Yang, W. (2020). Dynamic thermal performance of ultra-light and thermal-insulative aerogel foamed concrete for building energy efficiency. *Solar Energy*, *204*, 569-576. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.04.092>
- Zhang, J., Han, Y., Zhang, L., Li, Z., Yang, H., Zhang, X., & Zhang, J. (2024). Silica aerogel-PVA dough: A high internal phase composite with superior thermal insulation and gas barrier. *Composites Science and Technology*, *251*, 110553. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2024.110553>
- Zhang, J., Zhang, H., Asutosh, A. T., Sun, N., & Li, X. (2023). The environmental sustainability assessment of building ceramic manufacturing based on the LCA-emergy approach. *Environment, Development and Sustainability*, *27*(3), 5999-6024. <https://doi.org/10.1007/s10668-023-04114-y>
- Zhang, S., Wang, L., Feng, J., Jiang, Y., Li, L., & Feng, J. (2023). Fumed Silica-Derived, Ambient Dried, and Low-Cost Nanoporous Aerogel-like Monoliths for Thermal

- Insulation. *ACS Applied Nano Materials*, 6(12), 10511-10520. <https://doi.org/10.1021/acsanm.3c01490>
- Zhang, X., Chen, Z., Zhang, J., Ye, X., & Cui, S. (2021). Hydrophobic silica aerogels prepared by microwave irradiation. *Chemical Physics Letters*, 762, 138127. <https://doi.org/10.1016/j.cplett.2020.138127>
- Zhang, X., Elsayed, I., Navarathna, C., Schueneman, G. T., & Hassan, E. B. (2019). Biohybrid Hydrogel and Aerogel from Self-Assembled Nanocellulose and Nanochitin as a High-Efficiency Adsorbent for Water Purification. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 11(50), 46714-46725. <https://doi.org/10.1021/acsami.9b15139>
- Zhang, X., Zhang, T., Yi, Z., Yan, L., Liu, S., Yao, X., Guo, A., Liu, J., & Hou, F. (2020). Multiscale mullite fiber/whisker reinforced silica aerogel nanocomposites with enhanced compressive strength and thermal insulation performance. *Ceramics International*, 46(18), 28561-28568. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2020.08.013>
- Zhang, X., Zhou, J., Zheng, Y., Wei, H., & Su, Z. (2021). Graphene-based hybrid aerogels for energy and environmental applications. *Chemical Engineering Journal*, 420, 129700. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.129700>
- Zhang, Y., Li, Y., Lei, Q., Zhu, D., Zhang, W., Wu, X., Xie, H., & Yu, W. (2023). A vertically aligned anisotropic boron nitride nanosheet (BNNSs)/polyvinyl alcohol (PVA) composite aerogel with ultra-low thermal conductivity prepared by the prefreeze-freeze-drying method for efficient thermal management. *Materials Today Communications*, 36, 106742. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2023.106742>
- Zhang, Y., Wu, Y., Liu, Z., Zhang, Q., Lu, J., Dong, Z., Cao, X., & Li, S. (2025). Preparation and properties of waterborne polyurethane/nanocellulose/sepiolite composite aerogel for sound absorption and heat insulation. *International Journal of Biological Macromolecules*, 298, 140015. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2025.140015>
- Zhao, B. (2022). Integrity of Newton's cooling law based on thermal convection theory of heat transfer and entropy transfer. *Scientific Reports*, 12(1), 16292. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-18961-8>
- Zhao, D., Wan, K., Wan, X., Liu, Y., Li, J., & Shi, M. (2026). High Structural Stability, High Compressive Strength, Excellent Thermal Insulation and Mechanism of Needled Quartz Fiber Felt/Phenolic Aerogel Composites. *Polymers*, 18(6), 705. <https://doi.org/10.3390/polym18060705>
- Zhao, J., & Li, S. (2022). Life cycle cost assessment and multi-criteria decision analysis of environment-friendly building insulation materials - A review. *Energy and Buildings*, 254, 111582. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111582>
- Zhao, S., Jiang, B., Maeder, T., Muralt, P., Kim, N., Matam, S. K., Jeong, E., Han, Y.-L., & Koebel, M. M. (2015). Dimensional and Structural Control of Silica Aerogel Membranes for Miniaturized Motionless Gas Pumps. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 7(33), 18803-18814. <https://doi.org/10.1021/acsami.5b05462>
- Zhao, S., Siqueira, G., Drdova, S., Norris, D., Ubert, C., Bonnin, A., Galmarini, S., Ganobjak, M., Pan, Z., Brunner, S., Nyström, G., Wang, J., Koebel, M. M., & Malfait, W. J. (2020). Additive manufacturing of silica aerogels. *Nature*, 584(7821), 387-392. <https://doi.org/10.1038/s41586-020-2594-0>
- Zhao, X. (2017). Introduction to EPS and XPS Two Exterior Insulation Used. *Proceedings of the Advances in Materials, Machinery, Electrical Engineering (AMMEE 2017)*. <https://doi.org/10.2991/ammee-17.2017.14>

- Zhilyaev, D., Fachinotti, V. D., Zanoni, F., Ortega, A., Goracci, G., Mankel, C., Koenders, E. A. B., & Jonkers, H. M. (2023). Early-stage analysis of a novel insulation material based on MPCM-doped cementitious foam: Modelling of properties, identification of production process hotspots and exploration of performance trade-offs. *Developments in the Built Environment*, *16*, 100243. <https://doi.org/10.1016/j.dibe.2023.100243>
- Zhong, J., Meng, J., Gui, X., Hu, T., Xie, N., Lu, X., Yang, Z., & Koratkar, N. (2014). Nanocarbon aerogel complexes inspired by the leaf structure. *Carbon*, *77*, 637-644. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2014.05.068>
- Zhou, H., Bhattarai, R., Li, Y., Si, B., Dong, X., Wang, T., & Yao, Z. (2022). Towards sustainable coal industry: Turning coal bottom ash into wealth. *Science of the Total Environment* (C. 804). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.149985>
- Zhou, J., Yu, J., Zhou, M., & Wang, X. (2024). Anisotropic MXene@polydopamine- and Dialdehyde Carboxymethyl Cellulose-Modified Collagen Aerogel Supported Form-Stable Phase Change Composites for Light-To-Heat Conversion and Energy Storage. *Biomacromolecules*, *25*(10), 6451-6464. <https://doi.org/10.1021/acs.biomac.4c00529>
- Zhu, Z., Zhang, W., Huang, H., Li, W., Ling, H., & Zhang, H. (2025). A Review of High-Temperature Resistant Silica Aerogels: Structural Evolution and Thermal Stability Optimization. *Gels*, *11*(5), 357. <https://doi.org/10.3390/gels11050357>
- Zou, J., Liu, J., Karakoti, A. S., Kumar, A., Joung, D., Li, Q., Khondaker, S. I., Seal, S., & Zhai, L. (2010). Ultralight Multiwalled Carbon Nanotube Aerogel. *ACS Nano*, *4*(12), 7293-7302. <https://doi.org/10.1021/nn102246a>
- Zu, G., Shen, J., Wei, X., Ni, X., Zhang, Z., Wang, J., & Liu, G. (2011). Preparation and characterization of monolithic alumina aerogels. *Journal of Non-Crystalline Solids*, *357*(15), 2903-2906. <https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2011.03.031>
- Zuo, X., Li, Q., Tang, Y., Li, Y., Zhao, X., & Yang, H. (2025). Experimental and numerical investigation of building envelopes constructed with mineral based composite phase change material for thermal management. *Construction and Building Materials*, *474*, 141067. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2025.141067>