



**TEKSTİL VE MÜHENDİS**  
**(Journal of Textiles and Engineer)**



<http://www.tekstilvemuhendis.org.tr>

---

**THERMAL INSULATION AND TEXTILE APPLICATIONS WITH AEROJELS**

**AEROJELLERLE ISI YALITIMI VE TEKSTİL UYGULAMALARI**

Atike KÖKEN<sup>1,2\*</sup>, Mehmet KANIK<sup>2</sup>

1Bursa Teknik Üniversitesi Mimar Sinan Yerleşkesi, Bursa, Türkiye  
2Bursa Uludağ Üniversitesi, Görükle Yerleşkesi, Bursa, Türkiye

Online Erişime Açıldığı Tarih (Available online):30 Aralık 2022 (30 December 2022)

---

**Bu makaleye atıf yapmak için (To cite this article):**

Atike KÖKEN, Mehmet KANIK (2022): Aerojellerle Isı Yalıtımı ve Tekstil Uygulamaları, Tekstil ve Mühendis, 29:128, 249-260.

**For online version of the article:** <https://doi.org/10.7216/teksmuh.1222488>

## **AEROJELLERLE ISI YALITIMI VE TEKSTİL UYGULAMALARI**

**Atike KÖKEN<sup>1,2\*</sup>**   
**Mehmet KANIK<sup>2</sup>** 

<sup>1</sup>Bursa Teknik Üniversitesi Mimar Sinan Yerleşkesi, Bursa, Türkiye  
<sup>2</sup>Bursa Uludağ Üniversitesi, Görükle Yerleşkesi, Bursa, Türkiye

*Gönderilme Tarihi / Received: 14.02.2022*  
*Kabul Tarihi / Accepted: 08.08.2022*

**ÖZ:** Aerojeller bilim dünyasına girişleri ile çığır açan bilinen en hafif katı maddelerdir. Hafiflik özelliğinin yanı sıra birçok önemli özelliği bir arada taşımaktadırlar. Nano gözeneklere sahip olmaları ısı yalıtımı, ses yalıtımı ve düşük dielektrik katsayısı gibi oldukça önemli avantajlar sağlamaktadır. Dünya çapında pazar payı her geçen gün artan arojellerin üretimi de artmaktadır. Farklı üretim parametreleri ve farklı kimyasal yapılar ile farklı özellikler elde etme imkânını sunmaktadır. Aerojellerin sahip olduğu üstün özelliklerden tekstil malzemelerinin özelliklerinin geliştirilmesinde de faydalanılmaktadır. Özellikle performans ve fonksiyonellik beklentisi bulunan teknik tekstil ürünlerinin geliştirilmesinde kullanılmaya başlanmıştır. Silika bazlı arojeller ısı iletim katsayılarının çok düşük olması ile ön plana çıkmaktadır. Çoğunlukla malzemelerin ısı yalıtım özelliğini geliştirmek için kullanılan silika arojeller, aynı zamanda su itici özellikleri ile de ilgi çekmektedirler. Literatürde özellikle dokusuz yüzeyler olmak üzere dokuma ve örme tekstil yüzeylerine arojel uygulamaları üzerine yapılan çeşitli çalışmalar bulunmaktadır. Bu yazıda arojellerin özellikleri, üretimi ve tekstil malzemeleri ile birlikte kullanımı amacıyla yapılan çalışmalar üzerinde durulmuştur.

**Anahtar Kelimeler:** Aerojel, Silika arojel, Tekstil, Teknik tekstil, Isı yalıtımı

## **THERMAL INSULATION AND TEXTILE APPLICATIONS WITH AEROJELS**

**ABSTRACT:** Aerogels are the lightest known solids that have been groundbreaking with their introduction to the scientific world. In addition to their lightness feature, they have many important properties. Having nanopores provides very important advantages such as thermal insulation, sound insulation and low dielectric coefficient etc. The production of aerogels, whose market share is increasing day by day around the world, is also increasing. It offers opportunities to obtain different properties with different production parameters and different chemical structures. The superior properties of aerogels are also used to improve the properties of textile materials. They are especially used in the development of technical textile products with performance and functionality expectations. Silica-based aerogels stand out with their very low thermal conductivity coefficients. Silica aerogels, which are mostly used to improve the thermal insulation properties of materials, also attract attention with their water-repellent properties. In the literature, there are various studies on arojel applications on woven and knitted textile surfaces, especially non-woven surfaces. This article focuses on the properties, production and use of aerogels with textile materials.

**Keywords:** Aerogel, Silica aerogel, Textile, Technical textiles, Heat insulation

**\*Sorumlu Yazarlar/Corresponding Author:** [atikekoken@gmail.com](mailto:atikekoken@gmail.com)

**DOI:** <https://doi.org/10.7216/teksmuh.1222488> [www.tekstilvemuhendis.org.tr](http://www.tekstilvemuhendis.org.tr)

## 1. GİRİŞ

Son yıllarda yaşanan enerji sıkıntıları ve fosil yakıtların neden olduğu çevresel sorunlar (karbon salınımının artması gibi) tüm dünyayı çeşitli arayışlara ve önlemler almaya yöneltmiştir. Bunlardan birisi de enerjiyi tasarruflu kullanmak amacıyla gerek üretimde ve gerekse yaşam alanlarında enerji kayıplarının en aza indirilmesi konusudur [1]. Isı kaybının en fazla olduğu alanın ise evsel ısınma ve endüstriyel ısı kayıplarından kaynaklandığı düşünülmektedir. Özellikle binaların, dünya küresel enerjisinin yaklaşık % 40'ını tükettiği tahmin edilmektedir [2]. Binalarda harcanan enerjinin ise % 85'i ısıtma kaynaklıdır[3]. Isı kaynaklı enerji kayıplarının önüne geçmek için gerçekleştirilen uygulamalardan biri ısı yalıtımıdır. Yapılarda kullanılan doğru ısı yalıtımı uygulamaları ile ısıtmada kullanılan enerjiden ortalama % 30-60 oranında tasarruf edilebilmektedir[4]. Binaların duvar, çatı, taban vb. bölmelerinde yüksek kalınlıkta yalıtım malzemeleri kullanılabilirdiğinden bu alana yönelik oldukça yüksek ısı yalıtım özelliğine sahip çok sayıda malzeme bulunabilmekte ve pratikte uygulanan başarılı uygulamalarla önemli tasarruflar da sağlanabilmektedir. Ne var ki binalardaki en fazla enerji kayıplarının olduğu pencere vb. camlı bölmelerde, genellikle yapılarda kullanılan kalın/hacimli malzemeler kullanılmadığından bu alanda enerji tasarrufuna yönelik tekstil tabanlı yeterince ince ve etkin malzemelere (örneğin perde olarak) ihtiyaç bulunmaktadır.

Diğer taraftan, ısı yalıtımı günlük yaşantımız içerisinde kullanılan malzemeler açısından da oldukça önemlidir. Aşırı soğuk ve sıcaklığa karşı koruyucu giysi ve eşya üretiminde de genellikle mümkün olduğunca hafif ve ince, fakat yüksek ısı yalıtım (düşük ısı iletimi) özelliğine sahip tekstil yüzeyleri tercih edilmektedir. Örneğin, çok soğuk iklimlerde kullanılan dağcılık kıyafetleri, kayak kıyafetleri, askeri kıyafetler (ayakkabı dahil), uyku tulumları, çadır kumaşları vb. ile çok sıcak ortamlarda kullanılan itfaiye kıyafetleri, ergime fırınlarında çalışanlarca giyilen koruyucu giysiler bu özelliklerin arandığı alanların başında gelmektedir [5]. Aerogeller ise tüm bu alanlarda dünyanın en düşük ısı iletim katsayısına sahip maddesi olarak bilinen havadan bile daha düşük ısı iletim katsayısı değerine sahip olması nedeniyle bir ısı yalıtım malzemesi olarak çok iyi bir alternatif oluşturmakta ve birçok alanda başarıyla kullanılmaktadır [6].

## 2. AEROJELLER

### 2.1. Aerogellerin Gelişimi

Aerogeller, Steven Kistler'in 1931 yılında silika aerogeli elde etmesiyle bilim dünyasına katılmıştır. Silika jellerin ilk defa ısı iletim katsayısı normal hava şartlarında 0,02 W/mK ve vakum altında 0,01 W/mK olarak ölçülmüştür[7]. Aerogeller, Guinness Rekorlar Kitabı'na giren "en hafif katı madde" olan nano gözenekli yapıya sahip süper yalıtkan malzemelerdir. Görün-tüleri dumana çok benzediği için "donmuş duman" veya "mavi duman" olarak da adlandırılırlar (Şekil 1).

NASA çalışmalarında aerogellerin önemli bir yere sahip olduğu bilinmektedir. Aerogeller, jel formunda hazırlanan bir malzeme içindeki sıvı bileşenin hava ile yer değiştirmesi ile elde edilen

nano boyutta gözeneklere sahip katı malzemelerdir[8]. 1980'lerde silika aerogel konusunda sağlanan teknolojik gelişmeler, enerji verimliliği konusundaki hassasiyetin artması ve kloroflorokarbon (CFC) gazları nedeniyle oluşan çevresel yüklerin artışının olduğu dönem ile aynı dönemlerdir. Bu dönem sonrası silika aerogeller, yüksek yalıtım değerleri ve çevreci üretim yöntemleri dolayısıyla geleneksel ısı yalıtımı karşısında ilgi çekici bir alternatif oluşturmaktadır [9].



Şekil 1. Aerogel görüntüsü [10]

Aerogellerin icat edilmesinin ardından geçen 90 yıllık sürede aerogel araştırmacıları daha çok silika aerogel, resorsinol formaldehit (RF) aerogel, karbonize-RF (CRF) aerogel ve aerogel kompozitleri gibi yapılar üzerine odaklanmıştır. 2000 yılından bu yana ise aerogellerin üretim kategorileri genişlemiştir. Son 20 yıllık süreçte silika olmayan oksit aerogeller, kalkogenit aerogeller, gradyent aerogeller ve diğer aerogel kompozitleri gibi farklı türlerde aerogeller araştırılmaya ve üretilmeye başlanmıştır. Son 10 yılda ise karbon nanotüp (CNT) aerogeller, grafen aerogeller (aerografen), karbonitrit aerogeller, silikon aerogeller, organik aerogeller ve biyolojik aerogellerle çalışmalar yapılmaya başlanmıştır [8,11] <https://www.graphene-info.com/>.

Aerogellerin genel özellikleri aşağıdaki şekilde özetlenebilir:

- Düşük ısı iletkenliği,
- Düşük dielektrik sabiti,
- Düşük ses iletim hızı,
- Yüksek özgül yüzey alanı,
- Yüksek kırılma indisi değeri,
- Düşük bağıl yoğunluk ve
- Yüksek gözeneklilik [12]

Tablo 1. Aerogellerin Fiziksel Özellikleri [8,10]

Aerogellerin Fiziksel Özellikleri	
Yoğunluk	0,003 – 0,35 g/cm <sup>3</sup>
Hava Boşluğu Oranı	%85- %99
Spesifik Yüzey Alanı	600- 1200 m <sup>2</sup> /g
Katı oranı	% 0,13 – %15
Ortalama Gözenek Çapı	~ 20 nm

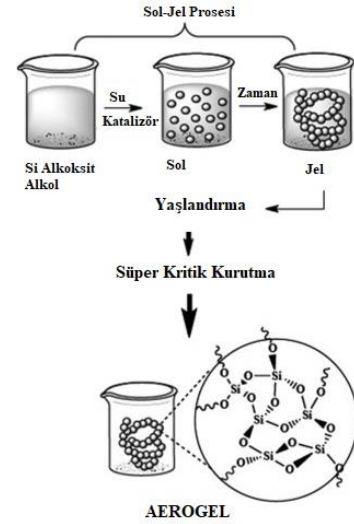
## 2.2. Aerogel Üretimi

Aerogellerin üretimi sol-jel tekniği kullanılarak sentezlenmesi yoluyla gerçekleşmektedir. Sol-jel tekniğine bakıldığında genel olarak metal alkoksitlerin veya inorganik tuzların hidroliz ve kondenzasyon proseslerinden oluştuğu görülür [13].

Aerogel sentezinde üç önemli basamak bulunmaktadır (Şekil 2).

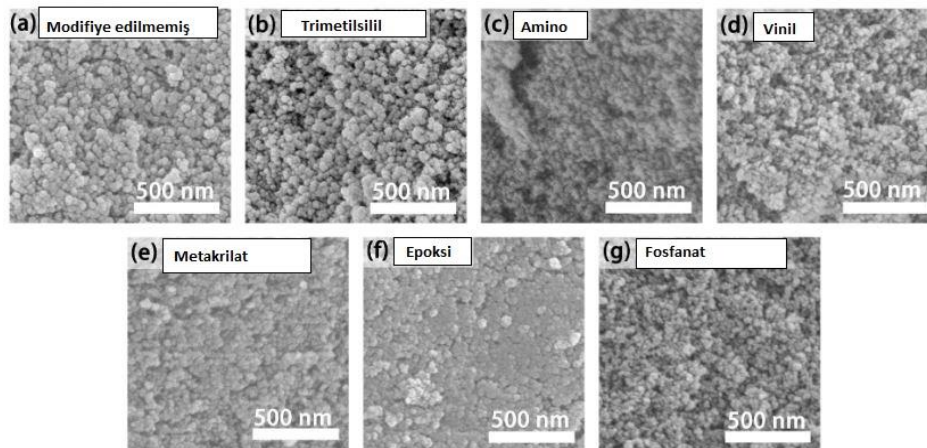
1. **Jel Oluşumu:** Aerogel üretiminin ilk basamağında sol hazırlanarak, katalizör eklenmesiyle birlikte jel formu elde edilmektedir. Bu aşamada metal alkoksitler ve metal tuzları gibi başlatıcılar belirli oranlarda su ve asit çözeltisinde bir araya getirilerek, proses için belirlenen sıcaklıklarda karıştırılarak bir solüsyon haline dönüştürülürler. Elde edilen solüsyon içerisinde ard arda gerçekleşen birçok kimyasal reaksiyon sonucunda bir ağ yapısı oluşur. Bu ağ yapısı zamanla büyüyerek sistem içerisindeki bütün noktalara ulaşarak blok bir yapı (jel) meydana getirir. Elde edilen jeller; dağıtıcı ara maddesine göre hidrojel, aquajel, alkojel ve aerogel olarak isimlendirilmektedir [14].
2. **Yaşlandırma:** Aerogellerin sentezlenmesi sırasında sağlamlığının artırılması için ortam basıncında yaşlandırma işlemi uygulanmaktadır. Yaşlanma işlemi esnasında elde edilen aerogelin katılık ve mukavemet değeri artmakta ve jel bağları kuvvetlenmektedir. Artan yaşlandırma süresi ve sıcaklığı ile, ortamdaki kurutulmuş jeller için doğrusal büzülme ve yığın yoğunluğu azalır, gözenek boyutu ve gözenek hacmi artmaktadır [15, 16].
3. **Çözücü Uzaklaştırma (Kurutma):** Son aşama olan üçüncü basamak kurutma işleminde; jel içerisindeki sıvıyı uzaklaştırırken yığılmasını engellemek, jel iskeletinin yapısal formunu korumak ve bu esnada oluşabilecek büzülme en az düzeye indirmeyi sağlamak amaçlanmaktadır. Kurutma aşamasında, süper kritik kurutma, atmosferik basınçta kurutma, dondurarak kurutma ve mikrodalga ile kurutma gibi farklı yöntemler kullanılabilir. En çok kullanılan yöntem olarak süper kritik kurutma olup, uygulanan kurutma sıcaklık ve basıncı kullanılan çözücüye ait kritik sıcaklık ve basınçtan daha yüksek olmalıdır. Kritik basınçlar genel olarak 50-100

atm aralığında ve kritik sıcaklıklar ise 300-600 °C aralığında nispeten yüksek değerlere sahip olduğundan kullanılan çözücülerin çoğu bu şartlarda tehlikeli, patlayıcı ve yanıcı özellik göstermektedir. Bu nedenle süperkritik kurutma adımı yüksek güvenlik önlemleri gerektirmektedir [17]. Aerogel üretim aşamalarında; jelin sentezlenmesi, yaşlandırılması ve kurutma aşamasındaki parametrelerin değişimi ile aerogel yüzey alanı ve gözenek boyutu değişebilir. Gözenek büyüklüğünün küçülmesi ile birlikte kırılmaya olan duyarlılık da artar, daha kırılabilir yapılar oluşur [18].



Şekil 2. Aerogel oluşum süreci [19]

Aerogellerin sentezlenmesinde başlatıcı madde olarak kullanılan malzemelerin ve katalizörlerin türü, pH değerleri ve kurutma sıcaklığı gibi farklı parametrelerin seçimi ile üretilen aerogeller çok farklı özellikler göstermektedirler [20]. Ayrıca, aerogellerin farklı kimyasallarla modifiye edilmesi ile farklı özelliklerde aerogeller elde edilmektedir. Şekil 3'te modifiye edilmemiş ve organo-modifiye edilmiş silika aerogellere ait taramalı elektron mikroskobu görüntüleri verilmiştir. Modifiye işlemleri ile birlikte aerogellerin gözenek büyüklükleri, partikül büyüklükleri değişim göstermektedir.



Şekil 3. Modifiye edilmemiş ve organo-modifiye edilmiş silika aerogellere ait taramalı elektron mikroskobu görüntüleri [21]

Akademik olarak farklı başlangıç maddeleri ve üretim yöntemleri ile birçok ürün elde edilmiş olsa da dünyadaki ticari ölçekli olarak üretim yapan firma sayısı 50'nin altındadır. En fazla üretici firma Amerika ve Çin'de bulunmaktadır. Aerogellerin 2018 yılı pazar payı 581,2 milyon USD olmakla birlikte 2025 yılında bu pazarın yaklaşık 2 kat artarak 958,8 milyon USD olması beklenmektedir. Çin menşeli üreticiler özellikle bu pazarda daha uygun fiyatlı ürünler sunmaya başlamıştır. Türkiye'de bilinen tek aerogel üreticisi Yalteksan isimli firma olup, diğer birçok firma aerogel içeren keçe formunda yalıtım malzemesi veya granülleri ithal ederek satışını yapmaktadır [22]. Ticari boyutta aerogel üretebilen veya üretme yolunda ilerleyen başlıca firmalar Tablo 2'de özetlenmiştir.

### 2.3. Aerogellerin Sınıflandırılması ve Silika Aerogeller

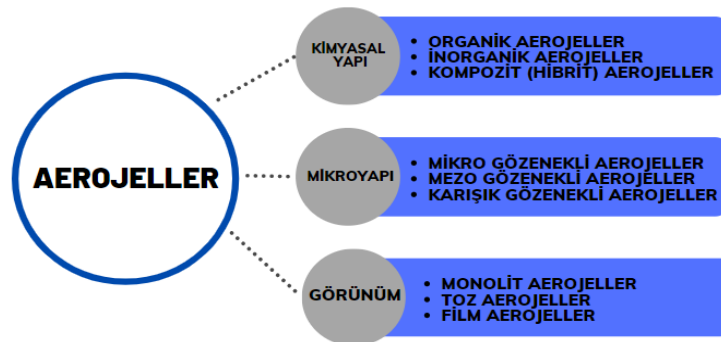
Aerogeller farklı mikroyapıda, görünümde ve kimyasal yapılarda elde edilebilmektedirler. Bu nedenle de literatürde mikroyapılarına, kimyasal yapılarına ve görünümüne göre sınıflandırılmaktadır. Görünüm açısından şekil ve boyutlarına göre monolit, toz ve film olmak üzere sınıflandırılırlar. Mikroyapısına yapısına

bağlı olarak da üç kategoriye ayrılmaktadırlar: mikro gözenekli aerogeller (2 nm), mezogözenekli aerogeller (2-50 nm) ve karışık gözenekli aerogeller olarak değerlendirilirler. Aerogeller kimyasal yapılarına göre ise üç gruba ayrılır: inorganik aerogeller, organik aerogeller ve kompozit aerogeller. Bunlar metalik alkoksit veya metal tuzları gibi inorganik öncü bileşenlerden türetilen inorganik aerogeller. formaldehit fenol reçinesi gibi organik öncü ürünlerden üretilen organik aerogeller ve hem inorganik hem de organik öncülerin bir karışımı ile üretilen kompozit(hibrit) aerogellerdir[23].

• **İnorganik Aerogeller:** İnorganik aerogeller metal alkoksitlerin nitratların ve kloritlerin polikondenzasyonundan sentezlenen çapraz bağlı ve şeffaf hidrojellerden sentezlenmektedirler. Oksitlerin yüksek erime noktaları ve ortam şartlarında oksitlenmemeleri sayesinde sentezlenen aerogeller genel olarak iyi bir termal stabiliteye sahiptir. Bu grupta yer alan oksit aerogeller arasında silisyum dioksit (SiO<sub>2</sub>), zirkonyum dioksit (ZrO<sub>2</sub>), titanyum dioksit (TiO<sub>2</sub>) bazlı aerogeller ön plandadır, ancak İnorganik aerogeller içerisinde en fazla bilinen ve tercih edilen türü dayanıklılığı yapıyla silika aerogellerdir[24]

Tablo 2. Aerogel Üreticileri

NO	FİRMA ADI	MENŞEİ	WEB SİTESİ
1	Active Aerogels Lda.	Portekiz	www.activeaerogels.com
2	Aerogel Technologies LLC	Amerika	www.aerogeltechnologies.com
3	Aerosafe Global (American Aerogel) Corp.	Amerika	www.aerosafeglobal.com
4	Aspen Aerogel	Amerika	www.aerogel.com
5	BASF SE	Almanya	www.basf.com
6	Cabot Corporation	Almanya /Amerika	www.cabotcorp.com
7	Dow Corning	Amerika	www.dow.com
8	Enersens SAS	Fransa	www.enersens.eu
9	Green Earth Aerogel Technologies (GEAT)	İspanya	www.green-earth-aerogel.com
10	JIOS Aerogel Corporation	Güney Kore	www.jiosaerogel.com
11	Keye Aerogels	İspanya	www.keye-aerogel.com
12	Marketech International Inc.	Amerika	www.mkt-intl.com
13	Nexaero	İsviçre	www.nexaero.com
14	Swenska Aerogel	İsveç	www.aerogel.se
15	Taasi Corporation	Amerika	www.taasi.com/adv.htm
16	Tiem Factory Inc.	Japonya	www.tiem.jp
17	Yalteksan Yal. Tek. Sav. Sanayi A.Ş.	Türkiye	www.yalteksan.com.tr
18	Guangdong Alison Hi-Tech Co. Ltd	Çin	www.ydalison.com



Şekil 4. Aerogellerin sınıflandırılması

• **Organik Aerojeller:** Karbon bazlı arojeller bu sınıfta yer alıp, genellikle amorf nanokarbon yapılar içerirler, ancak bunun yanında karbon nanotüpler (CNT'ler), grafen, grafen oksit gibi nanoyapılarla da elde edilirler. Amorf karbon arojelleri genellikle organik polimer maddelerin karbonizasyonu ile oluşturulurken, CNT'ler, grafen ve GO arojelleri genellikle bu nanomalzemeleri iskelet yapı taşları olarak kullanan koloidal yöntemlerle hazırlanmaktadır. Genel olarak, karbon bazlı arojellerin ön plana çıkan özellikleri ise elektriksel olarak iletken olmaları ile asit ve alkali korozyonuna karşı oldukça dirençli olmalarıdır. Karbon arojeller inert, zehirsiz ve çevre dostudur. Bu özelliklerinin yanı sıra farklı deneysel uygulamalarda gözenek yapısı optimize edilebilmesi mümkün olduğundan, son zamanlarda bilim adamlarının dikkatini üzerine toplamayı başarmıştır. Karbon arojeller dışında organik arojeller grubunda organik polimerlerden elde edilen arojellerde yer almaktadır. Resorsinol-formaldehit (RF), poliimid, aramid ve polibenzoksazin (PBO) gibi organik polimer arojeller genellikle monomerlerin polimerizasyonu yoluyla elde edilir. Poliimid ve aramid bazlı organik polimer arojeller oldukça iyi esneklik sergiler. Bununla birlikte, polimer arojeller genellikle yayıf termal stabiliteye sahiptirler. İpek fibroin, nanoselüloz, kitosan ve aljinat gibi biyopolimerden elde edilen arojeller (biyopolimer arojeller/biyokütleli arojeller) ise doğal ham madde kaynaklarından ekstrakte edilen biyokütlelerin çapraz bağlama reaksiyonları ile sentezlenmektedirler. Biyopolimer arojelleri genellikle çok iyi biyobozunurluğa ve biyoyuymuluğa sahiptirler[14,24].

• **Kompozit/Hibrit Aerojeller:** Kompozit arojeller organik polimerler ve inorganik maddelerin birarada kullanıldığı, jel oluşum prosesi esnasında farklı başlatıcılar kullanılarak elde edilmektedir. Kompozit arojeller, mükemmel yapılar için sentezlenmektedirler. Literatür çalışmalarının çoğunlukla kompozit yapılar üzerine yoğunlaşmakta olduğu görülmektedir[25].

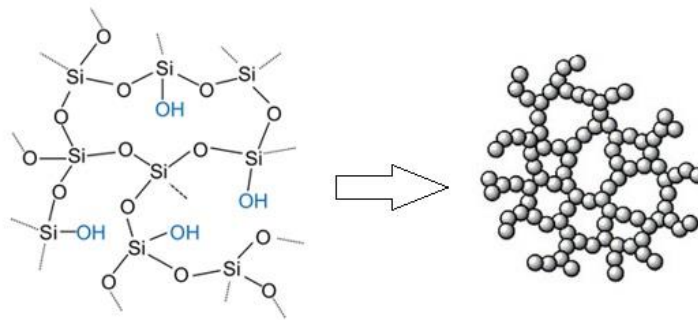
Aerajeller çevresel etkileri incelendiğinde; çevresel yük kaynaklarının üretimlerinde kullanılan hammaddelere ve kurutma yöntemine bağlı olarak değiştiği görülmektedir. Biyopolimer arojelleri arojeller içerisinde hammadde açısından en çevreci arojeller olarak görülmektedirler. En yaygın kullanılan üretime sahip olan silika arojellerin çevreci ve toksik olmaması da kullanım alanını arttırmaktadır. Organik arojeller; yapılarında

formaldehit veya fenol furfural alkol gibi kompleks yapılar içerdiğinden havayı ve suyu kolayca kirletebilmektedirler. Aerojellerin sentezlenmesinde en yüksek çevresel etkinin kurutma işleminden geldiği belirtilmektedir. Aerojellerin çevresel etki değerlendirme çalışmalarında özellikle süper kritik kurutma ve süper kritik altı kuruma üzerine yoğunlaşıldığı görülmektedir. Çalışmalarda kritik altı kurutma kullanılarak elde edilen arojellerin, genel olarak süper kritik arojellere göre daha düşük çevresel etkilere sahip, daha çevreci bir yöntem olduğu sonucuna ulaşılmaktadır[26].

• **Silika Aerojeller:** En iyi ısı yalıtım değeri ve kolay üretilirliği nedeniyle en fazla üretilen arojel sınıfı silika arojellerdir. Silika arojeller yüksek gözeneklilik, yüksek yüzey alanı, yüksek ısı yalıtım değeri, çok düşük yoğunluk, düşük kırılma katsayısı, düşük dielektrik sabiti gibi üstün özelliklere sahip nano yapı malzemelerdir (Şekil 5).

Silika arojellerin üretiminde kullanılan maddelerin doğada kolaylıkla bulunabilen maddeler olması, üretilirlik yönünden avantaj sağlayarak üretimi ekonomik hale getirmekte, böylelikle endüstriyel olarak daha yaygın kullanım alanı bulmasına olanak sağlamaktadır. Silika arojeller çok düşük katı silika miktarına sahiptir ve bu durum düşük ısı iletim katsayısına ve dolayısıyla daha az bir ısı iletimine neden olur. Elde edilen bu özelliklerinden dolayı arojeller birçok farklı sektörde kullanım alanı bulmaktadır. Aerojeller Şekil 6'da da görüldüğü üzere yalıtım, inşaat, kimya, elektronik, biyomedikal, tarım, filtrasyon, tekstil alanlarında birçok farklı uygulamada kullanılmaktadırlar. Bu sebeple silika arojellerin üretimi birçok araştırmanın temelini oluşturmaktadır [12,20,27].

Silika arojellerin avantajları yanında dezavantajları da vardır. Bakıldığında en önemli dezavantajı; yüksek nano gözeneklilik ve düşük yoğunluk sebebiyle kırılma ve mukavemetin düşük olmasıdır. Buna bağlı olarak doğrudan ısı yalıtım malzemesi olarak kullanılamamaktadır. Diğer bir dezavantajı da yüzeyden yansıyan ışınların bir kısmının emici yüzeyden uzaklaşmasıdır. Ayrıca, sıcaklık arttığında ısı iletiminin ön plana çıkması ile arojelin yalıtım özelliği kötü etkilenmektedir [9, 28].



Şekil 5. Örnek silika arojel molokül ve ağ yapısı

Ayrıca silika aerogeller yapı olarak, hidrofobik, oleofilik veya hidrofilik yapıda elde edilebilmektedirler[28]. Üretim sırasında aerogel yapısı içerisindeki silanol (Si-OH) gruplarının varlığı hidrofilitenin asıl kaynağıdır. Çünkü bu gruplar suyun yapıya girişini desteklemektedir. Süper kritik kurutmanın düşük sıcaklıklarda gerçekleşmesinde ise yüzeyde hidroksil grupları (-OH) oluşur ve aerogel hidrofilik yapıda elde edilir. Hidrofobik aerogeller ise farklı yöntemlerle elde edilebilirler. Yüksek sıcaklıkta süper kritik kurutma yüzey hidroksil gruplarının çözücü ile reaksiyona girmesini ve yapıda metoksi gruplarının (-OCH<sub>3</sub>)X oluşumunu sağlar. Bu şekilde aerogel hidrofobik özellik kazanır[29]. Burada genel olarak trimetilklorasiloksan veya heksametildisiloksan yapılarından gelen metil grupları hidrofobik yapıyı oluşturmaktadır [30]. Aerogellerin hidrofobikliğinin artırılması için uygulanan farklı yöntemler bulunmaktadır: Aerogelin hidrofobik karakteri üretim adımlarından sol-jel adımıyla sililasyon ajanı ilave edilmesi ile artırılabilir. Bu yöntem ortam basıncında kurutma yönteminde kullanılmaktadır. Diğer bir yaklaşım ise hidrofobikliği arttırmak için kurutmadan sonra aerogel yüzeyinin modifikasyonudur. Hidrofilik aerogellerin yüzeyi, gaz halindeki metanol ile reaksiyona sokularak değiştirilebilmektedir. Hidrofobik grupların aerogellere yüzey modifikasyonu yoluyla graft edilmesi ise hidrofobik aerogel elde edilmesi için uygulanan yöntemler arasındadır. Li ve arkadaşları tarafından gerçekleştirilen çalışmada trimetilsilil ve vinil grupları ile graft edilen silika aerogellerin temas açılarının 90°'den yüksek olduğu görülmüştür [21]. Üretim sırasında solvent ile yapı içerisinde metoksi (-OCH<sub>3</sub>)x grupları oluşuyorsa aerogel hidrofobik yapıda olmaktadır[29].

Kullanım yerine göre şeffaf görünüm istenen ve suyun aerogellerin boşluklarını doldurmasını istenmediği (su iticilik istenen) uygulamalar yapılacaksa hidrofob özellikli silika aerogeller tercih

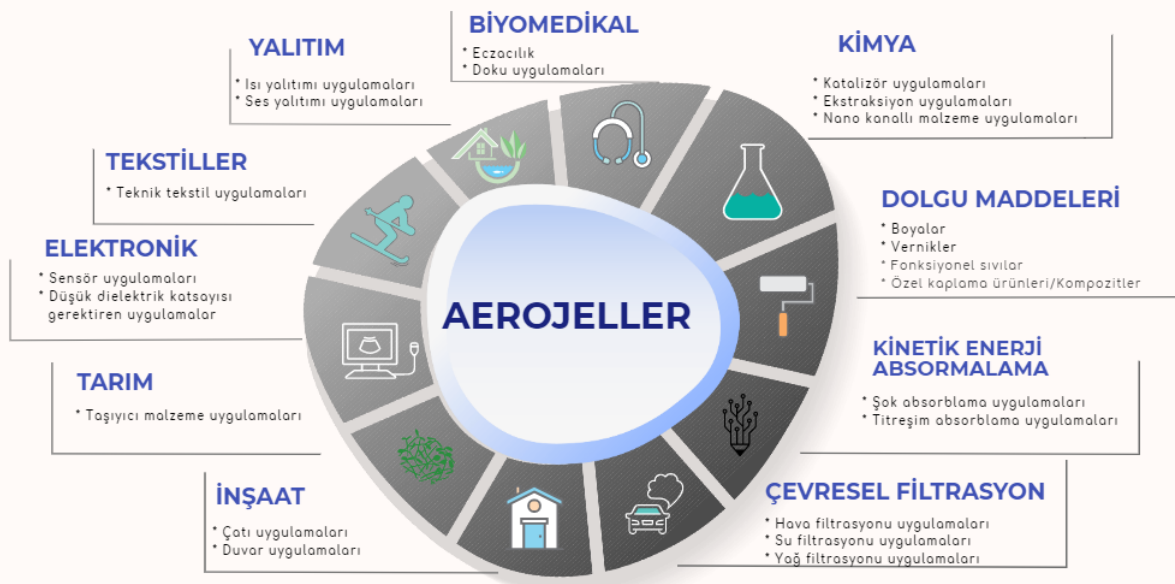
edilmektedir [31]. Bu tür aerogeller genellikle deniz sularındaki yağ kalıntılarının temizlenmesi başta olmak üzere hidrofob özellik beklenen yerlerdeki uygulamalarda kullanılmaktadır.

#### 2.4. Aerogellerin Isı ve Ses Yalıtım Özellikleri

Bir malzemenin “ısı yalıtım malzemesi” olarak isimlendirilebilmesi için CEN ve ISO standartları gereği ısı iletim katsayısı ( $\lambda$ ) değerinin 0,065 W/mK'den daha küçük olması gerekmektedir. Buna bağlı olarak 0,065 W/mK değerinin altındaki malzemeleri ısı yalıtım malzemesi, üzerinde olan malzemeler de yapı malzemesi olarak tanımlanmaktadır[32, 33]. Bir ısı yalıtım malzemesinde; ısı iletim katsayısı ile ısı geçişi (ısı direnci) arasında ters orantı bulunmaktadır. Isıl iletim katsayısı değeri ne kadar küçükse, ısı geçişine gösterilen direnç o kadar yüksek olmaktadır. Buna göre ısı iletim katsayısı değeri düştükçe daha iyi ısı yalıtımı elde edilmektedir[34].

2000'li yıllardan sonra malzeme teknolojilerindeki gelişmelerle birlikte endüstriyel olarak üretilebilen oldukça düşük ısı iletim katsayısına sahip yalıtım malzemeleri ortaya çıkmıştır. Bu malzemeler süper ısı yalıtım malzemesi olarak tanımlanmaktadırlar. Daha çok cam yünü, taş yünü ve strafor gibi ısı iletim katsayısı düşük olan geleneksel malzemeler binalarda ısı kayıplarını azaltmak için kullanılmaktadırlar [35,36].

Aerogeller yüksek gözeneklilikleri ve aynı zamanda gözeneklerinin nano boyuta sahip olmasıyla ilgili olarak havanın ortalama yarı değerine kadar düşük ısı iletim değerine sahiptirler. Tablo 3'de silika aerogel ile seçilmiş bazı malzemelerin ısı iletim katsayıları verilmiştir[2, 6, 37].



Şekil 6. Aerogellerin Kullanım Alanları

**Tablo 3.** Malzemelerin ısı iletim katsayıları [2, 6, 37]

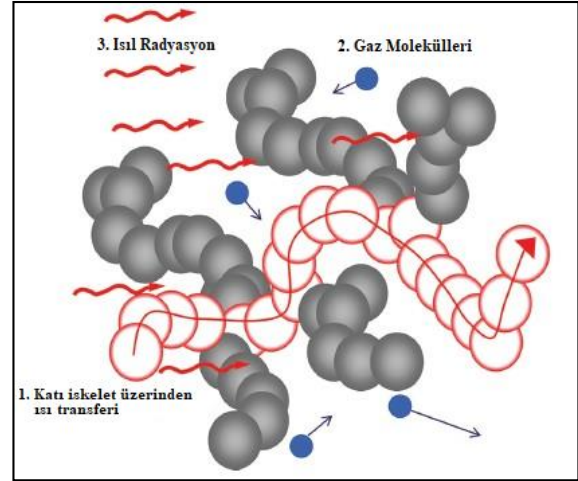
Malzeme	Isıl İletkenlik Katsayısı (W/(mK))
Hava	0,026
Silika Aerogel	0,018
Taş Yünü	0,04
Cam Yünü	0,038
E- Cam İğne Matı	0,045
Extrüde Polistiren (XPS)	0,03
Poliüretan Köpük	0,024
Cellular Camı	0,024
Perlit Tabaka (Genleştirilmiş)	0,045

Aerojellerin ısı iletim mekanizmalarının temel olarak; a) katı iskelet üzerinden kondüksiyonla ısı iletimi, b) gaz fazı üzerinden kondüksiyonla ısı iletimi, c) partiküller ve boşluklar üzerinden radyasyonla ısı iletimi prensiplerine dayalı olduğu görülmektedir (Şekil 7)[38].

- Katı iskelet üzerinden kondüksiyonla ısı iletimi:** Aerojelin ağ yapısından kaynaklı olarak katı iskelet üzerinde düşük ısı iletkenliğine neden olan oldukça dolambaçlı bir iletim yolu bulunmaktadır. Buna bağlı olarak ısı iletiminin katı iskelet üzerinden artmasına sağlayan en önemli faktör aerogelin yoğunluğudur. Yoğunluk arttıkça malzeme içerisindeki katı faz artmakta boşluk azalmakta ve ısı iletimi artmaktadır. Buradan hareketle yoğunluğu düşük ve hacmi fazla olan aerojeller ısı yalıtım açısından daha etkindirler.
- Gaz fazı üzerinden ısı iletimi:** Aerojellerin yapısında katı olarak bulunmayan alanlar nano boyuttaki boşlukları oluşturmaktadırlar. Aerojellerin yapısında bulunan bu boşluklarda eğer vakum altında değilse hava bulunmaktadır. Havanın normal koşullarda bu boşluklarda hareket etmesi ve ısı iletimi sağlaması beklenmektedir. Ancak aerojeller gaz moleküllerinin hareket edebilmesi için gerekli minimum yollardan daha küçük yollara (nanogözeneklere) sahiptirler. Bu nedenle nanogözenekler hava geçişine izin vermeyerek havanın hareketini kısıtlamakta bu nedenle de gaz fazı üzerinden ısı iletimi sınırlı kalmaktadır. Bu nedenle aerogelin ısı iletim katsayısı ( $\lambda$ ) havadan daha düşüktür[39].
- Radyasyon ile ısı iletimi:** Aerojeller 3-8  $\mu\text{m}$  aralığındaki kızılötesi dalga boyunda neredeyse saydamlaşırlar. Bu da yüksek sıcaklıkta önemli ölçüde artan termal iletkenliğe yol açmaktadır. Radyasyonla ısı iletiminin temelinde aerojellerin küçük kütle, büyük yüzey alanına sahip olmaları bulunmaktadır. Aerojellerin saydamlaşması sonucunda artan radyasyonla ısı iletimini azaltmak üzere opaklaştırıcı katkı malzemelerinin (SiC, TiO<sub>2</sub> ve C) kullanılmasına yönelik çalışmalar bulunmaktadır. Düşük sıcaklıklarda önemli bir etki sağlamazken yüksek sıcaklıklarda radyasyon ile ısı iletimi baskın bir faktör haline gelmektedir[38, 39].

Aerojellerin bir diğer önemli özelliği iyi bir ses yalıtım malzemesi olmasıdır. Ses yalıtımı açısından aerojeller incelendiğinde aerojellerin yapılarındaki nano boyutlu boşluklara hava molekül-

lerinin hapsolmesi ile birlikte hava akışı gerçekleşmemekte, buna bağlı olarak da hava molekülleri hareket edememektedir. Bu durumda en iyi yalıtım malzemesi olan hava moleküllerinin aerojeller arasında sıkışması ile hem ısı yalıtımı, hem de ses dalgalarının geçişine minimum düzeyde izin verilmesi ile ses yalıtımı sağlanmasına da olanak vermektedir[40]. Aerojellerin ses yalıtım kapasitesi büyük ölçüde; malzeme hazırlama yöntemi, aerogelin yoğunluğuna ve gözenek yapısına bağlıdır[41].

**Şekil 7.** Aerojel içinde ısı aktarımı temel prensipleri[38]

Aerogel türleri arasında silika tipi aerojeller diğer türlere göre daha yüksek ses yalıtımı sağlamaktadır. Kuvars cam malzemeler 5000 m/s ses hızına sahipken silika aerojellerdeki ses hızı 100-300 m/s aralığında olup inorganik katılar içindeki en düşük değerdir [42]. Aerojellerin ses yalıtım özellikleri ile ilgili yapılan çalışmalarda, ses yalıtım özelliğinin ısı yalıtım özelliği önüne geçemediği görülmektedir. İnşaat sektöründe hem ses yalıtımı hem de ısı yalıtım özelliklerini bir arada sağlaması büyük bir avantajdır. İnşaat dışında ses yalıtımı amaçlı iç mimaride, otomotiv sektöründe ve beyaz eşya sektöründe katma değerli ürünlerin geliştirilmesine olanak sağlamaktadır. Ancak burada diğer ses yalıtım malzemelerine göre maliyetli olması ve mekanik özelliklerinin zayıf olması dezavantaj oluşturmaktadır.

#### 4. AEROJELLERİN TEKSTİL MATERYALLERİNE UYGULAMALARI

Tekstil materyallerinin katma değeri yüksek fonksiyonel ürünler haline dönüştürülmesi sırasında uygulanan farklı yöntemler bulunmaktadır. Bu yöntemler tekstil materyallerinin yapılarına, kullanılan katkı maddelerine, yardımcı kimyasallara ve uygulama alanlarına göre değişiklik göstermektedir. İncelenen çalışmalarda da aerojellerin tekstil materyallerine farklı özellikler sağlaması için uygulanan farklı yöntemler bulunmaktadır. Uygulanan en yaygın yöntemlerden biri dokusuz yüzeyler içerisinde aerojellerin elde edilmesidir. Bu yöntem sonucunda aerogel içeren keçe formlarında ticari yalıtım ürünleri üretilmektedir. Üretilen aerogel keçeler özellikle bina ısı yalıtımında, yüksek sıcaklık altında çalışan bazı üretim makineleri ile ısı iletim hatlarının yalıtımında



yaygın kullanım alanı bulmaktadır. Bunların dışında ise çarpıcı bir örnek olarak NASA tarafından geliştirilen özel uzay giysilerinde aerogellerin kullanıldığından bahsedilmektedir. Farklı bir alan olarak sadece yeni bir kaynaktan dağcılık sporunda kullanılan botlarda kullanımına rastlanmıştır. North Face firması tarafından satışa sunulan "Verto S8K" model botlarda uzay elbiselerindeki aerogel teknolojisinin kullanıldığı ve yüksek irtifalardaki çok düşük sıcaklıklarda bile ayakları sıcak tuttuğu belirtilmektedir [43].

Yerli üreticilerden Yaltekstan firması Levron markası ile önemli bir kısmı askeri uygulamalarda kullanılmak üzere silika aerogel nano kompozit keçe üretimi yapmaktadır. Aerogel malzemeler granül/toz haline getirilerek mikro boyutlarda parçacık halinde nonwoven kumaşlar içerisine püskürtme veya dağıtma/serpme (scattering) yöntemi ile dolgu olarak uygulanmaktadır. Üretilen keçelerin kalınlıkları 5-20 mm aralığında değişmektedir. Elde edilen keçelerin ısı iletim katsayıları 0,022-0,026 W/mK aralığında olup, -200 °C ile +650 °C arasında etkinlik göstermektedir. Keçelerin gözenekliliği ise %90-95'tir [44].

Ticari kullanımlara diğer bir örnek ise Radford Üniversitesi'nde bulunan Dedmon Center Yüzme Havuzu çatısına yapılan uygulamadır. Çatıda iki kat PTFE kumaş arasında Cabot firmasından tedarik edilen Lumira adı verilen aerogel katkı malzemeleri kullanılmıştır. Böylece ultra yüksek ısı yalıtımının elde edildiği ve aynı zamanda iç ortama ışık geçişinin de engellenmediği belirtilmektedir. Kompozit yapının kalınlığı 50 mm'den az olup, orijinal çatının ısı yalıtım performansının üç katından daha fazla yalıtım etkisine sahiptir. Isı geçirgenlik katsayısı 0,47 W/m<sup>2</sup>K ve %3,5'lik doğal ışık geçirgenlik değeri sağlanmıştır. Bu şekilde çatının değişimi ile yıllık enerji maliyetinde 91.000 USD'lik tasarruf ve karbon ayak izinde de 900.000 kg CO<sub>2</sub> azalması beklendiği belirtilmiştir[45].

Literatürde yer alan akademik çalışmalarda ise 1930'dan bu yana aerogellerin geliştirilmesi ile ilgili birçok araştırmanın olduğu görülmektedir. Çalışmaların büyük çoğunluğu yapılan araştırmaların hızlandığı 1990'dan sonraki döneme aittir. Tekstil malzemelerine aerogellerin uygulanması ile ilgili çalışmalar ise genel olarak 2000 yılından sonra artmaya başlamıştır. Tekstil alanındaki akademik çalışmaların genel olarak nonwoven yüzeylere aerogellerin depolanmasına yönelik olduğu görülmektedir[46]. Tekstil kumaşları üzerine emdirme ve kaplama yöntemi ile uygulamaya yönelik araştırmalar ise oldukça sınırlıdır.

Aerogellerin doğrudan kumaş üzerine emdirilmesi yöntemini Jin ve arkadaşları araştırmıştır. Çalışmada Cabot firmasına ait 7-11 µm partikül büyüklüğünde aerogeller kütlece %5 oranında kullanılmıştır. Aerogeller aseton çözeltisinde dağıtılarak itfaiyeci kıyafetlerine apre işlemi ile aktarılmıştır. Ardından aerogellerin toz olarak dağılmasını engellemek için apre işlemi uygulanan kumaşların her iki tarafı da PTFE kumaş ile lamine edilmiştir. Çalışmada kumaş üzerine aktarılan aerogel oranlarına (add-on) ve laminasyon uygulanıp uygulanmamasına göre yanma değerleri kıyaslanmıştır. Elde edilen kumaşların alev ısı geçişi ile ilgili ISO

9151 testi ısı akış yoğunluğu 80 kW/m<sup>2</sup> olacak şekilde gerçekleştirilmiştir. Laminasyon uygulanmayan kumaşa göre laminasyon uygulanan kumaşların bu testten geçtiği görülmüştür. Aynı zamanda kumaşların LOI değerleri de karşılaştırılmış ve kumaşlara aktarılan aerogel miktarı arttıkça yanma için gereken LOI değerinin de arttığı sonucu paylaşılmıştır [47].

Prevolnik ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmanın temeli silika aerogel içeren dokusuz yüzey kumaşların polyester çözgütlü örme kumaşlarla laminasyonu üzerinedir. Yapılan çalışmada silika aerogel içeren keçe ve polyester çözgütlü örme kumaş hava geçirgenliği bulunan membranla birbirine lamine edilmiştir. 5 katmana sahip laminasyonlu yapı iyi mekanik özellikleri olan, aşınmaya karşı yüksek dayanımlı, hidrofobik ve oleofobik bir malzemedir. Aynı zamanda iyi ısı yalıtım özelliğine sahiptir. Çalışmada kullanılan silika aerogel dokunun ısı iletim katsayısı 0.013-0.016 W/mK aralığındayken lamine ürünün ısı iletim katsayısı 0,0474 W/mK değerindedir. Çalışma sonucunda elde edilen yapının klasik ısı yalıtımında kullanılan neoprene göre daha yüksek ısı yalıtımı sağladığı belirtilmektedir. Elde edilen lamine yapının bir dezavantajı olarak daha ağır ve aynı zamanda rijit olduğu belirtilmiştir. Çalışmada ayrıca silika aerogellerin kullanım sırasında ezilme eğiliminde olduğu ancak belirli bir süre kullanımdan sonra daha yumuşak ve daha esnek hale geldiklerine vurgu yapılmıştır. Elde edilen silika aerogel lamine yapının uyku tulumları, dış mekan tekstilleri, kişisel koruyucu tekstiler gibi teknik tekstil alanlarında kullanıma uygun olduğu öne sürülmüştür[48].

Shaid ve arkadaşları tarafından itfaiyeci giysilerinin termofizyolojik özelliklerini geliştirmek üzere akrilik-yün karışımı kumaşlara süper hidrofobik aerogeller uygulanmıştır. Uygulama sonrası hava ve nem geçirgenliği, ısı transferi gibi termofizyolojik konfor testleri yapılmıştır. Çalışmada 230 g/m<sup>2</sup> birim ağırlığa sahip %65/35 akrilik-yün karışımı kumaşa Cabot firmasından tedarik edilen Nanogel isimli aerogeller %2, %4 ve %8 olmak üzere akrilik binder kullanılarak kaplama yapılmıştır. Kaplanan kumaşlar 105 °C sıcaklıkta 10 dakika süreyle kurutma ve fiske işlemine tabi tutulmuştur. Kaplama işlemi sonrası kumaşların birim ağırlıkları, kalınlıkları, hava geçirgenlikleri ve ısı iletim katsayıları ölçülmüştür. Ölçümler sonucunda aerogel kaplanmış kumaşların daha iyi hava geçirgenlik değerlerine sahip olduğu görülmüştür. Isı yalıtımı için ise sadece %2 katkılı kumaşın ısı iletim katsayısı ölçülmüştür. Kör kaplama ile kıyaslandığında %68'lik bir iyileşme olduğu sonucuna varılmıştır. Kullanılan uygun kıvamlaştırıcının ise nem geçirgenliğini olumlu yönde etkilediği belirtilmiştir[49].

Razzaghi ve arkadaşları fenolik aerogellerin polyester keçelerde ısı yalıtımı amaçlı kullanılmasına yönelik bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Çalışmanın amacı süper kritik kurutmaya alternatif bir aerogel üretme yönteminin araştırılmasıdır. Çalışmada 1,5 mm kalınlığında hazır polyester keçe içerisine aerogel elde edilmesi amaçlanmıştır. Çalışmada jel yapısının elde edilmesi için öncelikle ağırlıkça farklı oranlarda novolac reçinesi ve 2-propanol içeren sol çözeltisi hazırlanmıştır. Sol çözeltisi içeren polyester

keçe polipropilen bir kalıp içerisinde otoklava yerleş-tirilmiştir. Otoklavın kapağı sıkıca kapatılarak fırın içerisinde yerleştirilerek 5 saat 120°de tutulmuştur. Bu süresinin ardından fırının ortam sıcaklığına düşmesi beklenerek numunenin kalıptan ayrılması sağlanmıştır. Numune polyester keçe üzerinde oluşan novolak jeller, büyük miktarlarda çözücünün hızlı bir şekilde uzaklaştırılmasından kaynaklanacak olan çatlamının önlenmesi için ortam koşullarında kurutulmuştur. Daha sonra, eş zamanlı kürlenmesi ve çözücünün tamamının uzaklaştırılması için numuneler; 90°C'de 24 saat ve 120°C'de 24 saat işlem görmek üzere fırına yerleştirilmiştir. İşlemlerin sonucunda farklı kütle oranlarında aerajeller elde edilmiştir. Elde edilen aerajel-keçe yapıların ısı iletim katsayıları sıcak plaka (hot-plate) yöntemi ile ölçülmüştür. Çalışmada hiç aerajel içermeyen keçe ile aerajel içeren keçeler karşılaştırıldığında aerajel elde edilmesi sırasında kullanılan solvent-reçine oranının oldukça önemli olduğu görülmüştür. Çalışmada en düşük ısı iletim katsayısına %85-%15 oranında ulaşılmıştır. Çözeltideki reçine miktarı arttıkça oluşan aerajellerde gözeneklilik azalmakta bu nedenle de ısı iletkenliği de artmaktadır. Aerajel içermeyen numunelerin (0,0676 W/mK), %70-%30 solven-reçine oranı ile elde edilen aerajelli numunelere (0,0921 W/mK) kıyasla ısı iletim katsayılarının daha düşük olduğu görülmüştür[50].

Yüksek ısı yalıtımına sahip hafif kumaşlar elde edilmek üzere Jabari ve arkadaşları hazırladıkları aerajel-PVC karışımı kaplama patlarını polyester kumaşlar üzerine bıçak kaplama yöntemi ile uygulamışlardır. Aerajel-PVC kompozit için farklı türlerde plastisoller, pasta kimyasalı, stabilizatör, titanyum dioksit ve renklendirici kullanılmıştır. Aerajel oranı ise kullanılan kimyasal ağırlığının %0, %2, %3 ve %4'ü olmak üzere ilave edilmiştir. Gerçekleştirilen çalışmalar sonucunda %4 katkılı kaplama patı ile de en düşük ısı iletim katsayısına sahip kumaş elde edilmiştir. Ağırlıkça %5 aerajel ilave edilmesi sırasında kaplama patının viskozitesi çok yükseldiğinden kaplama yapılamadığı belirtilmiştir. Bu nedenle çalışma %4 aerajel katkısına kadar yapılabilmektedir[51].

Masera ve arkadaşları mevcut binaların ısı yalıtımları için süper yalıtkan aerajel esaslı tekstil duvar kâğıdının geliştirilmesi üzerine bir sistem elde etmek üzere çalışma yapmıştır. Sistem aerajel ile emprenye edilmiş yalıtım katmanını oluşturan tekstil katmanı ve kolayca yapıştırılıp değiştirilebilen bir kumaş yapı-dan oluşturulmuştur. Çalışmada aerajellerle uyumlu olması açısından yaklaşık 6 mm kalınlığında polyester güç tutuşur nonwoven keçe seçilmiştir. Düşük yoğunluğa, yüksek gözenek-liliğe ve düşük ısı iletkenliğine sahip silika aerajeller kumaşa aktarılmıştır. Nonwoven yüzey arasındaki boşluklar aerajel ile doldurulmuştur. Arkasından tekstil kumaş yapıları polietilen tozunun yapıştırıcı etkisinden yararlanılarak lamine edilmiştir. Böylece 3 katmanlı bir lamine yapı elde edilmiştir. Elde edilen lamine yapıların ısı iletkenliği ölçülmüştür. Başlangıçta elde edilen aerajel içeren dokusuz yüzeyin ısı iletim katsayısı 0,025 W/mK iken 3 katlı lamine yapının ısı iletim katsayısı 0,035 W/mK'dir. Gerçekleştirilen çalışma sonunda elde edilen ürün patentlenmiştir[52].

Bhuiyan ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada kimyasallara karşı koruyucu kıyafetlerin konfor özelliklerinin geliştirilmesi amaçlanarak %100 pamuklu kumaşlar üzerine poliüretan ve silika aerajellerin kaplanması araştırılmıştır. Kaplama işleminde su bazlı poliüretan %40-70 oranlarında, Cabot firmasından temin edilen 100-1200 mikron aralığındaki silika aerajeller kullanılmıştır. Çalışmada aerajel tozları reçete içerisindeki binder oranının %0,5, %1, %2 ve %3'ü olacak şekilde kaplama patına eklenmiştir. Kaplama işlemi pasta olarak bıçak kaplama yöntemiyle uygulanmıştır. Kaplanan numunelerin FTIR analizlerinde sadece poliüretan ile kaplanmış numunelerin spektrumları ile aerajel katkılı kaplanmış numunelerin spektrumları arasında fark olmadığı görülmüştür. Bu benzerliğin kumaş üzerinde dağıtılmış olan aerajel partiküllerinin pamuk lifleri veya poliüretan binder ile herhangi bir bağ yapmadığını gösterdiği belirtilmiştir. SEM görüntülerinde ise sadece poliüretan kaplanmış olan pamuk kumaşlarda liflerin tüm aralıklarının tamamen binder ile dolduğu ve pürüzsüz bir yüzey elde edildiği görülmüşken, aerajel katkılı kaplanmış kumaş yüzeylerinde aerajel partiküllerinin agregasyonu sonucu pürüzlülük oluştuğu görülmüştür. Su geçirgenliği test sonuçlarında kaplanmış kumaşların hidrofobik aerajel ve yapısı gereği hidrofobik olan poliüretan ile birlikte daha fazla hidrofobik yüzey olması beklenmiştir. Ancak sadece poliüretan kaplanmış numunelerin temas açılarının aerajel katkılı kaplamalardan daha yüksek olduğu görülmüştür. Bu duruma ise aerajel katkılı kaplama yüzeylerinin pürüzlülüğünün neden olduğu düşünülmüştür. Isıl direnç ölçümünde ise pamuğun ısıl direnci-nin poliüretandan düşük olması nedeniyle kör kaplamada kaplanmamış numuneye göre daha düşük ısıl direnç bulunmaktadır. Ancak aerajel katkı oranı arttıkça pamuktan daha yüksek ısıl direnç elde edildiği ve ısı iletim katsayısının düştüğü görülmüştür. Kaplanmamış numune ile %3 konsantrasyonda aerajel ile kaplanan numunelerin ısı yalıtımları birbirlerine oldukça yakındır. Konsantrasyon %4'e çıktığında kaplanmış kumaşın, kaplanmamış pamuk kumaşa göre daha yüksek ısıl dirence sahip olduğu görülmüştür[53].

Altay ve arkadaşlarının gerçekleştirdiği çalışmada dış giyimde kullanılan %100 polyester çözgülu örme kumaş üzerine çalışılmıştır. Su ve kir iticilik özellikleri sağlanmak üzere Aspen Aerogels firmasından temin edilen silika aerajel hazır pasta ve silika aerajel binder ile 5 farklı konsantrasyonda hazırlanan çözeltiler oda sıcaklığında emdirme yöntemiyle uygulanmıştır. Emdirme işleminin ardından 100 °C sıcaklıkta 10 dakika kurutma ve fikse yapılmıştır. Kumaşların emdirme işlemi sonunda %1,3 ağırlık artışı hesaplanmıştır. Elde edilen kumaş-ların kimyasal karakterizasyonu için FTIR, termal karakterizasyonu içinse DSC analizleri gerçekleştirilmiştir. DSC sonuçların-da aerajelin termal iletkenlik üzerine etkisinin oldukça az olduğu görülmüştür. Bunun nedeninin çok az miktarda aerajelin kumaşa aktarılmış olması ile ilgili olduğu belirtilmiştir. Ayrıca elde edilen kumaşlara su iticilik ve kir iticilik testleri yapılmış, bu özelliklere aerajellerin iyi yönde bir katkı sağladığı vurgulanmıştır. Kumaşların 170° temas açısına sahip süper hidrofobik yüzeyler olduğu sonucuna ulaşılmıştır. En iyi test sonuçlarının en yüksek aerajel konsantrasyonuna sahip çalışmada olduğu belirtilmiştir[54].

Aerojellerin elektromanyetik kalkanlamaya etkisinin araştırılması amacıyla Wang ve arkadaşları pamuklu kumaş üzerine su bazlı poliüretan binder yardımıyla indirgenmiş grafen oksit – karbon nanotüp aerojelleri kaplama yöntemiyle uygulamışlardır. Çalışmada öncelikle grafen oksit (GO) modifiye Hummel metodu ile toz formunda elde edilmiştir. Diğer yandan karbon nanotüplerin yüzey aktivasyonunun ve suda dağılılabirliğinin artırılması amacıyla karbon nanotüplere(CNTs) yüzey modifikasyon işlemleri uygulanmıştır. Her iki işlemin ardından indirgenmiş grafen oksit -karbon nanotüp aerojeller (rGO-CNTs) elde edilmiştir. Aerojellerin elde edilmesinde belirli oranlarda grafen tozu ve CNTs deiyonize suya iyi bir dağılma sağlaması için polivinilpirolidon de kullanılarak üretilmiştir. Hem grafen oksitin hem de modifiye edilmiş CNT'lerin kenar bölgelerinde bulunan birçok oksijen içeren fonksiyonel gruplar bulunmak-tadır. Bu gruplar elektromanyetik kalkanlama özelliğinin sağlan-masında önemli bir etken olan iletkenliği büyük ölçüde etkile-mektedir. Elde edilen rGO-CNTs aerojeller belirli kalınlığa sahip plaka şeklindedir. Bu plakanın ölçüleri ile aynı ölçülerde pamuklu kumaş deiyonize suda sodyum hidroksit ve silikon bazlı düşük köpük oluşumu sağlayan ajan (köpük kesici) ile ön işlemden geçirilerek hazırlanmıştır. Hazırlanan kumaş belirli oranlarda su bazlı poliüretan binderle kaplanarak üzerine aynı ölçülerde daha önce elde edilen rGO-CNTs aerjel plaka yerleş-tirilmiştir. Elde edilen kompozit yapı üzerine aerojellerin tahriba-tının önlenmesi amacıyla yeniden su bazlı poliüretan binder ile kaplanmıştır. Su bazlı poliüretan binderin katılaşmasının sağlan-ması amacıyla üretilen kompozit kumaş vakumlu fırında 60 C'de 12 saat kurutularak nihai ürün elde edilmiştir. Gerçekleştirilen deneylerden elde edilen kompozit kumaşlar alan emisyonlu taramalı elektron mikroskobu kullanılarak karakterize edilmiştir. Elektromanyetik kalkanlama etkinliği, elektrik iletkenliği, kompozit yapıda kumaş-aerjel yüzeylerinin birbirlerinden ayrılma özelliğinin test edilmesi amacıyla ultrafonik işlem ve hava geçirgenliği testleri uygulanmıştır. Karakterizasyon çalışmaları elde edilen aerjel yapısının kullanılan CNTs miktarından etkilendiği görülmüştür. Az miktarda kullanılan CNTs, aerjelin gözenek boyutunu küçültmeye ve böylece elektromanyetik kalkanlama etkinliğini iyileştirmeye yardımcı olmaktadır. Fazla CNTs miktarlarında ise aerjelin 3 boyutlu yapısının zarar verdiği görülmüştür. Elektromanyetik kalkanlama özelliğinin GO:CNTs oranının 7:3 'ten daha yüksek olduğu durumlarda yani CNTs'lerin oranının yükselmesi ile aerjelin etkinliğinin azaldığı belirtilmiştir. Kompozit yapı incelendiğinde birim alana uygulanan su bazlı poliüretan binder miktarı arttıkça birim ağırlığında arttığı gözlemlenmiştir. Kullanılan poliüretan binderin oranının azalması ile kompozit kumaş üzerindeki yapıların birbirlerinden ayrılmaları daha kolay olmaktadır. Polüretan binder miktarı arttıkça daha güçlü tutunma sağlanmaktadır. Kompozit kumaşın hava geçirgenliği açısından düşük geçirgenliğe sahip olduğu, binder miktarı ile ters orantılı olduğu belirtilmiştir. Gerilme ve patlama mukavemetlerinin poliüretan binderin yapıya dahil edilmesiyle arttığı gözlenmiştir. Kompozit kumaşın yüzey direnci, artan aerjel miktarı ile birlikte düşmektedir. Grafen ve CNT'ler tarafından oluşturulan iletken ağ, elektromanyetik kalkanlama gerekliliklerine uygun bir şekildedir ve artan aerjel miktarıyla

aerjel gözenekli ağda yapısı içinde daha iletken bir yol oluşmakta böylece kumaş yüzey direnci azalmaktadır. Toplam elektromanyetik kalkanlama etkisinin incelenmesinde kompozit kumaşa, artan aerjel miktarı nedeniyle kalkanlama özelliğinin sürekli olarak arttığı gözlemlenmiştir. Aerjel ağırlık yüzdesi %27'nin üzerinde olduğunda, X-bandında 34 dB'den fazla iyi elektromanyetik kalkanlama değeri elde edilerek sivil gereksinim olan 20 dB'lik elektromanyetik kalkanlama etki değerinin oldukça üstüne çıkmıştır[55].

## 5. SONUÇ

Aerojeller üstün performans özelliklerine bağlı olarak birçok alanda kullanıma açık olan yenilikçi malzemelerdir. Aerojellerin ön plana çıkan özellikleri yalıtım özellikleridir. Küresel ısınmayla birlikte hem bireylerin hem de endüstrinin ısı yalıtımı ihtiyacının artacağı, enerji verimliliğinin ön planda olacağı göz önüne alındığında teknik tekstiller kategorisinde değerlendirilen aerojellerin yakın gelecekte önemli bir yere sahip olması beklenmektedir. Ancak günümüzde aerojeller üstün özelliklerinin yanında diğer yalıtım malzemelerine göre daha yüksek maliyetlidirler. Aynı zamanda aerojellerin termal iletkenliği, aynı sıcaklıktaki durgun havanınkinden bile daha düşük olduğundan, aerojeller süper termal yalıtkan malzemelerden biri olarak kabul edilirler ancak nano gözenekli yapılarına bağlı olarak amorf bölgelerinin fazlalığı zayıf mekanik özellik göstermelerine sebep olmaktadır. Örneğin polimer köpük malzemeleri ile kıyaslandığında saf silika aerojellerin çekme mukavemetinin önemli ölçüde daha düşük olduğu görülmektedir. Bu nedenle, aerjel malzeme araştırmalarındaki mevcut çalışmalar; öncelikle üretim maliyetlerini düşürmeye ve malzemenin mekanik özelliklerini iyileştirmeye yöneliktir[56,57]. Tekstil sektöründe özellikle ısı yalıtımı gerektiren endüstriyel makinaların yalıtımı, pencerelerden ısı kayıplarının azaltılması için perdelerde yalıtım, güç tutuşur kıyafetler, spor kıyafetleri, itfaiyeci kıyafetleri alanlarında kullanımın artacağı öngörülmektedir.

Aerojellerin diğer ticari ve akademik uygulama alanlarına bakıldığında çalışmaların uygulama alanları arasında; ileri teknolojiye sahip ürünlerin üretimi, ileri teknolojiye sahip ürünlerin yalıtımı, uydu yalıtımı, NASA ve CERN çalışmaları ile çeşitli bilimsel araştırmalar, yalıtım özellikli boya üretimi, hava araçlarının yalıtım sistemi ve kabin yalıtımı, IR, RF, çoklu kamuflej sistemleri, balistik uygulamalar, tıp ve eczacılık, kozmetik sektörleridir [22]. Aerjel üretimi konusundaki bilimsel çalışmalar hız kesmeden devam ederken bu konuda ticarileşme yolunda ilerleyen firma sayısının da artış gösterdiği incelenen yayınlanmış pazar araştırması raporlarında yer almaktadır. Raporlarda 2021 yılı itibari ile aerjel üretimi üzerine yatırım yapan veya bu yöndeki yatırımları ile artık daha fazla ön plana çıkan firma sayısında da artış olduğu görülmektedir[22]. Aerojellerin yakın gelecekte gelişen teknolojiler ve üretiminin artmasıyla maliye-tinin düşmesi ve kullanımının yaygınlaşması beklenmektedir[58-60].

**TEŞEKKÜR**

*Yazarlar bu çalışmada 328-FDK -2021 numaralı "Aerocel Kaplama Yöntemi ile Yüksek Isı Yalıtımlı Kumaş Yapılarının Geliştirilmesi" konulu Bilimsel Araştırma Projesi kapsamında sunduğu maddi desteğinden dolayı Bursa Uludağ Üniversitesi'ne teşekkürlerini sunar.*

**KAYNAKLAR**

- Manasoglu, G. Kanık, M. (2021) Investigation of thermal and solar properties of perlite coated woven fabrics, *J Appl Polym Sci*, 2021;e51543. doi: 10.1002/app.51543
- Koebel, M. Rigacci, A. Achard P. (2012) Aerogel-based thermal superinsulation:an oweview, *J. Sol-Gel Sci Technology*, 63, 315-339. doi: 10.1007/s10971-012-2792-9
- Arslan M. A. ve Aktaş M. (2018) İnşaat sektöründe kullanılan yalıtım malzemelerinin ısı ve ses yalıtımı açısından değerlendirilmesi, *Politeknik Dergisi*, 21(2): 299-320.
- Bayraktar, D. Bayraktar, E. A. (2016) Mevcut Binalarda Isı Yalıtımı Uygulamalarının Değerlendirilmesi, *Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Fen Bilimleri Enst. Dergisi*, 7(1), 59-66.
- Ke, Y. Wang, F. (2018) Warmth without the weight, *Engineering of High Performance Textiles*, Miao, M., Xin, J.H., United Kingdom: Woodhead Publishing. doi: 10.1016/B978-0-08-101273-4.00008-1
- Caps R. Fricke J. (2004) Aerogels for Thermal Insulation. In: Aegerter M.A., Mennig M. (eds) *Sol-Gel Technologies for Glass Producers and Users*. Springer, Boston, MA. doi: 10.1007/978-0-387-88953-5\_46
- Venkataraman, M. Mishra, R. Militky, J. Hes, L. (2014). Aerogel Based Nanoporous Fibrous Materials for Thermal Insulation, *Fibers and Polymers*, 15/7, 1444-1449, 1-9. doi: 10.1007/s12221-014-1444-9
- Yücel, S. Karakuzu, B. Temel, T. M. (2016) Aerocel: Üstün özellikleri, Çeşitleri ve Gelişen Uygulama Alanları, *TURKCHEM*, 52-64.
- Yeşildal, B. B. (2002) Enerji Korunumu Açısından Dış Duvarlarda Saydam Yalıtım Kullanımının İrdelenmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, İstanbul Teknik Üniversitesi.
- TUBİTAK, (2021) Dünyanın En Hafif Katsı: Aerocel. Erişim Adresi: <https://e-dergi.tubitak.gov.tr/edergi/yazi.pdf?dergiKodu=4&cilt=41&sayi=618&sayfa=60&yaziid=26385> (Erişim Tarihi: 2.07.2021)
- Nanokar Nano Teknolojik Çözümler, (2020). Grafen aeroceller. Erişim Adresi: <https://www.nanokar.com.tr/kategori/grafen-aeroceller>. (Erişim Tarihi: 14.12.2020)
- Venkataraman, M. Mishra, R. Kotresh, T. M. Militky, J. Jamshaid, H (2016) Aerogels for thermal insulation in high-performance textiles, *Textile Progress*, 48:2, 55-118. doi: 10.1080/00405167.2016.1179477
- Cantürk Öz D, Öz B, Kaya N (2018) Alümina aerocellerin fiziksel özellikleri üzerine yaşlandırma ve kurutma süresinin etkisi, *BAU Fen Bil. Enst. Dergisi*, 20(1), 198-211.
- Kesik, M. A. (2019), Hidrofobik Silika Aerocel Eldesinde Kullanılan Kimyasalların Etkisi, *Yüksek Lisans Tezi*, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Metal Dünyası (2022). Dünyanın En hafif Katı Malzemesi: Aeroceller, <https://www.metaldunyasi.com.tr/tr/guncel/69/dunyanin-en-hafif-kati-malzemesi-aeroceller.html> (Erişim Tarihi: 03.05.2022)
- 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.
- Getir, Ş. (2019) Monolitik Silika Aerocel Eldesi ve Karakterizasyonu, *Yüksek Lisans Tezi*, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Projack, (2019) <http://www.projack.net/aerogel/> (15.11.2019)
- Maleki, H. Duraes L. Portugal, A. (2014) An overview on silica aerogels synthesis and different mechanical reinforcing strategies, *Journal of Non-Crystalline Solids*, 385 (2014) 55-74. doi: 10.1016/j.jnoncrsol.2013.10.017
- Yılmaz, Y. (2013) Farklı başlangıç maddeleri kullanılarak sol-jel yöntemiyle monolitik silika aerocel ve silika aerocel sentezi ve karakterizasyonu, *Yüksek Lisans Tezi*, Yıldız Teknik Üniversitesi.
- Li, Z. Zhao, S. Koebel, M. M. Malfait, W. J. (2020) Silica aerogels with tailored chemical functionality. *Materials & Design*, 193, 108833. doi: 10.1016/j.matdes.2020.108833
- Research and Markets, (2021) Global Aerocel Market 2021-2025. Erişim Adresi: <https://www.researchandmarkets.com/reports/5311466/global-aerocel-market-2021-2025#rela0-5003332> (Erişim Tarihi: 6.02.2021)
- Moheman, A., Bhawani, S. A., Tariq, A., (2021), Aerogels for waterborne pollutants purification, *Advances in Aerocel Composites for Environmental Remediation*, Elsevier, 2021,p. 109-124.
- Feng, J., Su, B., Xia, H., Zhao, S., Gao, C., Wang, L., Ogbeide, O., Feng, J., Hasan, T. (2021), Printed aerogels: chemistry, processing, and applications, *Chem. Soc. Rev.*, 2021, 50, 3842-3888. DOI: 10.1039/c9cs00757a.
- Alwin, S., Shajan, X. S. (2020), Aerogels: promising nanostructured materials for energy conversion and storage applications, *Materials for Renewable and Sustainable Energy*. DOI:10.1007/s40243-020-00168-4.
- Pinto, I., Silvestre, J. D., Brito, J., Júlio, M. F. (2020), Environmental impact of the subcritical production of silica aerogels, *Journal of Cleaner Production* 252 (2020) 119696. doi: 10.1016/j.jclepro.2019.119696.
- Hrubesh, L. W. (1998) Aerocel applications, *Journal of Non-Crystalline Solids*, 225, 335-342.
- Xie, T. He, Y. Hu, Z. (2013) Theoretical study on thermal conductivities of silica aerocel composite insulating material, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 58, 540-552. doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2012.11.016
- Dorcheh, A. S. Abbasi, M. H. (2008) Silica Aerocel; Synthesis, Properties and Characterization, *Journal of Materials Processing Technology*, 199, 10-26. doi: 10.1016/j.jmatprotec.2007.10.060.
- He, S. Huang, Y. Chen, G. Feng, M. Dai, H. Yuan, B. Chen, X. (2019) Effect of heat treatment on hydrophobic silica aerocel, *Journal of Hazardous Materials*, 362, 294-302. doi: 10.1016/J.JHAZMAT.2018.08.087
- Aerocel, (2020). Silica Aerocel. Erişim Adresi: <http://www.aerocel.org/?p=16> (Erişim Tarihi: 20.02.2020)

32. TS EN 13171, (2010) Isı yalıtım mamulleri-Binalarda kullanılan-Fabrika yapımı odun lifli (wf) mamuller-Özellikler, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
33. TS 825, (2009) Binalarda Isı Yalıtım Kuralları, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
34. Bayrakçı, H. C. Davraz, M. Başpınar, E. (2011) Yeni Nesil Isı Yalıtım Malzemesi: Vakum Yalıtım Panel, *Süleyman Demirel Üniversitesi Teknik Bilimler Dergisi*, 1(2) 1-12.
35. Temiz, H. Olgar, K. (2017) Doğal ve Yapay Liflerden Üretilen Panellerin Yalıtım Özelliklerinin Araştırılması, *Karaelmas Fen ve Müh. Dergisi*, 7(2), 608-618.
36. Yaman, Ö. Şengül, Ö. Selçuk, H. Çalikuş, O. Kara, İ. Erdem, Ş. Özgür, D. (2015) Binalarda Isı Yalıtımı ve Isı Yalıtım Malzemeleri, *Türkiye Mühendislik Haberleri (TMH)*, 487, 62-75.
37. Eas Fibers, (2019). Insulation materials thermal conductivity coefficients. Erişim Adresi: <http://tr.eas-fiberglass.net/news/Silica-Aerogel-Insulation-Blanket.html> (Erişim Tarihi: 07.04.2019)
38. Ebert, H. P. (2015) Functional materials for energy-efficient buildings, *EPJ Web of Conferences*, 98, 08001. doi: 10.1051/epjconf/20159808001.
39. Dai, Y. J., Tang, Y. Q., Fang, W. Z., Zhang, H., & Tao, W. Q. (2018). A theoretical model for the effective thermal conductivity of silica aerogel composites. *Applied Thermal Engineering*, 128, 1634-1645.
40. Mazrouei-Sebdani, Z. Begum, H. Schoenwald, S. Horoshenkov, K. V. Malfait, W. J. (2021) A review on silica aerogel-based materials for acoustic applications, *Journal of Non-Crystalline Solids*, 562 (2021) 120770. doi: 10.1016/j.jnoncrysol. 2021.120770.
41. Jichao, W. Jun, S. Xingyuan, N. Bo, W. Xiaodong, W. Jia, L. (2010) Acoustic Properties of Nanoporous Silica Aerogel, *Rare Metal Materials And Engineering*, Vol.39, Suppl.2. doi: 10.1016/j.jnoncrysol.2021.120770
42. Gronauer, M. Kadur, A. Fricke, J. (1986) Mechanical and acoustic properties of silica aerogel, J. Fricke (Ed.), *Aerogels*, Springer, Berlin, 1986, 167-173, doi: 10.1007/978-3-642-93313-4\_1.
43. North Face, (2019). Verto S8K model botlar. Erişim Adresi: <https://www.thenorthface.com/shop/mens-vert0-s8k>. (Erişim Tarihi: 29.03.2019)
44. Yalteksan, (2019) Levron aerogel ürünleri. Erişim Adresi: <http://yalteksan.com.tr/levron-aerogel/> (Erişim Tarihi: 15.05.2019)
45. Cabot Aerogels, (2018). Aerogel Particles. Erişim Adresi: <http://www.cabotcorp.com/solutions/products-plus/aerogel/particles> (Erişim Tarihi: 07.02.2018)
46. Du, A. Zhou, B. Zhang, Z. Shen, J. (2013) A Special Material or a New State of Matter: A Review and Reconsideration of the Aerogel, *Materials*, 6, 941-968. doi: 10.3390/ma6030941
47. Jin, L. Hong, K. Yoon, K. (2013), Effect of Aerogel on Thermal Protective Performance of Firefighter Clothing, *Journal of Fiber Bioengineering and Informatics*, 6:3- 315-324. doi: 10.3993/jfbi09201309
48. Prevolnik, V. Zrim, P. K. Rijavec, T. (2014) Textile technological properties of laminated silica aerogel blanket, *Contemporary Materials*, V:1, 117-123. doi: 10.7251/COMEN1401117P
49. Shaid, A. Fergusson, M. Wang, L. (2014) Thermophysiological comfort analysis of aerogel nanoparticle incorporated fabric for fire fighter's protective clothing, *Chemical and Materials Engineering*, Vol. 2 (2), 37-43. doi: 10.13189/cme.2014.020203
50. Razzaghi, M. Raeisi, H. R. Bahramian, A. R. (2015) Improvement of Polyester Blanket Thermal Insulator Properties Using Phenolic Aerogel, *Procedia Materials Science*, 11, 522 – 526. doi: 10.1016/j.mspro.2015.11.017
51. Jabbari, M. Dan, A. Skrifvars, M. Taherzadeh, J.M. (2015) Novel lightweight and highly thermally insulative silica aerogel-doped poly(vinyl chloride)-coated fabric composite, *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, Vol.34(19), 1581-1592. doi: 10.1177/0731684415578306
52. Maseraa, G. Wakili, K. G. Stahl, T, Brunner, S. Galliano, R. Monticelli, C. Aliprandi, S. Zanelli, A. Elesawy, A. (2017) Development of a super-insulating, aerogel-based textile wallpaper for the indoor energy retrofit of existing residential buildings, *Procedia Engineering*, 180, 1139 – 1149. doi: 10.1016/j.proeng. 2017.04.274
53. Bhuiyan, M. A. R. Wang, L. Shaid, A. Shanks, A.R. Ding, J. (2019) Polyurethane-aerogel incorporated coating on cotton fabric for chemical protection, *Progress in Organic Coatings*, 131, 100-110. doi: 10.1016/j.porgcoat.2019.01.041
54. Altay, P. Atakan, R. Atav R. (2021) Silica Aerogel Application to Polyester Fabric for Outdoor Clothing, *Fibers and Polymers* 2021, Vol.22, No.4, 1025-1032. doi: 10.1007/s12221-021-0420-4
55. Wang, P. Liu, S. Zhang, M. Pan, Z. Wu, G. Li, F. Zhang, A. Huimin, L. (2021) Preparation And Properties Of Reduced Graphene Oxide-Carbon Nanotubes Aerogel/Cotton Flexible Composite Fabric With Electromagnetic Shielding Function, *Journal of Industrial Textiles*, Vol. 0(0) 1-16. doi: 10.1177/152808372111060879
56. Liao, Y., Wu, H., Ding, Y., Yin, S., Wang, M., & Cao, A. (2012). Engineering thermal and mechanical properties of flexible fiber-reinforced aerogel composites. *Journal of sol-gel science and technology*, 63(3), 445-456. doi: 10.1007/s10971-012-2806-7
57. Koebel, M. M., Huber, L., Zhao, S., & Malfait, W. J. (2016). Breakthroughs in cost-effective, scalable production of superinsulating, ambient-dried silica aerogel and silica-biopolymer hybrid aerogels: from laboratory to pilot scale. *Journal of Sol-Gel Science and Technology*, 79(2), 308-318. Doi: 10.1007/s10971-016-4012-5.
58. 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. DOI: 10.1016/j.rser.2014.03.017
59. Smirnova, I. Gurikov, P. (2018) Aerogel production: Current status, research directions, and future opportunities, *The Journal of Supercritical Fluids*, 134, 228-233. doi: 10.1016/j. supflu. 2017.12.037
60. IMARC, (2020). Aerogel Market: Global Industry Trends, Share, Size, Growth, Opportunity and Forecast 2020-2025. Erişim Adresi: <https://www.imarcgroup.com/aerogel-market> (Erişim Tarihi: 20.05.2020)