



**VOLKANİK TÜF ATIKLARINDAN SİLİKA AEROJEL
SENTEZİ VE YÜKSEK TERMAL YALITIM
ÖZELLİKLERİ İÇİN ALÇI ESASLI KOMPOZİTLERDE
DEĞERLENDİRİLMESİ**

Baraka CIZA

**Yüksek Lisans Tezi
İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı
Dr. Öğr. Üyesi Ömer CAN
2021
(Her hakkı saklıdır)**

T.C.
BAYBURT ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

**VOLKANİK TÜF ATIKLARINDAN SİLİKA AEROJEL SENTEZİ VE YÜKSEK
TERMAL YALITIM ÖZELLİKLERİ İÇİN ALÇI ESASLI KOMPOZİTLERDE
DEĞERLENDİRİLMESİ**

(Silica Aerogel Synthesis From Volcanic Tuff Wastes and Its Utilization into Plaster Based
Composites for High Thermal Insulating Properties)

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Baraka CIZA

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Ömer CAN

Bayburt
Ocak, 2021

KABUL VE ONAY TUTANAĐI

Dr. Öğr. Üyesi Ömer CAN danışmanlığında, 182002010 numaralı Baraka CIZA tarafından hazırlanan “Volkanik Tüf Atıklarından Silika Aerogel Sentezi Ve Yüksek Termal Yalıtım Özellikleri İçin Alçı Esaslı Kompozitlerde Değerlendirilmesi” adlı bu çalışma 21.01.2021 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Programında Yüksek Lisans Tezi olarak oy birliği ile başarılı kabul edilmiştir.

Başkan : Doç. Dr. Mustafa ÇULLU

İmza:

Jüri Üyesi : Doç. Dr. Süleyman GÖKÇE

İmza:

Jüri Üyesi : Dr. Öğr. Üyesi Ömer CAN

İmza:

Bu tezin Bayburt Üniversitesi Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliği'nin ilgili maddelerinde belirtilen şartları yerine getirdiğini onaylarım.

...../...../.....

Doç. Dr. Fatih GÜRBÜZ

Enstitü Müdürü

ETİK VE BİLDİRİM SAYFASI

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “Volkanik Tüf Atıklarından Silika Aerojel Sentezlenmesi Ve Isı Yalıtımlı Alçı Bazlı Kompozitlerde Kullanılması” başlıklı çalışmanın tarafımdan bilimsel etik ilkelere uyularak yazıldığını ve yararlandığım eserleri kaynakçada gösterdiğimi beyan ederim.

... / ... / 2021

İmza

Baraka CIZA

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmamda beni yönlendiren danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Ömer CAN'a teşekkür ederim. Bayburt Üniversitesi Mühendislik Fakültesi çalışanlarına, özellikle yardımları için Dr. Öğr. Üyesi İbrahim Hakkı KARAKAŞ, Doç. Dr. Hacı Süleyman GÖKÇE, Doç. Dr. Mustafa ÇULLU, Arş. Gör. Nurullah ÖKSÜZER ve Arş. Gör. Bilal TAYFUR'a teşekkürlerimi sunuyorum. Tezimin her aşamasında manevi olarak beni yalnız bırakmayan kardeşim Aliah MUGISHA ve Arş. Gör. Şeyda Büşra ATALAN'a yürekten teşekkür ederim.

Bu tez çalışmasını, bilim insanı olmamı isteyen rahmetli babama ve dualarıyla yanımda olduğunu hissettiren sevgili anneme adıyorum.

Baraka CIZA

Ocak / 2021

ÖZ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

VOLKANİK TÜF ATIKLARINDAN SİLİKA AEROJEL SENTEZİ VE YÜKSEK TERMAL YALITIM ÖZELLİKLERİ İÇİN ALÇI ESASLI KOMPOZİTLERDE DEĞERLENDİRİLMESİ

Baraka CIZA

Ocak 2021, 66 sayfa

İnşaat sektörü, en çok enerji tüketen ilk üç sektörden biridir. Yapı sektörü tarafından tüketilen enerjinin büyük bir kısmı (%51) ısıtma ve soğutma amaçlıdır. Yüksek enerji tüketimine yol açan, bu toplam enerjinin yaklaşık %70'inin bina zarfında kaybolmasıdır. Bu nedenle yapı sektörünün enerji tüketimini ve nispi karbondioksit emisyonunu azaltmak amacıyla inşaat sektörü, yüksek ısı yalıtım özelliklerine sahip yapı malzemeleri üretimi ile ilgili araştırmalara ilgi duymuştur. Bu kapsamda, mevcut çalışmada uygun fiyatlı Silika Aerojel, sol-jel yöntemi ve ortam basınçlı kurutma kullanılarak volkanik tüf atıklarından sentezlenmiştir. Sentezlenmiş Silika Aerojel tozunun yapısal ve morfolojik özellikleri XRD ve BET analizleri kullanılarak incelenmiştir. Silika Aerojel alçı esaslı kompozitlerin mekanik, fiziksel ve ısı iletkenlik özellikleri uygun standartlara göre belirlenmiştir. Bu çalışma sonucunda, istenen özelliklere sahip Silika Aerojelin, sol-jel yöntemi ve ortam sıcaklığında kurutma kullanılarak volkanik tüf atıklarından başarıyla sentezlenebileceği tespit edilmiştir. Bu çalışma sonucunda, istenen özelliklere sahip Silika Aerojelin, sol-jel yöntemi ve ortam sıcaklığında kurutma kullanılarak volkanik tüf atıklarından başarıyla sentezlenebileceği tespit edilmiştir. Sentezlenen Silika Aerojelin, 662,9876 m²/g BET yüzey alanına ve 0,9096 cm³/g toplam gözenek hacmine sahip olduğu belirlendi. Ayrıca, sentezlenmiş Silika Aerojel tozunun sıvaya (hacimce %50) katılmasının, 0,76 g/cm³ kadar düşük bir yoğunluğa, 0,069 W/mK kadar düşük bir ısı iletkenlik değerine ve 1,22 MPa'lık bir basınç dayanımı değerine sahip kompozitler ile sonuçlandığı bulunmuştur.

Anahtar Kelimeler: Volkanik tüf, Silika Aerojel, alçı sıva.

ABSTRACT

MASTERS DISSERTATION

SILICA AEROGEL SYNTHESIS FROM VOLCANIC TUFF WASTES AND ITS UTILIZATIONS INTO PLASTER BASED COMPOSITES FOR HIGH THERMAL INSULATING PROPERTIES

Baraka CIZA

January 2021, 66 pages

The building sector is one of the top three highest energy consuming sectors. A great part of the energy consumed by the building sector (at 51%) serves the purposes of heating and cooling. Leading to high energy consumption is the fact that about 70% of this total energy is lost through the building envelope. Hence with the aim of reducing the energy consumption of the building sector and its relative carbon dioxide emission, the construction sector has been interested in researches on the production of construction materials having high thermal insulating properties. In this scope, affordable silica aerogel was synthesized from volcanic tuff wastes by employing a sol-gel method and ambient pressure drying in the present study. The potential usability of the as-synthesized silica aerogel powder in the construction sector for the production of construction materials with enhanced thermal insulation properties was investigated by incorporating it into plaster based composites at various vol % ratios (25%, 50% and 75%). structural and morphological properties of the as-synthesized silica aerogel powder were investigated using XRD and BET analyses. Mechanical, physical and thermal conductivity properties of silica aerogel plaster based composites were determined in accordance to suitable standards. As a result, it was determined that silica aerogel having desired properties can be successfully synthesized from volcanic tuff wastes by employing sol-gel method and ambient temperature drying. The as-synthesized silica aerogel was determined to have a BET surface area of 662,9876 m²/g and a total pore volume of 0,9096 cm³/g. It was found that the incorporation of the as synthesized silica aerogel powder into plaster (at 50 vol%) resulted in composites with a density as low as 0,76 g/cm³, thermal conductivity value as low as 0,069 W/mK and compressive strength value as low as 1,22 MPa.

Keywords: Volcanic tuff, silica aerogel, Plaster.

İÇİNDEKİLER

ETİK VE BİLDİRİM SAYFASI	i
TEŞEKKÜR	ii
ÖZ	iii
ABSTRACT	iv
İÇİNDEKİLER	v
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ	ix
TABLolar DİZİNİ	xi
BİRİNCİ BÖLÜM	1
Giriş	1
İKİNCİ BÖLÜM	5
Literatür Taraması	5
Aerogellerin Karakteristik Özellikleri	13
Gözenek Yapısı	13
Yoğunluk.	15
Hidrofobiklik.	16
Aerogellerin mekanik özellikleri	17
Aerogellerin Karakterizasyonu	18
Termal Özellikler	18
Aerogelin Yapı Sektöründe Uygulanması	20
ÜÇÜNCÜ BÖLÜM	23
Materyal ve Yöntem	23
Materyal	23
Bayburt volkanik tüf atıkları	23
Su.	24
Alçı.	24

Yöntem.....	25
Silika Aerojel üretimi.	25
Silika Aerojel alçı sıva kompozitlerinin üretimi.....	27
Üretilen Aerojeli karakterizasyon çalışmaları.	29
XRD analizi.	29
BET analizi.	29
Kompozitlerin fiziksel özellikleri.	30
Su emme.	30
Yoğunluk.	30
Porozite.	30
Termal iletkenlik.....	31
Basınç dayanımı.	33
DÖRDÜNCÜ BÖLÜM.....	35
Bulgular ve Tartışma.....	35
Aerojel Üretimi ve Karakterizasyon Çalışmaları	35
Sol-gel metoduyla Aerojel üretimi.	35
XRD analizi.	40
Yüzey alanı ölçümleri.....	42
SAT yüzey alanı ölçümleri.	42
SAA kompozitlerin yüzey alanı ölçümleri.	43
Kompozitlerin Fiziksel Özellikleri	46
Porozite.	47
Su emme.	48
Yoğunluk.	49
Basınç Dayanımı.....	50
Termal iletkenlik.....	52
Sonuç ve Öneriler	56
Kaynakça	58
ÖZ GEÇMİŞ	66

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler

f_c	: Basınç Dayanımı
h	: Yükseklik
m	: Kütle
ρ	: Yoğunluk
R	: Termal direnç
S	: Malzemenin Kalınlığıdır
U	: Termal geçirgenlik
V	: Hacim
v	: Hız
w	: Aerjel Yüzeyine Temas Eden Su Damlacığının
Φ	: Porozite
λ	: Isıl iletkenlik
θ	: Temas Açısı

Kısaltmalar

AFM	: Atomik Kuvvet Mikroskobu
ASTM	: Amerikan Test ve Malzeme Kurumu
BET	: Brunauer – Emmett – Teller
EN	: Avrupa Standardı
EPS	: Poliüretan
IUPAC	: Uluslararası Temel ve Uygulamalı Kimya Birliği
MIP	: Cıva İntrüzyon Porozimetrisi
NMR	: Nükleer Manyetik Rezonans
PAS	: Pozitron Anihilasyon Spektroskopisi
PUR	: Ekstrüde Polistiren
SAA	: Silika Aerjel Alçılı
SAT	: Silika Aerjel Tozu
SAXS	: Küçük Açılı X-Işını Saçılması
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskobu
SG	: Sera Gaz
SMK	: Seramik Mikro Küre
TEM	: İletim Elektron Mikroskobu

TEOS	: Tetraethyl Orthosilicate
TMOS	: Tetramethoxysilane
UEA	: Uluslararası Enerji Ajansı
UV	: Ultraviyole
VTA	: Volkanik Tüf Atıkları
XPS	: Genleştirilmiş Polistiren
XRD	: X-ışını difraksiyon



ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1. Farklı sektörlerin enerji tüketim.	1
Şekil 2. Dünyanın farklı bölgelerindeki enerji tüketimleri.	5
Şekil 3. İnşaat sektöründe yaygın kullanılan ısı yalıtım malzemeleri.....	8
Şekil 4. Farklı yalıtım malzemelerinin pazar payı.	8
Şekil 5. Farklı firmalarında ve uygulamalarında mevcut ticarileştirilmiş Aerojel örnekleri a) Şeffaf Silika Aerojel cam, b) Poliüretan Aerojel levhalar formu, c) Esnek Aerojel Battaniyeler, d) Silika Aerojel tozu.....	10
Şekil 6. Silika Aerojelin gözeneklerini gösteren resimler.....	14
Şekil 7. Silika Aerojel üzerinde bir su damlacığının resmi.....	17
Şekil 8. Bayburt ili ocaklarından çıkan volkanik tüf blokları.	24
Şekil 9. Bu çalışmada kullanılan alçı.	25
Şekil 10. Bu çalışmanın Silika Aerojel tozunun özet sentezi.	26
Şekil 11. Başlangıç malzemesi ön işlemi.	27
Şekil 12. Alçı esaslı kompozitlerin üretiminde kullanılan malzemeler: a) Silika Aerojel b) musluk suyu c) alçı sıva.....	28
Şekil 13. Çalışmadaki numunelerin seçilen tanımlama yöntemin açıklaması.	29
Şekil 14. Isıl iletkenlik ölçümleri için kullanılan TLP 300 cihazı.	31
Şekil 15. Taurus TLP300 cihazının içyapısı.	32
Şekil 16. Taurus TLP300 çalışma şeması.	33
Şekil 17. a) Isıl iletkenlik testi numune üretmek için kullanılan kalıp, b) kalıptan çıkan numune.	33
Şekil 18. a) Basınç dayanımı numunelerinin üretiminde kullanılan kalıp, b) kalıptan çıkarılan numune.	34
Şekil 19. Basınç dayanımı testi için kullanılan hidrolik pres.	34
Şekil 20. HCl'nin yıkanarak uzaklaştırılması, a) yıkamadan önce b) yıkamadan sonra.	36
Şekil 21. Sodyum Silikat: a) jelleşmeden önce; b) jelleşme sırasında jeller oluşmaya başladığında; c) jelleşmeden sonra.	37

<i>Şekil 22.</i> Ardışık yapılan yıkama işlemlerinden sonra elde edilen örneklerin X ışını difraktogramları.	38
<i>Şekil 23.</i> Sililasyon çözeltisinde jel konumu.	40
<i>Şekil 24.</i> Üretilen Silika Aerojel tozu.	40
<i>Şekil 25.</i> Çeşitli oranlarda aerogel ile katkılanarak üretilen alçı kompozitlerin X- ışını difraktogramları.	41
<i>Şekil 26.</i> Üretilen aerogel örneğinin Adsorpsiyon-Desorpsiyon izotermeleri.....	42
<i>Şekil 27.</i> Aerojel içermeyen referans numune için elde edilen adsorbsiyon desorpsiyon izotermeleri ve por boyut dağılımı grafiği.	44
<i>Şekil 28.</i> SAA 25 numunesi için elde edilen adsorbsiyon desorpsiyon izotermeleri ve por boyut dağılımı grafiği.	44
<i>Şekil 29.</i> SAA 50 numunesi için elde edilen adsorbsiyon desorpsiyon izotermeleri ve por boyut dağılımı grafiği.	45
<i>Şekil 30.</i> SAA 75 numunesi için elde edilen adsorbsiyon desorpsiyon izotermeleri ve por boyut dağılımı grafiği.	45
<i>Şekil 31.</i> Porozite deneyi verileri.....	47
<i>Şekil 32.</i> Su emme deneyi sonuçları.	48
<i>Şekil 33.</i> Yoğunluk deney sonuçları.	49
<i>Şekil 34.</i> SAA kompozitlerinin basınç dayanımı değerleri.....	51
<i>Şekil 35.</i> SAA kompozitlerinin ısı iletkenlik değerleri.....	53

TABLÖLAR DİZİNİ

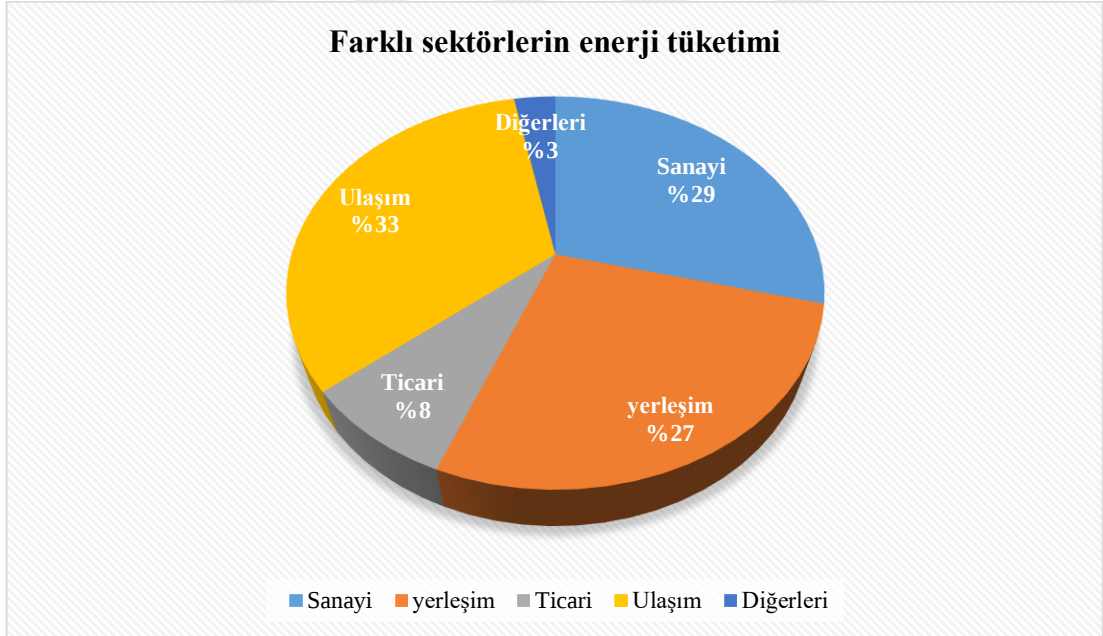
Tablo 1. <i>Silika Aerojellerin Özellikleri</i>	13
Tablo 2. <i>Termal Özelliklere Genel Bakış</i>	19
Tablo 3. <i>Volkanik Tüf Atıklarının Kimyasal ve Fizikler Analiz Verileri</i>	23
Tablo 4. <i>Alçının Özellikleri</i>	25
Tablo 5. <i>Numune İçerikleri ve Numaralandırma Açıklaması</i>	29
Tablo 6. <i>Üretilen Silika Aerojelin Çeşitli Yüzey Özellikleri</i>	43
Tablo 7. <i>Farklı Silika Aerojellerin Özellikleri Karşılaştırması</i>	43
Tablo 8. <i>Aerojel Alçı Kompozitlerinin Yüzey Özellikleri</i>	46
Tablo 9. <i>Kompozitlerin Fiziksel Özellikleri</i>	47
Tablo 10. <i>Basınç Dayanımı Deney Sonuçları</i>	50
Tablo 11. <i>Termal İletkenlik Deney Sonuçları</i>	52
Tablo 12. <i>Silika Aerojeli Kullanılan Çalışmaları Karşılaştırması</i>	55

BİRİNCİ BÖLÜM

Giriş

İnşaat sektörünün enerji tüketimi, her yıl toplam enerji tüketiminin üçte birini oluşturmaktadır (Abbas, Khalid, Ban, Kim, & Lee, 2019; Koebel, Rigacci, & Achard, 2012). Son yıllarda, inşaat sektörünün enerji tüketimi yıllık % 1,8 artmaktadır (Nejat, Jomehzadeh, Taheri, Gohari, & Muhd, 2015).

İnşaat sektörünün enerji tüketimi ticari ve konut olarak ikiye ayrılabilir. Konut enerji tüketimi, inşaat sektörü tarafından tüketilen nihai enerjinin dörtte üçünü oluşturmaktadır (Nejat vd., 2015). Konut sektörü, dünyanın en çok enerji tüketen ilk üç sektörü arasındadır. Nihai enerjinin % 27'sini tüketir. Şekil 1 farklı sektörlerin enerji tüketimini göstermektedir (Laustsen, 2008).



Şekil 1. Farklı sektörlerin enerji tüketim.

İnşaat sektörünün bu yüksek enerji tüketimi yüzünden açığa çıkan sera gazlarının (SG) üçte biri binalardan gelmektedir. Uluslararası Enerji Ajansı (UEA) tarafından bildirildiği üzere, nihai doğrudan ve dolaylı Karbondioksit emisyonunun (CO_2) yaklaşık %40'ı bina sektörünün enerji tüketiminden kaynaklanmaktadır (Robert, & Kummert, 2012). Konut sektörünün bu önemli ölçüde yüksek enerji tüketimi ve çevre üzerindeki zararlı etkileri nedeniyle inşaat sektörü, son zamanlarda bilinçli enerji tüketimi yaklaşımını tercih etmiştir. Bilinçli enerji

tüketimi yaklaşımı, binaların enerji tüketimini ve dolayısıyla CO₂ emisyonunun düşürülmesi ile hava kirliliğini azaltmayı amaçlayan bir kavramdır. Binalarda enerji, yaşam alanlarında ısı konforu sağlanması (ısıtma ve soğutma), aydınlatma ve ev aletleri gibi farklı temel amaçların yerine getirilmesi için kullanılmaktadır. Bunlar, insanların günlük refahının önemli bir bölümünü oluşturur. Evde yıllık olarak tüketilen enerjinin en az %51'i sadece ısıtma ve soğutma için kullanılır (U.S. Department of Energy, 2012) . Ne yazık ki, inşaat sektörü tarafından kullanılan tüm enerjinin yaklaşık olarak %70'i bina dış cephesinin ısı transferi yoluyla kaybedilmektedir (Najjar vd., 2019).

Isı transferi, iki veya daha fazla malzemenin farklı sıcaklıklarla temas etmesi sonucu ortaya çıkan kaçınılmaz bir olgudur (Cuce, Cuce, Wood, & Riffat, 2014a). Genellikle, ısı veya termal enerji, sıcak alanlardan soğuk alanlara taşınım yoluyla geçer. Literatürdeki deneyler ve simülasyonlar yoluyla yapılan birçok çalışma, bina dış cephe kaplamasının, bina içindeki enerjiyi korumada veya boşa harcamada en önemli rolü oynadığını kanıtlamıştır (Q. Feng vd., 2018; X. Liu, Chen, Ge, Fazio, & Chen, 2015).

Yapı sektöründe enerji tüketimini azaltmanın bir yolu da, ısıyı tutma ve yaşam alanlarına uygun iklimi koruma gibi üstün özelliklere sahip daha iyi yalıtım malzemelerini tercih etmektir. Bu yapı malzemelerinin tercih edilmesi güneş panelleri, rüzgâr türbini veya jeotermal enerji gibi yeşil enerjinin kullanımına kıyasla maliyet açısından daha büyük avantajlar sağlamaktadır (Jelle, 2011).

Ayrıca, yukarıda belirtilen niteliklere sahip yalıtım malzemeleri, ısıtma veya soğutma sistemlerine ihtiyaç duyulmadan uzun süreli termal konfor sağlamaktadır. Dolayısıyla, binalarda enerji tüketimini azaltmanın en iyi ve en etkili yolu, daha iyi yalıtım malzemeleri kullanarak daha iyi ısı tasarrufuna uyum sağlayıp binanın ısı kaybını en aza indirmektir. Bina cephe kaplamalarının büyük bir kısmı çoğunlukla çimento esaslı kompozitler olan duvarlar ve çatılardan oluştuğundan, binadan veya bina içerisine ısı transferine en üst düzeyde direnç gösterme kabiliyetine sahip yapı malzemelerinin üretimi ile ilgili araştırmalara daha fazla önem verilmiştir (Hanif, Diao, Lu, Fan, & Li, 2016; Kockal, 2016).

Bu nedenle, binalarda sıva ve kaplamaların, ısı iletkenliğini azaltmak için kendinden yalıtımlı duvarlar ve harçlar konusunda birçok araştırma yapılmıştır (Hanif, Lu, Cheng, Diao, & Li, 2017; Lu, Xue, Wang, & Fan, 2020).

Son zamanlarda, kendinden yalıtımlı çimento bazlı kompozitlerin üretiminde agrega ikame maddesi olarak Aerojellerin kullanımı büyük ilgi görmüştür. Aerojeller, yüksek porozite,

hafiflik, geniş özgül yüzey alanı ve yanmazlık gibi bazı üstün özelliklere sahiptir (Ng, Jelle, Sandberg, Gao, & Wallevik, 2015; Tsioulou, Ayegbusi, & Lampropoulos, 2017).

Aerogelleri daha iyi yalıtım malzemeleri yapan şey, yüksek porozite ve yüksek hava boşluklar içeriğinin birleşimidir. Dahası ultra hafif olması da inşaat sektöründe istenen bir diğer özelliktir (Korkmaz, & Kariper, 2020; Smirnova, & Gurikov, 2018).

Aerogeller, yüksek performanslı sıva alçı, dış kaplama, harç ve beton üretiminde agrega malzemesi olarak kullanılmaktadır (Bianco, Serra, Fantucci, Dutto, & Massolino, 2015; Buratti, Moretti, Belloni, & Agosti, 2014).

Aerogelin su direnci, UV ışınlarına karşı koruma, yangına dayanıklılık ve mükemmel akustik bariyer gibi özellikleri inşaat sektöründe birçok avantaj sağlamaktadır (Pierre & Pajonk, 2002). Bu özellikleri sayesinde Aerogeller inşaat sektöründe farklı önemli amaçlara hizmet etmektedir. Aerogellerin inşaat sektöründe sağladığı tüm avantajlarla birlikte, yüksek fiyatları hala ana dezavantajlarından biridir (Gao, Jelle, Gustavsen, & Jacobsen, 2014).

Gao vd. (2014) Aerogelin fiyatını çimento ve kum fiyatıyla karşılaştırmıştır. Aerogelin maliyetinin 40-160 euro/kg olduğunu ve bunun 0,1-0,2 euro/kg veya kum için 0,02-0,05 euro/kg olan çimento fiyatına kıyasla çok daha pahalı olduğunu belirtmişlerdir (Gao vd., 2014).

Aerogelin yüksek maliyetine katkıda bulunan ana faktör, silikon alkoksit, tetramethoxysilane (TMOS), tetraethyl orthosilicate (TEOS), polyethoxydisiloxanes gibi sentezinde kullanılan kimyasal öncülerdir. Buna ek olarak, süper kritik kurutma veya dondurarak kurutma gibi geleneksel kurutma yöntemleri, inşaat sektöründe Aerogel kullanımının yüksek maliyetini ve elverişsizliğini ortaya çıkarmaktadır. Bu nedenle son çalışmalar, uygun fiyatlı Aerogellerin üretimine odaklanmıştır (Carlson, Lewis, McKinley, Richardson, & Tillotson, 1995; Shi, Wang, & Liu, 2006).

Literatürde, inşaat endüstrisi için uygun fiyatlı Silika Aerogellerin sentezi konusunda araştırmalar yapılmıştır. Uygun fiyatlı Aerogellerin, ortam basıncı yöntemi (süper kritik kurutma yöntemine kıyasla karmaşık ekipman gerektirmeyen çok ucuz ve yaygın bir yöntem) ve nispeten ucuz öncü malzemeler kullanılarak sentezlenebileceği bildirilmiştir. Silika Aerogellerin sentezi için sodyum silikat, yağ şeyli külü, perlit tozu, grafen, olivin, kaolin, uçucu kül gibi endüstriyel atıklar, dip külü, trona cevheri ve pirinç kabuğu gibi tarımsal atıklar ve küspe külü gibi öncül materyaller kullanılmıştır (Bangi, Rao, & Rao, 2008; Q. Feng vd., 2018; Kim, Yoon, & Hwang, 2009; Nazriati, Setyawan, Affandi, Yuwana, & Winardi, 2014; A. P. Rao, Rao, & Pajonk, 2007).

Volkanik tüfler, puzolanik çimentoların üretiminde katkı maddesi olarak çimento endüstrisinde kullanımları iyice yerleşmiş bir tür piroklastik kayalardır. Tüfler genellikle bileşimlerinde feldispat, kuvars, mika, hornblend, piroksen, zeolit, kristobalit, kil mineralleri, amorf süngertaşı ve cam parçaları gibi bazı Silikat mineralleri içerir. Ayrıca, tüf kullanımının daha ucuz olmaları nedeniyle önemli ekonomik faydaları vardır.

Türkiye, volkanik tüflerin önemli bir bölümünü oluşturduğu büyük doğal taş rezervlerine sahiptir. Yayınlanan verilere göre rezerv yaklaşık 3.872.000.000 m³ mermer ve 155.000 km² doğal puzolandır (Yavuz Çelik, & Sabah, 2008).

Bayburt, jeolojik yapısından kaynaklanan çeşitli maden yataklarına sahiptir. Nitekim Maden Teknik Arama'nın 2005 tarihli raporuna göre Bayburt'ta (Toptepe, Sırastaşlar, Gevenli, Konakdağ ve Gümüşdamla mevkiilerinde) 2.535.729 ton volkanik tüf rezervi bulunmuştur. Bu tüfler yerel ve uluslararası olarak köprülerin, camilerin ve çeşmelerin restorasyonu ile dış cephe kaplaması, denizlikler ve yüzey kaplamaları gibi farklı inşaat projelerinde kullanılmaktadır.

Bayburt İl Özel İdaresi özel bilim sanayi ve teknoloji birimine göre, şu anda volkanik tüf gibi doğal taşların taş ocakçılığı, işlenmesi ve keşfi ile ilgilenen 412 sertifikalı firma bulunmaktadır. Bu volkanik tüf rezervlerinin taş ocağından çıkarılmasının, satış için uygun olmayan atık malzemelerin yaklaşık %60'ını oluşturduğu bildirilmektedir. Nitekim işleme şirketlerinden birinde yapılan araştırmada, her yıl işlenen 60 ton volkanik tüften yaklaşık %17 oranında atık üretildiği tespit edilmiştir.

Bu çalışma, Volkanik tüf atıklarının Silika Aerojel sentezi için başlangıç malzemesi olarak potansiyel kullanılabilirliğini araştırmayı amaçlanmıştır. Ayrıca sentezlenen Silika Aerojelin özellikleri belirlenmiş ve yüksek termal yalıtım özellikleri için alçı esaslı kompozitlerde dâhil edilerek inşaat sektöründe kullanımı hedeflenmiştir. Böylelikle Bayburt İlinde volkanik tüflerin taş ocağı ve işlenmesi sırasında ortaya çıkan bu büyük miktardaki atığı değerlendirilecektir.

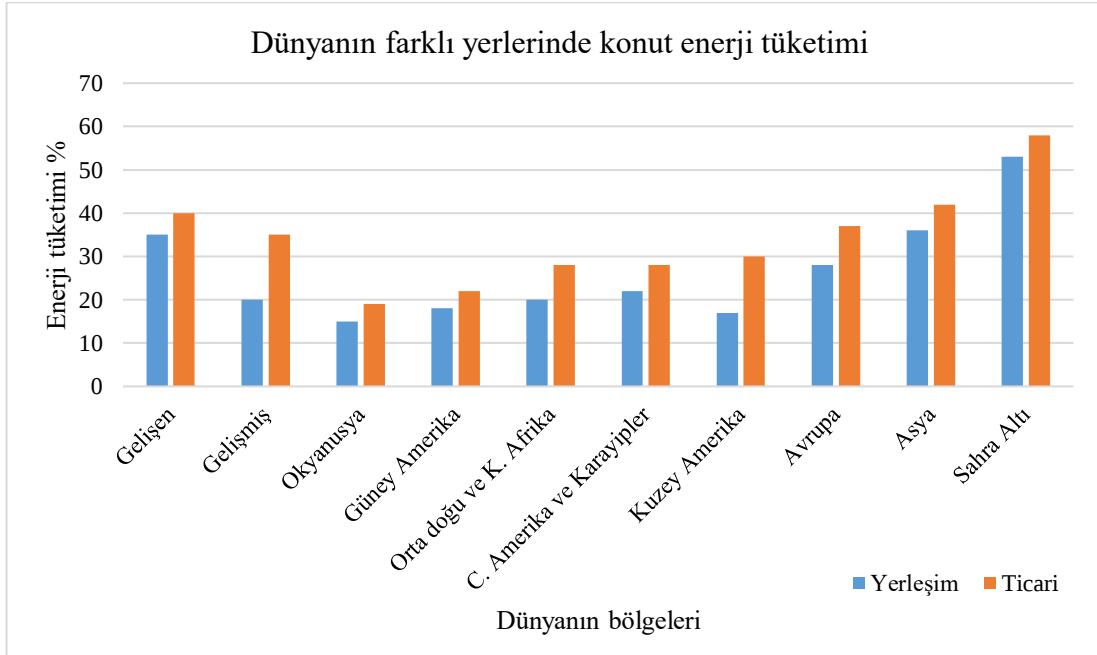
İKİNCİ BOLÜM

Literatür Taraması

Son yıllarda yapılan araştırmalarda, bina sektörünün dünyanın küresel enerji tüketimine büyük etki yaptığı ortaya konmuştur. 2019 yılında bina sektörünün enerji tüketimi sonra kaydedilen 10Gt CO₂ salınımı, şimdiye kadar kaydedilen en yüksek enerji tüketimidir. Ayrıca, 2050 yılına kadar enerji talebinin 4400 Mtoe (184,2EJ)'nin üzerine çıkması beklenmektedir (Bianco vd., 2015; de Fátima Júlio, Ilharco, Soares, Flores-Colen, & de Brito, 2016; Ibrahim, Biwole, Achard, Wurtz, & Ansart, 2015).

2010 yılından bu yana bina sektörünün enerji tüketimi yaklaşık %63 artmıştır (Nejat vd., 2015). İnşaat sektörünün hâlihazırda muazzam olan ve hızla büyüyen bu enerji tüketiminin gelecek yıllarda artmaya devam edeceği öngörülmektedir (Ibn-Mohammed, Greenough, Taylor, Ozawa-Meida, & Acquaye, 2013; Xing, Hewitt, & Griffiths, 2011).

Konutlarda enerji tüketimi, dünyanın çeşitli bölgelerinde farklılık göstermektedir. Şekil 2'de görüldüğü gibi gelişmekte olan ülkelerde ortalama %35'ten fazla ve gelişmiş ülkelerde ortalama yaklaşık %20'dir (Yau, & Hasbi, 2013).



Şekil 2. Dünyanın farklı bölgelerindeki enerji tüketimleri.

Konut sektöründe kullanılan enerji esas olarak fosil yakıtların yakılmasından (doğal gaz, petrol ürünleri ve kömür) ve yenilenebilir kaynakların (geleneksel biyokütle ve güneş fotovoltaik, rüzgâr ve ticari biyoyakıtlar gibi modern yenilenebilir kaynaklar) kullanılmasından kaynaklanmaktadır.

2011 yılında tüketilen küresel enerjinin %81,23'ünü fosil yakıtların yakılması oluşturmaktadır. Dolayısıyla yüksek sera gazı emisyonuna neden olmaktadır (Ahmad, Mourshed, Mundow, Sisinni, & Rezgui, 2016).

Sera gazı emisyonları, küresel yüzey sıcaklığının yükselmesine neden olduğu için küresel ısınmaya neden olur. 2000-2005 yılları arasında küresel sera gazı emisyonu %12,7 artarak her yıl ortalama %2,4 olmuştur. Küresel yüzey sıcaklığı son 30 yılda yaklaşık 0,5°C artmıştır (Herzog, 2009). Binaların küresel ısınmaya etkisi çok önemlidir. 2011 yılında konutlar en yüksek karbondioksit yayan sektör olarak dördüncü sırada yer almıştır. Doğrudan küresel karbondioksit emisyonlarının yaklaşık %6'sını ve dolaylı küresel karbondioksit emisyonlarının %11'ini binalar yaymıştır (Anna Javellana Lising, 2012). UEA, inşaat sektörünün bu yüksek enerji tüketimini ve nispeten yüksek CO₂ emisyonunu azaltmak için hiçbir şey yapılmazsa, 2050 yılına kadar CO₂ emisyonunun 2 kat artacağını öngörmüştür (Cuce, Cuce, Wood, & Riffat, 2014b). CO₂, iklim değişikliğinden sorumlu ana gazdır. Küresel sera gazı emisyonlarının dörtte üçünü oluşturmaktadır (Nataly Echevarria Huaman & Xiu Jun, 2014). UEA, sera gazı emisyonlarındaki hızlı artışa dikkat çekmiştir (UEA, 2013).

Yıllar içinde binaların enerji tüketimini azaltmak için çalışmalar yapılmıştır. Böylelikle tamamen ısıtma veya soğutmaya bağlı olmaksızın yaşam ortamında ısı konforu koruyabilen çeşitli malzemeler üretilmiş ve kullanılmıştır. Bu amaca ulaşma kabiliyetine sahip olan malzemeler, yalıtım malzemeleri olarak bilinir.

Yalıtım malzemeleri, bina içinden veya içerisinden ısı akışına direnç göstererek binaların enerji tüketimini azaltır. Böylece düşük enerji tüketiminde uygun termal konfor sağlar. Isı akışı, farklı sıcaklıktaki malzemeler birbiriyle temas ettiğinden kaçınılmaz bir olgudur. Isı yalıtım malzemelerinin temel amacı, binadaki bu ısı hareketini azaltmaktır. Yalıtım malzemelerindeki ısının hareketi üç gruba ayrılabilir: katı halde iletim, gaz fazında iletim ve gözeneklerden radyasyon (Jelle, Gustavsen, & Baetens, 2010).

Yalıtım malzemeleri, ısı akışlarına direnç gösterme kabiliyetleri nedeniyle iyi veya kötü olarak sınıflandırılır. Isı akışına direnmenin bu özelliği, termal iletkenlik olarak bilinir ve W/mK cinsinden ölçülür. Herhangi bir malzemenin ısı iletkenliği ne kadar düşükse, ısı kayıplarına direnç gösterme yeteneği o kadar büyüktür.

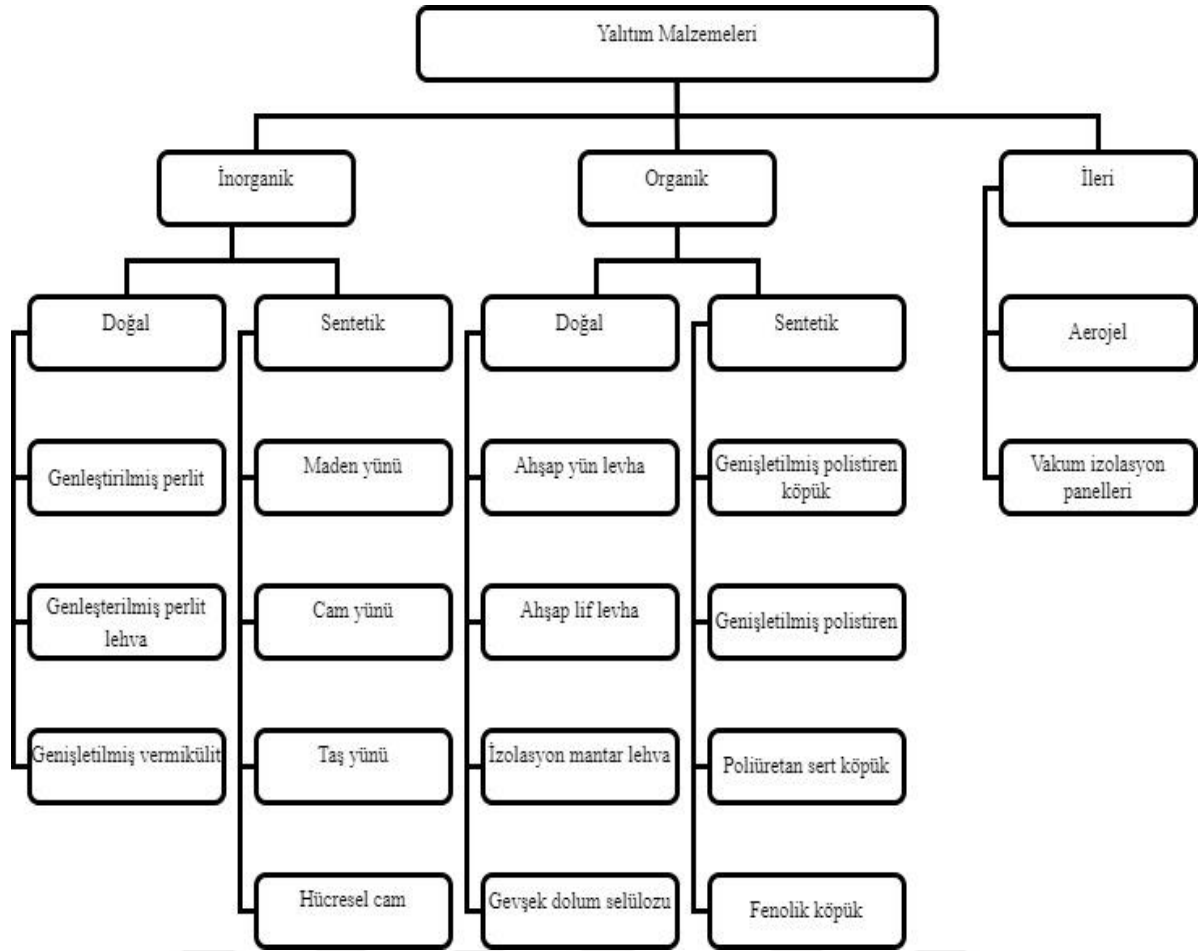
Yalıtım malzemelerinin en hayati özelliği ısı iletkenliği olmakla birlikte, perforasyon kırılabilirliği, esneklik, mekanik dayanım, yangına dayanıklılık, duman emisyonu, sağlamlık, iklim değişikliğine dayanıklılık, donma ve çözülme döngüleri direnci, nem direnci, maliyetler gibi diğer bazı özellikler, somutlaştırılmış enerji ve çevresel etkiler de yalıtım malzemelerinin daha iyi performans göstermesi kadar önemlidir.

Enerji tasarrufu amacıyla en etkin kullanılan malzemelerden biri de, sırasıyla T1 veya T2 olarak sınıflandırılan ısı yalıtım harçlarıdır. (İngiliz Standartlar Enstitüsü, 2010) 0,1 veya 0,2 W/mK' den düşük ısı iletkenlik değerlerine sahiptirler.

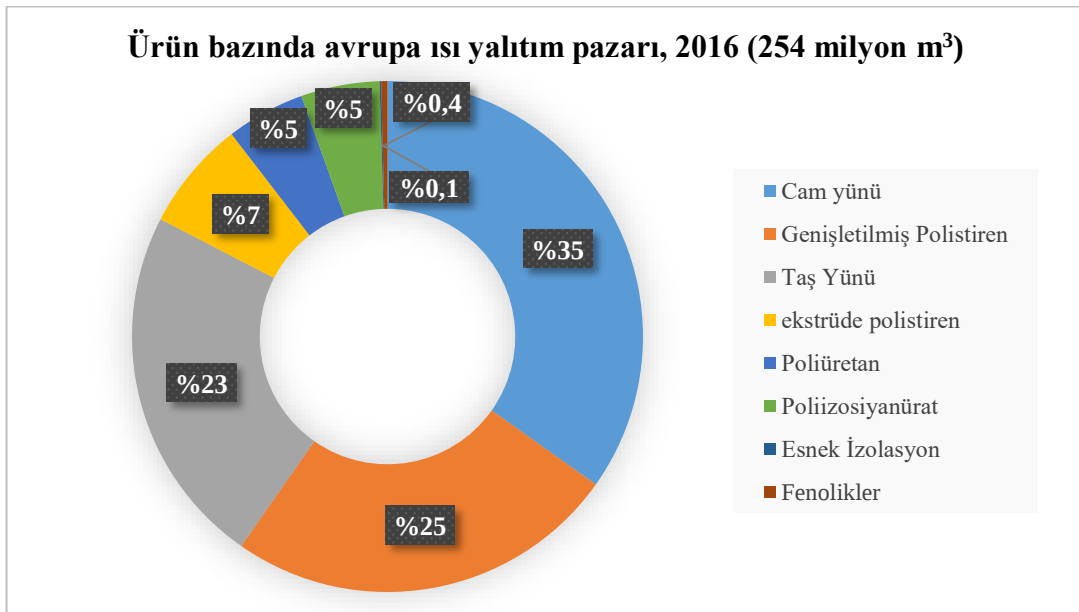
Yıllar geçtikçe, harç agregaları gibi ısı transferine direnç gösterecek üstün özelliklere sahip gelişmiş malzemeler üretmek için çalışmalar yapılmıştır. Bu malzemeler, uygun mekanik ve fiziksel özellikleri korurken binaların termal performansını iyileştirmeye yardımcı olur. Bu malzemeler arasında en yaygın kullanılanlar genişletilmiş polistiren (EPS), mantar ve içi boş seramik mikro küredir (SMK) (Babu, Ganesh Babu, & Wee, 2005; Brás, Leal, & Faria, 2013; Panesar & Shindman, 2012; Plakhotnikov, Bondarenko, Dedenyova, Saliia, & Kostuk, 2018). EPS, sert ve dirençli iken kapalı hücrelere sahip bir tür termoplastik polimerdir (Chen vd., 2015). Mantar ise yavaş yanma ve iyi mekanik özelliklere sahip hücresel, doğal ve yenilenebilir bir malzemedir (Silva vd., 2005).

SMK, kapalı hücrelere ve yüksek sertliğe sahip gözenekli malzemelerdir. Yukarıda belirtilen malzemelerin tümü ortak olarak düşük ısı iletkenlik değerlerine sahip olma özelliğine sahiptir. Bu değerler EPS, mantar ve SMK için sırasıyla 0,033-0,057; 0,035-0,070 ve 0,050-0,200 W/mK arasında değişmektedir. Bu özellik bu malzemeleri yalıtıma uygun hale getirir (Mills, 1993).

Yalıtım malzemelerinin sınıflandırılması genellikle fiziksel ve/veya kimyasal yapılarına göre yapılır. İnşaat sektöründe yaygın olarak kullanılan ısı yalıtım malzemelerinden bazıları Şekil 3'te sunulmuştur. Ayrıca, pazar payları Şekil 4'te özetlenmiştir (Cuce vd., 2014b).



Şekil 3. İnşaat sektöründe yaygın kullanılan ısı yalıtım malzemeleri.



Şekil 4. Farklı yalıtım malzemelerinin pazar payı.

Şekil 4'ten anlaşılacağı üzere, son yıllarda, inorganik lifli malzemeler, yani cam yünü, EPS ve XPS gibi organik köpük malzemeler en fazla pazar payına sahiptir. Bununla birlikte, süper yalıtım malzemelerinin mevcut hızlı büyümesiyle, geleneksel yalıtım malzemelerinin

yakında pazar hâkimiyetini kaybedeceği öngörülmektedir. EPS, XPS ve PUR termal iletkenlik değerleri sırasıyla 0,033 W/mK, 0,040 W/mK ve 0,020-0,030 W/mK'dir (Cuce vd., 2014; Jelle vd., 2010).

Bu geleneksel yalıtım malzemeleri şu anda pazara hakim olmakla birlikte, kullanımları, yangın durumunda zehirli gazlar açığa çıkarmanın yanı sıra çok zayıf bir yangın direncine sahip olma gibi birçok istenmeyen özellik ile birlikte gelmektedir. Örneğin, PUR malzemesinin yangın sırasında sağlık sorunlarına neden olduğu belirlenmiştir. Dahası, uygulamaları büyük bir alan kaplar ve binanın ölü yükünü arttırır, bu nedenle karmaşık yapı detaylarını gerektirir. Son yıllarda, ultra hafif Silika Aerojel tozunun yalıtım malzemesi olarak kullanımı büyük ilgi görmüştür (Calisesi, & Berardi, 2017).

Aerojel üretimi, jeller ve bunların ilgili yapılarıyla üretmek için ilk başarılı girişim 1931'de S. S. Kistler tarafından olmuştur (Kistler, 1931). Jellerin iki farklı (katı ve sıvı fazlar) ve bağımsız fazlardan oluştuğunu ortaya çıkarmıştır. Sıvı fazı ondan dikkatlice çıkardıktan sonra, katı fazı hasarsız ve boyut ve şekilde orijinal jel ile aynı tutmanın mümkün olduğunu düşündü. Basitçe ifade etmek gerekirse, sıvı fazın jelden zararsız bir şekilde ekstraksiyonundan sonra, ilk jelle aynı hacimde ve şekilde gözenekli bir katı jel elde edilecektir. Bunun aksine, sıvı faz katı maddelerden buharlaştığında, katının gözeneklerinde büyük kılcal gerilmelerin meydana geldiği iyi bilinmektedir. Bu kılcal basınçlar, hacim olarak azalan yüzey gerilmelerinden kaynaklanır. Bu da katı materyalin çatlamasına yol açar. Bu durumun üstesinden gelmek için Kistler, süper kritik ekstraksiyon yönteminin yardımıyla sıvı fazın katı olandan ayrılmasını öngörmüştür. Bu yöntem, sıvı fazın katıdan ekstraksiyonunun, önce basıncın ve ardından sıcaklığın Otoklavda yükseltilmesiyle yapmıştır (J. Fricke, & Tillotson, 1997).

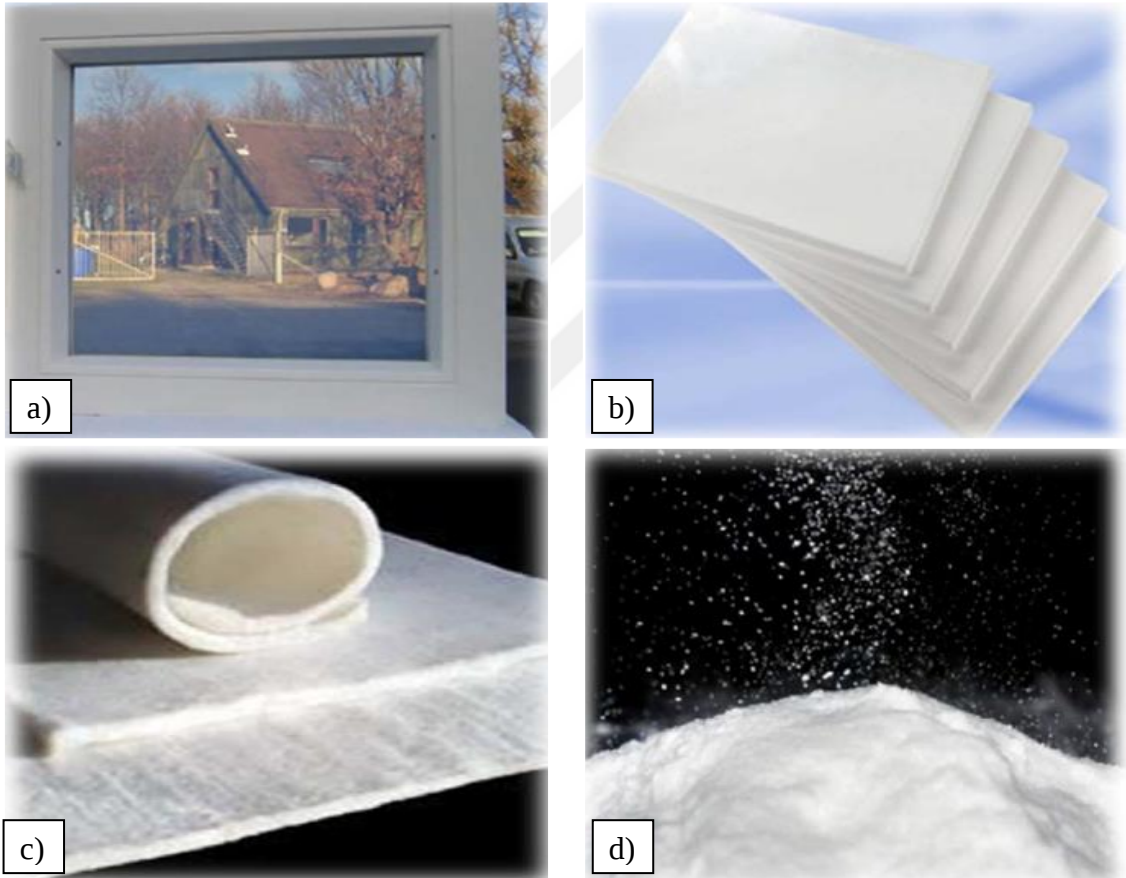
Süper kritik durumda sıvıların normal sıvılar gibi davranmak yerine, serbestçe hareket edebilecek yeterli enerjiye sahip tüm moleküller ile sıvılar gibi davranmaları ve böylece yüzey gerilmelerini ve neden oldukları çatlakları ortadan kaldırmaları nedeniyle ekstraksiyon mümkün ve başarılıdır (Jochen Fricke, 1992; Markom, Singh, & Hasan, 2001).

Genel olarak, Aerojel üretme işlemi geleneksel olarak Jelleştirme, yaşlandırma ve kurutmadan oluşan 3 ana aşamada gerçekleştirilir. Yukarıda bahsedilen aşamalar geleneksel olarak Aerojel'in en eski ve genel olarak kullanılan malzemeler olan silikon alkoksit öncülerinden sentezi için uygulanır. Aerojeller uçucu kül, dip külü vb. endüstriyel atıklardan veya pirinç kabuğu külü gibi tarımsal atıklardan sentezlendiğinde, yapılarında bulunan bazı istenmeyen metal safsızlıklarından kurtulmak için başlangıç malzemelerinin ön işlem aşamalarının gerçekleştirilmesi gerekir. Ayrıca, Aerojeller için istenen nihai forma bağlı olarak,

kaplama, hidrofobizasyon ve kalıplama (Aerojellerin şeklini monolit veya granül olarak belirleyen) gibi işlem sonrası aşamaları gerçekleştirilir.

Genel olarak ısı yalıtımı, Cherenkov dedektörleri ve süper kapasitörler için monolitik form gereklidir. Oysa inşaat, dolgu malzemeleri, ilaç, kozmetik ve taşıyıcı için gerekli form toz veya granüllerdir. Çeşitli alanlarda uygulanan farklı Aerojel formlarını gösteren bir örnek Şekil 5'te gösterilmektedir (Smirnova, & Gurikov, 2018).

Aerojellerin üretimi genellikle sıvı kısmın katı bir jelden, jelin herhangi bir büzülmesi veya bozulması olmaksızın dikkatlice ayrılmasını içerir. Aerojeller, kullanım amacına ve alanına bağlı olarak monolitik matris formu veya toz gibi farklı şekil ve boyutlarda sunulmaktadır



Şekil 5. Farklı firmalarında ve uygulamalarında mevcut ticarileştirilmiş Aerojel örnekleri a) Şeffaf Silika Aerojel cam, b) Poliüretan Aerojel levhalar formu, c) Esnek Aerojel Battaniyeler, d) Silika Aerojel tozu.

Brinker ve Scherer (1990) tarafından açıklandığı gibi, jel hazırlama işlemi olarak da bilinen jelleşme sırasında, küçük katı nano partiküller, sıvının her yerinde sürekli üç boyutlu bir ağ oluşturacak şekilde sıvı bir aglomerata yayılır. Bu tür faaliyetler için en yaygın olarak kullanılan yöntem Sol-jel yöntemidir. Sol-jel yöntemi, küçük sıvı moleküllerden katıların sentezi için yaygın olarak kullanılan bir tekniktir. Sol-gel yönteminin ilk tanıtımı, Stanislas

Tcheiner'ın öğrencisi tarafından Fransa'daki Lyon Üniversitesi'nde 1962'de yapılmıştır (C.J. Brinker; G. W. Scherer, 1990).

Aerogeller iyi bir uyum gibi görünse de, sentezleri için yeni bir yöntem düşünülüyordu. Çünkü Keistler tarafından daha önceki yöntem çok pahalı, zaman alıcı ve yumuşatılmış laboratuvar ekipmanı gerektiriyordu. Böylelikle, Teichner'ın öğrencisi, Aerogelleri organosilanlar yoluyla sentezlemede sol-jel yöntemini kullanmayı başardı. Sol jel işlemi, "jel" olarak bilinen entegre bir ağa yol vermek için "sol" veya koloidal parçacıklar olarak bilinen kimyasal bir çözelti kullanan ıslak bir kimyasal teknikten oluşur. En yaygın olarak kullanılan öncü malzemeler metal alkoksitler veya metal klorürlerdir (J. Fricke, & Tillotson, 1997).

Metal alkoksitler sol-jel tekniğine tabi tutulduğunda, bir çözücü içinde dağılmış nanopartiküllerden oluşan koloidal bir sisteme yol vermek için "hidroliz ve polikondansasyon" olarak bilinen iki ana reaksiyondan geçerler. Zamanla sol adı verilen sıvı faz gelişerek "jel" adı verilen sıvı fazı içeren organik bir sürekli ağ oluşturur. Metal oksitlerin oluşumu daha sonra "okso (M-O-M) ve hidrokso (M-OH-M)" köprüleri gibi metal merkezler arasında bağlantılar kurularak ve böylece çözelti içinde "metal-okso veya metal-hidrokso polimerleri üretilerek gerçekleştirilir. Tek başına "jel" elde etmek için sıvı faz daha sonra katı fazdan kurutularak ekstrakte edilir (Cuce *vd.*, 2014b).

Geleneksel olarak, Aerogel elde etmek için solvent değişimi ve hidrofobizasyon gibi birkaç işlemden sonra kurutulan jelin hazırlanmasında başlangıç malzemesi olarak, tetrametoksisilan ($\text{Si}(\text{OCH}_3)_4$), tetraetoksisilan ($\text{Si}(\text{OC}_2\text{H}_5)_4$) silikon alkoksitler ve polietoksidi-siloksan ($\text{SiOn}(\text{OC}_2\text{H}_5)_{4-2n}$) gibi kimyasallar kullanılmaktadır.

1995 yılında Aerogel üretimlerinde kullanılan öncüllerin yüksek maliyetinden dolayı yaygınlaşmamıştır. Bu nedenle, nispeten ucuz yeni hammaddeler kullanılarak Aerogel üretimi üzerine yapılan yeni çalışmalar, son yıllarda çok ilginç bir konu haline gelmiştir. Ayrıca, Aerogellerin çeşitlendirilmesi ve üretimin ölçeğini büyütmesi, esas olarak elde edilebilirliğine, sürdürülebilirliğine ve üretimlerinde kullanılan göreceli hammaddelerin fiyatına bağlıdır (Carlson *vd.*, 1995; Jochen Fricke, 1992).

Silika Aerogel üretimi için en yaygın olarak kullanılan öncü malzemeler organik Silikatlar ve sodyum Silikattır (Na_2SiO_3). Silika çeşitli biyokütle türlerinde bol miktarda bulunur, bu nedenle yapılarında Silika içeren çeşitli endüstriyel ve tarımsal atıkların kullanımı son zamanlarda Aerogel üretiminde kullanılmıştır (Tang, & Wang, 2005).

Organik Aerogel üretimi ise aljinat, pektin, kitosan gibi biyopolimerler ve farklı sürdürülebilir kaynaklardaki proteinler, öncü malzemeler olarak kullanılmaktadır. Dahası,

selüloz ve linginin potansiyel kökenleri olduğu bilinen Lignoselülozik biyokütleler, Aerojel üretimi için hammadde olarak sıklıkla kullanılmıştır (J. Feng, Nguyen, Fan, & Duong, 2015).

Karbon Aerojel üretiminde, biyopolimerler esas olarak piroliz ile sentezlenen Aerojeller için başlangıç malzemeleri olarak kullanılmaktadır. Karbon Aerojel üretimi için öncül maddeler edinmenin bir başka yolu da, geri dönüşüm materyalleri veya kağıt, plastik, atık gazete ve atık pamuklu kumaşlar gibi atıkların selülozik Aerojelleri sentezlemek için yeniden kullanılmasıdır (Han, Zhang, Wu, & Lu, 2015; Jin, Han, Li, & Sun, 2015).

Başarılı bir Aerojel üretimi için, kurutma işlemi en belirleyicidir çünkü bu işlem sırasında sıvı fazın katı fazdan ayrılması gerçekleşir. Yukarıda belirtildiği gibi, ayırma yeterli ve başarılı bir şekilde yapılmadığında, jelden sıvı fazın buharlaşması, jelin hacim gerilmesinin neden olduğu yüzey gerilimine bağlı olarak jelin büzülmesine, bozulmasına ve çatlamasına neden olacaktır. Bu daha az gözenek boyutu, yüksek ısı iletkenliği ve daha az spesifik yüzey alanına sahip daha yoğun jeller ile sonuçlanacaktır. Bu nedenle, Aerojellerin ilk üretiminden bu yana çeşitli kurutma yöntemleri kullanılmıştır. Kurutma işlemi için en iyi yöntem, tabii ki jelin her türlü büzülmesini, bozulmasını veya çatlamasını önleyen, aynı zamanda ekonomik ve zaman açısından verimli olanıdır. Bugüne kadar en çok aranan ve jelin kurutulması için aktif olarak kullanılan yöntemlerden bazıları üç ana grupta sınıflandırılabilir. Bunlar süperkritik kurutma (Süperkritik ekstraksiyon, Hızlı süperkritik ekstraksiyon), ortam basıncında kurutma ve dondurarak kurutmadır.

Aerojeller, şimdiye kadar insanlar tarafından yapılmış en hafif katı malzemelerdir (Korkmaz, & Kariper, 2020; Smirnova, & Gurikov, 2018). Ekstra hafif ($0,003-0,15 \text{ kg/m}^3$), yüksek gözenekli ve geniş bir yüzey alanına ($500-1000 \text{ m}^2/\text{g}$) sahip olan ince, açık gözenek yapısına sahip nano gözenekli katılardır. Aerojel, gevşek bir şekilde bağlanmış parçacıklardan oluşan çok düşük yoğunluklu ve yüksek yüzey alanı gösteren liflerden oluşan açık koloidal, polimerik ağa sahip katı bir malzeme olarak tanımlanır (Smirnova, & Gurikov, 2017).

Bu özellikleri nedeniyle, Aerojeller olağanüstü çok işlevli malzemelerdir. İstisnai özellikleri sayesinde ısı yalıtımı, elektrokimya, doku mühendisliği, dolgu malzemeleri, katalizör veya diğer dolgu malzemeleri taşıyıcıları gibi farklı alanlarda kullanılmaktadır (Smirnova, & Gurikov, 2018).

Geçmişteki çalışma davranışı arasında kayda değer bir fark olduğunu ortaya koymuştur. Dolgu duvarlı çerçevelerin analizinde en yaygın olarak kullanılan analitik yöntem, eşdeğer sanal basınç çubuğu yöntemi olarak görünmektedir. Bu model ortaya konduğundan bu yana, farklı şartlar altındaki dolgu duvar davranışları da yine incelenmiş konular arasındadır. Ancak

deneysel çalışmalar göstermektedir ki, birçok parametre bu analitik yöntemin öngörüsünü bulandırabilmektedir. Mohyeddin ve arkadaşları, hangi çerçeve tipleri için hangi analitik yöntemin kullanılmasının daha doğru olduğunu araştırmıştır. Bu bağlamda belli parametrelere bağlı olarak bir yöntem geliştirmiştir. Yöntem, sonlu eleman modeliyle analiz edilen çerçeveden alınan bir takım verileri temel alarak, doğru eşdeğer sanal basınç çubuğu çözüm kırıınımlarını belirlemektedir (Mohyeddin, Dorji, Gad, & Goldsworthy, 2017).

Yekrangnia ve Mohammadi (2017), dolgu duvarlı çelik çerçeveler için genelleştirilmiş bir eşdeğer sanal basınç çubuğu yöntemi sunmuştur. Yöntemin temeli, çelik çerçevede yükleme sonucu oluşan eğilmelerin dolgu duvara aktarılmasına dayanmaktadır. Önerilen yöntemin, ASCE’de verilen metodlara göre daha iyi sonuçlar verdiği deneysel çalışmalarla doğrulanmıştır. Bununla birlikte, çalışmanın yalnızca dolu çerçevelerin davranışı için geçerli olduğu, boşluklu dolgu duvarlarda kullanılmasının doğru olmayacağı da belirtilmiştir (Yekrangnia, & Mohammadi, 2017).

Aerogellerin Karakteristik Özellikleri

Yıllar boyunca, çok sayıda araştırmacı ve şirket, birçok benzersiz katı özelliğe sahip olduğu bilinen yüksek Silika Aerogel potansiyelinin iyileştirilmesine yönelik çalışmalarla ilgilenmiştir. Tablo 1’de, Silika Aerogellerin özelliklerinden bazıları verilmiştir. Ayrıca, bu özellikler aşağıdaki bölümlerde ayrıntılı olarak tartışılmaktadır (Calisesi, & Berardi, 2017).

Tablo 1. Silika Aerogellerin Özellikleri.

Özellik	Birim	Değer
Partikül çapı	nm	2-5
Gözenek çapı	nm	2-100
Ortalama gözenek çapı	nm	20-40
Porozite	%	85-99,9
İç yüzey alanı	m ²	600-1000
Kütle yoğunluğu	Kg/m ³	3-350
İnşaat amaçlı kütle yoğunluk	Kg/m ³	70-150
Termal iletkenlik	W/mK	0,004
İnşaat amaçlı termal iletkenlik	W/mK	0,013-0,014
Basınç dayanımı	KPa	300
Çekme dayanımı	KPa	16
Sıcaklık kararlılığı	° C	600 kadar
Yanmaz	-	Evet
Reaktif	-	Hayır
Yangın sırasında zehirli gazlar salması	-	Hayır

Gözenek Yapısı.

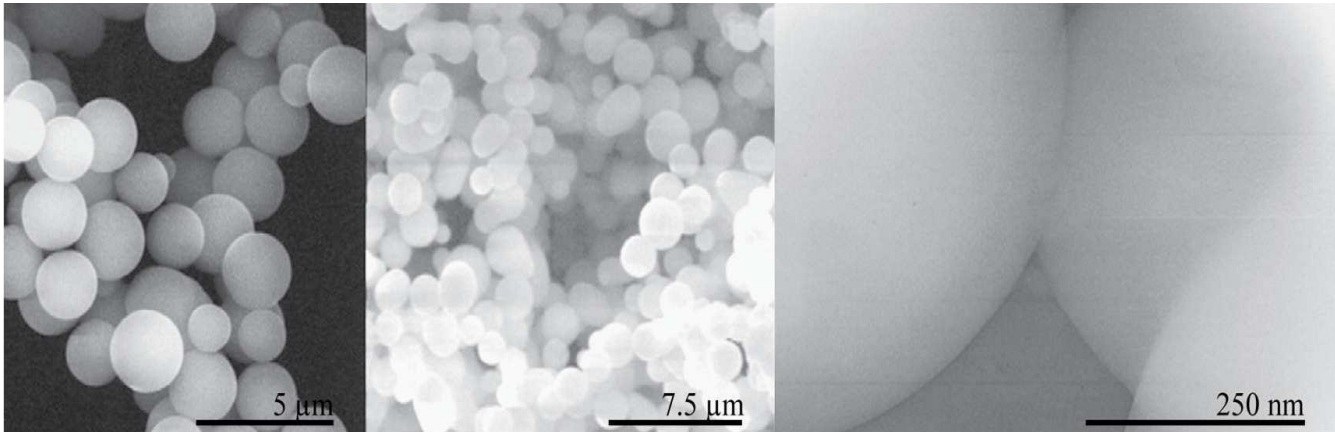
Önceki bölümlerde bahsedildiği gibi, Silika Aerogeller oldukça gözenekli katı malzemelerdir. Yapıları esas olarak SiO₂ zincirlerinin çapraz bağlı bir içyapısından ve hava ile

dolu çok sayıda küçük gözeneklerden oluşur. Gözenek ağları, gözeneklerin birbirine bağlı olduğu açık gözenekli bir yapıdan oluşur. Dolayısıyla, sıvılar bir gözenekten diğerine akabilir ve malzeme içinde dolaşabilir. Bu çok benzersiz özellik sayesinde, Aerojeller, katalizör ve katalizör destekleri olarak olağanüstü bir şekilde kullanılmaktadır (Soleimani, Dorcheh, & Abbasi, 2008).

Aerojeller, yapılarında toplam hacmin %85 -%99.9'unu oluşturan çok sayıda gözeneğe sahip olması nedeniyle, özünde birçok benzersiz fiziksel, termal, optik ve akustik özelliğe sahiptir. Bununla birlikte, bu özelliklerin çoğu, Aerojellerde çok düşük olan olumsuz mekanik özellikleri etkiler (Baetens, Jelle, & Gustavsen, 2011).

IUPAC (International Union of Pure and Applied Chemistry) 'e göre katı maddelerde bulunan gözenekler boyutlarına göre üç farklı grupta sınıflandırılır. IUPAC, 2 nm'den küçük çaplara sahip gözenekleri mikro gözenekler olarak tanımlar. Mezogözenek olarak ise 2-50 nm arasında değişen çapa sahip olanlar olarak tanımlanmaktadır. 50 nm'den büyük çaplara sahip gözenekler makro gözenekler olarak adlandırılır. Aerojeller, gözeneklerinin çoğu mezo gözenekler olmak üzere yukarıda belirtilen tüm gözeneklere sahiptir. Gözenek çapları, ortalama 20-40 nm gözenek çapı ile 2-100 nm arasında değişir (Soleimani, Dorcheh, & Abbasi, 2008).

Aerojel mikroyapısının araştırılması ve gözenek boyutunun değerlendirilmesi için en yaygın kullanılan teknikler Taramalı elektron mikroskopları (SEM) ve transmisyon elektron mikroskoplarıdır (TEM). Ancak bu tekniklerin kullanımı, iki boyutlu görüntüler sundukları için numune hazırlama ve bilgilerin yorumlanması gibi çeşitli zorluklar ortaya çıkarmaktadır. Bu, özellikle Aerojeller gibi oldukça gözenekli malzemelerden elde edilen sonuçların işlenmesini ve yorumlanmasını çok zorlaştırır. Şekil 6, SEM ve TEM görüntü örneklerini gösterir (Soleimani, Dorcheh, & Abbasi, 2008).



Şekil 6. Silika Aerojelin gözeneklerini gösteren resimler.

SEM ve TEM dışında, pozitron anihilasyon spektroskopisi (PAS), küçük açılı X-ışını saçılması (SAXS), atomik kuvvet mikroskobu (AFM) ve nükleer manyetik rezonans (NMR) gibi bir dizi tahribatsız teknikleri Aerojel özelliklerinin değerlendirilmesi için kullanılır (Soleimani, Dorcheh, & Abbasi, 2008).

Yoğunluk.

Aerوجلlerin, insanlar tarafından şimdiye kadar yapılmış en hafif katı malzemeler olduğu bilinmektedir. Oldukça hafif olmaları, hava ile dolu%85 -%99,8 gözeneklerden oluşan yüksek gözenekli yapılarından kaynaklanmaktadır. Son derece ilginç gözeneklilikleri ve hafiflikleri nedeniyle Aerوجلler şu anda NASA tarafından katalizör, emici, sensör, yakıt depolama, ICF için iyon değişim hedefleri, X-ışını lazerleri, deniz altı boru hatları, uzay giysileri ve toz toplayıcı üretiminde kullanılmaktadır (Hrubesh, 1998). Aerوجلlerin katı kısmının dokusu, ultra ince parçacıklardan oluşur. Silika Aerوجلler, değeri %1 ila %10 arasında değişen küçük bir katı Silika fraksiyonuna sahiptir (Soleimani, Dorcheh, & Abbasi, 2008).

Silika Aerوجلlerin yoğunluğu genellikle kütle yoğunluğu (ρ_b) ve iskelet yoğunluğu (ρ_s) olarak bilinen iki farklı özelliğe göre belirlenir. ASTM D3766'ya göre iskelet yoğunluğu, ayrı katı malzeme parçalarının kütlelerinin, parçalardaki katı malzeme hacimlerinin toplamına ve parçalar içindeki kapalı gözeneklere oranıdır. Kütle yoğunluğu ise, “ayrı ayrı katı malzeme parçalarının kütlelerinin, her parçadaki katıların hacimlerinin toplamına, parçalar içindeki boşluklara ve belirli koleksiyonun parçaları arasındaki boşluklara oranıdır”.

Aerوجلlerin gözenek ağının açık gözenekli bir yapı olduğu gerçeği göz önüne alındığında, partiküllerdeki gözeneklerin iskelet yoğunluğu, dökme katı ile aynı veya çok yakın olmalıdır. Ayrıca, Aerوجلler gibi katı malzemelerin yoğunluğu doğrudan gözenekliliğe ve havanın yoğunluğuna bağlı olduğundan, Aerojel sentezinde kullanılan yöntem ve prosedür, Aerوجلlerin nihai yoğunluğu üzerinde büyük bir etkiye sahiptir (Woignier, & Phalippou, 1987). Aerojel yoğunluğunun belirlenmesinde yaygın olarak kullanılan teknik, helyum piknometre olarak bilinir. Aerوجلün yoğunluğunun belirlenmesinde en yaygın olarak kullanılan formül Denklem 1'de verilmiştir.

$$\rho_{aerوجل} = \rho_{sio_2} - \Phi \times (\rho_{sio_2} - \rho_{hava}) \quad (0 \leq \rho \leq 1) \quad (1)$$

$\rho_{aerوجل}$: Aerوجلün yoğunluğu

ρ_{sio_2} : Silisyumdioksit yoğunluğu

ρ_{hava} : Havanın yoğunluğu

Φ : Porozite

Woignier ve Phalippou (1987), bir helyum psycnometer yardımıyla Aerojeller için 2200 kg/m³ iskelet yoğunluğunu belirlemiştir (Woignier, & Phalippou, 1987). O zamandan beri, Aerojellerin yeni teknikler kullanılarak üretimindeki gelişmeler, yoğunluklarının 3-350 kg/m³'e düştüğünü görmüştür (Soleimani, Dorcheh, & Abbasi, 2008). Halihazırda inşaat sektöründe kullanılan Aerojelin ortalama 70-150 kg/m³ yoğunluğuna sahip olduğunu belirtmek gerekir (Baetens vd., 2011).

Hidrofobiklik.

Kullanım ve üretim tekniğine bağlı olarak Silika Aerojelleri hidrofilik veya hidrofobik olarak üretilir. İnşaat sektöründe Aerojellerin hidrofobikliği nem ile temas etmeleri nedeniyle büyük önem taşımaktadır. Aerojel ağındaki (Si-OH) silanol polar grubu, suyun emilmesine neden olur ve hidrofilik bir davranışa yol açar (Soleimani Dorcheh & Abbasi, 2008). Aerojellerin nem ile teması, gözeneklerdeki yüzey gerilimi nedeniyle Aerojellerin bozulmasına ve tahrip olmasına yol açar. Ayrıca, Aerojellerin gözeneklerini dolduran suyun varlığı, hafiflik ve gözeneklilik gibi Aerojellerin birçok önemli özelliğini bozar ve böylece termal iletkenlik gibi olumsuz özellikleri etkiler. Aerojellerin bu istenmeyen etkilerden korunması için, Aerojellerin su ve buhar itici olacak şekilde hidrofobik bir durumda üretilmesi gerekir. Silika Aerojeller genellikle, gözenek yüzeyine sililasyon ajanı gibi polar olmayan yan fonksiyonun eklenmesiyle hidrofobik hale getirilir. Polar olmayan yan fonksiyonun tanıtılması genellikle ortak öncü yöntemi ve türetme yöntemi olarak bilinen en yaygın iki yöntem kullanılarak gerçekleştirilir.

Ortak öncü yöntemi esas olarak, sol-jel adımı sırasında sol ile karıştırılan organik grubu içeren hidrofobik bir reaktiften oluşur ve daha sonra jel, metanolden yüksek sıcaklıkta süper kritik olarak kurutulur. Bu yöntem ortam basıncında kurutma yöntemlerinde de kullanılmaktadır(Cuce vd., 2014b).

Türetme yöntemi, jelin hidrofobik reaktif ve bir çözücü içeren bir kimyasal banyoya batırılmasından oluşur. Daha sonra jel, metanolden süper kritik olarak kurutulur.

TMOS ve TEOS ile birlikte eş öncüllerde veya türevlendirme reaktiflerinde en yaygın olarak kullanılan Organik gruplar, metiltrimetoksisilan, feniltrioksisilan, dimetilklorosilan, trimetilklorosilan, trimetiletoksisilan ve heksametildisilazan gibi organosilan bileşikleridir. Ayrıca, Methyltrimethoxysilane bir öncü olarak da kullanılabilir (A. V. Rao, Pajonk, Bhagat, & Barboux, 2004).

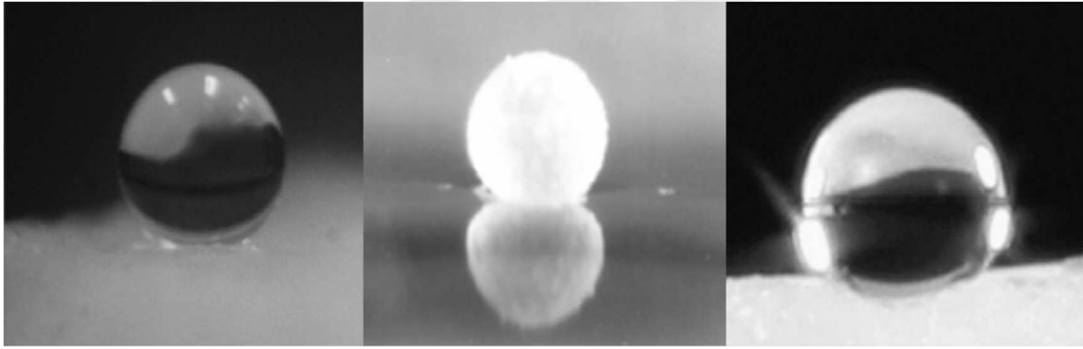
Aerojellerin hidrofobikliğinin değerlendirilmesi genellikle aşağıdaki denklem 2 yardımıyla belirlenen Aerojel yüzeyindeki su damlacığının temas açısı (θ) gibi belirli parametrelerin değerlendirilmesi ile gerçekleştirilir.

$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{2h}{w}\right) \quad (2)$$

Denklemden: "h" yüksek ve "w" Aerojel yüzeyine temas eden su damlacığının genişliğidir.

Damlacığın yüksekliği ve genişliği genellikle Şekil 7'de gösterildiği gibi hareketli mikroskop yardımıyla ölçülür (Soleimani, Dorcheh, & Abbasi, 2008).

Bir su damlacığının (v) hızı, eğimli bir hidrofobik yüzeyden belirlenir. Ortak öncül yöntemi, daha yüksek temas açısına sahip ancak opak olan Aerojellere yol açar. Öte yandan, türetme yöntemi şeffaf Aerojellerle sonuçlanır, ancak daha düşük temas açısı ile sonuçlanır (A. V. Rao vd., 2004).



Şekil 7. Silika Aerojel üzerinde bir su damlacığının resmi.

Aerojellerin mekanik özellikleri.

Katı malzemelerin basınç dayanımı gibi mekanik özelliklerin genellikle gözeneklilikle doğru orantılı olduğu iyi anlaşılır. Bu nedenle, Silika Aerojellerin oldukça gözenekli yapısı göz önüne alındığında, mekanik mukavemetlerinin daha düşük olacağı sürprizlerle karşılaşmaz. Bununla birlikte, Silika Aerojellerin basınç dayanımının nispeten makul derecede yüksek olduğu kabul edilir. Literatürde daha önce bildirilen değerler, iyi bir yük taşıma olarak kabul edilen 300 kPa'ya kadar çıkmaktadır. Öte yandan, yaklaşık 16 kPa olan çok düşük gerilme mukavemetleri, Aerojelleri çok kırılgan hale getirir. Literatürde, bir fiber matris dahil edilerek Aerojellerin gerilme mukavemetinin iyileştirilmesine yönelik çalışmalar bildirilmiştir (Baetens vd., 2011).

Aerogellerin Karakterizasyonu

Aerogellerin karakterizasyonu için genellikle bir dizi teknik kullanılır. Sık kullanılmasına rağmen, bu tekniklerin her birinin avantajları ve sınırlamaları vardır. Bunlardan bazıları aşağıda sıralanmıştır.

- Aerogel'in ısı yalıtımlı çimento esaslı kompozitlerin üretiminde kullanılmasıyla, amorf Aerogelin çimento esaslı kompozitlerin kristallik yapısı üzerindeki etkisinin belirlenmesi büyük önem taşımaktadır. Bu genellikle X ışını difraksiyonu (XRD) analizi kullanılarak elde edilir. XRD, nanoyapıya sahip kompozitlerde kristalinitenin değerlendirilmesi için güvenilir bir teknik olarak bilinir (Abbas vd., 2019; Yang vd., 2016).
- Malzemelerin morfolojik ve yapısal özelliklerinin temel detaylarının değerlendirilmesi için Elektron mikroskobu teknikleri, özellikle taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve transmisyon elektron mikroskobu (TEM), en çok kullanılan iki tekniktir (Abbas vd., 2019).
- Çimentolu malzemelerin termal yayılımını, yoğunluğunu ve mekanik dayanımını büyük ölçüde etkileyen ana özelliklerin, gözeneklerin boyutu, şekli, sayısı ve bağlayıcılığı olduğu bilinmektedir. Bu nedenle, en çok aranan tekniğin, nitrojen gazı fizisorpsiyonu ve püskürtmeli cıva porozimetrisi (MIP) olduğu sonucuna varılır (Hanif, Lu, Cheng, vd., 2017; Strzalkowski, & Garbalińska, 2016).
- Nitrojen absorpsiyon ölçümleri kullanılarak spesifik yüzey alanının belirlenmesi gerçekleştirilebilir. Genel olarak, Aerogel spesifik yüzey alanının BET'i 200-1000 m².g⁻¹ arasında değişir. Bununla birlikte, bu tekniğin yalnızca yaklaşık 30 nm'ye kadar olan gözenekleri tespit edebilmesi nedeniyle, çıkarılan gözenek boyutu dağılımının ve toplam gözenek hacminin tamamen doğru ve güvenilir olmadığına inanılmaktadır (J. Fricke, & Tillotson, 1997; Jochen Fricke, 1992).
- Cıva Porozimetrisinin kullanımına gelince, cıvadaki yüzey gerilimi göz önüne alındığında, gerçekte mevcut olandan çok daha büyük gözenek boyutlarının elde edilmesine yol açan penetrasyon değil, yalnızca ince iskeletin sıkışması gerçekleşir (J. Fricke, & Tillotson, 1997; Graves, Davis, & Smith, 1988).

Termal Özellikler

Termal özelliklerin anlaşılması, farklı malzemelerin termal davranışlarının anlaşılmasında önemli bir yere sahiptir. Tablo 2, termal özelliklere genel bir bakışı göstermektedir. Isıl iletkenlik (λ), bir maddenin ısıyı iletme kabiliyetidir ve W / mK cinsinden ölçülür. U-değeri olarak da bilinen ısıl geçirgenlik (U), bir yapının bir metrekaresi boyunca ısı

transfer oranını tanımlar ve W / m²K cinsinden ölçülür. R-değeri olarak da bilinen termal direnç (R), ısı transfer mekanizmasının ortadan kaldırılması nedeniyle ısı akışına karşıdır ve m²K/W cinsinden ölçülür.

Tablo 2. *Termal Özelliklere Genel Bakış.*

Termal boyut	Sembol	Ölçü birimi
Termal iletkenlik	λ	W/mK
Termal geçirgenlik	U	W/m ² K
Termal direnç	R	m ² K/W

Termal iletkenlik ve Termal direnç hesaplanmak için aşağıda verilen denklem 3 kullanılmaktadır:

$$\lambda = \frac{S}{R} \quad (3)$$

Denklemde "S", malzemenin kalınlığıdır.

Isıl direnç ve ısı geçirgenlik hesaplanmak için aşağıda verilen Denklem 4 kullanılmaktadır:

$$R = \frac{1}{U} \quad (4)$$

Isı yalıtım malzemeleri düşük ısı iletkenliğine sahiptir ve bu nedenle ısı akışını geciktirir. Termal geçirgenlik, bir bölme veya yapı boyunca termal akışı değerlendirmek için en çok kullanılan özelliktir. Düşük ısı iletkenliği, düşük ısı geçirgenliğine sahip ince bina zarflarının kullanılmasına izin verir.

Isı aktarımı, malzemenin yüzeyleri arasındaki sıcaklık farkından kaynaklanır. Isıl iletkenlik altı kısımdan oluşur: katı hal ısı iletkenliği (λ_{solid}), gaz hali ısı iletkenliği (λ_{gaz}), radyasyon kızılotesi ısı iletkenlik (λ_{rad}), gaz hali konveksiyon ısı iletkenliği (λ_{konv}), ikinci derece ısı iletkenlik (λ_{kuplaj}) ve kaçak ısı iletkenlik (λ_{leak}) (Jelle, 2011). Aşağıdaki Denklem 5'te gösterildiği gibi, termal iletkenliği hesaplamak için bu özellikler birbiriyle toplanır:

$$\lambda(T) = \lambda_{\text{solid}}(T) + \lambda_{\text{gaz}}(T) + \lambda_{\text{rad}}(T) + \lambda_{\text{konv}}(T) + \lambda_{\text{kuplaj}}(T) + \lambda_{\text{leak}}(T) \quad (5)$$

Düşük bir toplam termal iletkenlik elde etmek için bileşenlerin her biri en aza indirilmelidir. Yalıtım açısından en uygun noktaya, katkıların toplamının minimum olduğu yerde ulaşılır (Cuce vd., 2014b).

Aerojelin Yapı Sektöründe Uygulanması

Yukarıda bahsedildiği gibi, cephe kaplaması vasıtasıyla binadan kaynaklanan ısı kaybı, yapı sektörünün tükettiği enerji miktarının artmasına büyük ölçüde katkıda bulunmaktadır. Bu nedenle, enerji kayıplarının azaltılması, daha az enerji tüketimine ve dolayısıyla karbondioksit emisyonlarının azalmasına neden olacaktır. Şu anda hemen hemen her inşaat projesinde binanın dış cephesi büyük bir kısmını beton, harç, sıva, dış ve iç kaplama ve tuğla gibi çimento esaslı malzemelerden oluşturmaktadır. Bu nedenle, binaların enerji kayıplarını azaltmanın en iyi yolu, bu çimento esaslı malzemelerin ısı iletkenliğinin azaltılmasıdır. Daha az enerji kullanarak her yaşam alanındaki yaşam koşullarının iyileştirilmesi, dünyadaki birçok araştırmacının ilgisini çeken bir araştırma olmuştur.

Jia, Li, Liu. P., ve Jing, Q. (2018) yeni bir ısı yalıtım kompozitinin oluşumunda Aerojel genişletilmiş perlite dahil edilmesinin etkisini araştırdı. Çalışmalarında, başlangıçta, Aerojel sentezi için çok ihtiyaç duyulan Silikanın öncüsü ve başlangıç malzemesi olarak endüstriyel sodyum Silikatı kullanarak Aerojeli sentezlediler. Daha sonra SiO₂ hidrosolü, Aerojel genişletilmiş perlit ısı yalıtım kompoziti adını verdikleri yeni bir ısı yalıtım malzemesi oluşturmak için ortam basıncı ve vakum basıncında fiziksel adsorpsiyon tekniği kullanarak genişletilmiş perlite emdirdiler. Çalışmalarının bir sonucu olarak, Aerojeli, genişletilmiş perlitin gözenekli yapısına eşit şekilde dağıtmanın mümkün olduğunu buldular. Bununla birlikte kimyasal olarak kararlı yeni bir Aerojel ile genişletilmiş perlit ısı yalıtım kompoziti elde etmek mümkün olduğunu buldular. Ek olarak, bu yeni üretilen kompozit, düz genişletilmiş perlitten yaklaşık 50-150 kat daha büyük ve 100-280 kat daha gözenekli bir yüzey alanına ve mezogözenekli bir yapıya sahipti. Bununla birlikte, Aerojel genişletilmiş perlit kompozitlerinin yığın yoğunluğunun, ortam basıncında ve vakum basıncında üretilen Aerojel ile şişirilmiş perlit kompozit için harcanan perlitinkine kıyasla sırasıyla %24-40 ve %29-46 arttığını bildirmişlerdir. Dahası, düz genişletilmiş perlitin aksine, bu yeni kompozitin hidrofobik olduğu bulundu ve bu da termal yalıtım amaçları için çok daha iyi hale getirdi. Genel olarak, bu yeni üretilen malzemenin ısı iletkenliğinin, ortam basıncında üretilen kompozitler için düz genişletilmiş perlite kıyasla yaklaşık %14,7-31,8 daha az olduğunu bildirdiler. Vakum basıncında üretilen Aerojel şişirilmiş perlitin ısı iletkenliği, sentezlenenlere ve ortam basıncına göre %6,6 -%16,1 oranında azalmıştır (Jia, Li, Liu, & Jing, 2018).

Liu, Z. H., Wang, F., ve Deng (2016) çimento esaslı harçlara çeşitli oranlarda kısmi kum ikame malzemesi olarak Silika Aerojel katılarak ısı yalıtımlı çimento esaslı bir malzemenin geliştirilmesi üzerine araştırma yapmışlardır. Kumun %60 oranında Silika Aerojel ile değiştirilmesinin elde edilen harcın ısı iletkenliğini 0,1524 W/mK'ye düşürdüğü sonucuna

varmışlardır. Ayrıca, karışıma sırasıyla %0,2, %0,05 ve %1 oranında lif, toz ve hava sürükleyici ajanın eklenmesi ile termal iletkenlik 0,0859 W/mK'ye çok daha fazla düşürülmüştür (Z. hui Liu, Wang, & Deng, 2016).

Stahl, Brunner, Zimmerman ve Wakili (2017) tarihi binaların kültürel ve tarihi mirasından ödün vermeden yenilenmesi üzerine yaptıkları çalışmada, Silika Aerojel esaslı yüksek yalıtımlı sıva kullanımı üzerine çalışarak, 5-6 cm kalınlığında sıva uygulaması ile binanın duvarlar üzerinden ısı iletkenliğinin başlangıç değerinin üçte birine düştüğü sonucuna varmışlardır. Dahası, küf riskini önemli ölçüde azaltmış ve termal konfor önemli ölçüde artırmışlardır (Stahl vd., 2017).

Wang, L., Liu, P., Jing, Q., Liu, Y., Wang, W., ve Li (2018) geleneksel agregayı farklı oranlarda Silika Aerojel granülleri ile doldurulmuş genişletilmiş perlit ile değiştirerek üretilen betonun mukavemet ve ısı özellikleri üzerindeki etkisini araştırmıştır. Çalışmalarında, beton üretimi için agrega malzemesi olarak Silika Aerojel ile doldurulmuş genişletilmiş perlit kullanmışlardır. Çalışmaları sonucunda, yeni üretilen betonun hem mekanik dayanımının hem de ısı iletkenliğinin, karışımlarında bulunan Aerojel ile doldurulmuş genişletilmiş perlit miktarı ile ters orantılı olduğunu bildirmişlerdir. Ayrıca derecelendirilmemiş agrega ile üretilen betonun mekanik dayanımı ve ısı iletkenliği, derecelendirilmiş agrega ile üretilen betona göre daha yüksektir. Genel olarak, doğal agregayı değiştiren Aerojel ile doldurulmuş %100 harcanan perlit ile üretilen betonun 0,098 W/mK kadar düşük bir termal iletkenliğe ve 3,71 MPa'lık bir basınç dayanımı değerine sahip olduğunu bulmuşlardır (Wang vd., 2018).

Abbas, Khalid, Ban, Kim ve Lee, H. (2019), hafif, ısı yalıtımlı çimento esaslı bir harcın üretimi üzerine araştırma yapmıştır. Çalışmalarında, kumu kısmen çeşitli oranlarda Silika Aerojel ile değiştirerek harç ürettirler. Çalışmalarında kullanılan Silika Aerojel, yüksek Silika içeriği sayesinde başlangıç malzemesi olarak pirinç kabuğu kullanılarak sentezlenmiştir. Çalışmalarında kullanılan Silika Aerojelin sentezi için sol-jel tekniği kullandılar. Silika Aerojelin, çimento esaslı harçların mekanik ve ısı özellikleri üzerindeki etkisini değerlendirmek için, kumu Silika Aerojel ile hacimce %25, %50, %75 ve %100 oranında değiştirerek çimento esaslı harç ürettirler. Çalışmaları sonucunda uygun yüzey alanı, gözeneklilik ve hafifliğe sahip Silika Aerojelin pirinç kabuğu atıklarından başarıyla üretildiğini bildirmişlerdir. Ayrıca, kumun, hacimce %25 oranında sentezlenmiş Silika Aerojel ile değiştirilmesiyle, ısı iletkenliği, kontrol numunesine kıyasla %35 azalmıştır. Hacimce %100 Silika Aerojel kullanımında elde edilen harç, 0,33 W/mK'lik bir termal iletkenliğe sahipti. Ayrıca, kompozitlerin yoğunluğunun, %100 kum kullanılarak üretilen numuneye göre hacimce %62 Silika Aerojel içeren numunede %46 azaldığını bildirmişlerdir (Abbas vd., 2019).

Wang, Y., Huang, Wang, D., Liu, Y., Zhao (2019) farklı higrotermal ortamda Aerojel ile birleştirilen betonun ısı iletkenliğini deneysel olarak araştırmışlardır. Çalışmalarında süper plastikleştirici maddeler ilavesiyle ve kum hacmini %0-60 arasında değişen farklı oranlarda Aerojel ile kısmen ikame ederek beton numuneler üretmişlerdir. Sıcaklığın ve nemin, kuru ortamda 20-90 °C arasında, nem oranını 35 °C'de %0-100 arasında değiştirerek, üretilen numunelerin ısı iletkenliğine etkisini araştırmışlardır. Araştırmaları sonucunda, üretilen Aerojel katkı 1 beton numunelerinin ısı iletkenlik değerlerinin, karesel bir fonksiyon olarak hacimsel Aerojel ikame kum miktarına göre değiştiğini ve kaydedilen en yüksek sıcaklık düşüşünün en yüksek içerikte %79,3'e ulaştığını bildirmişlerdir. Ayrıca, Aerojel katkı 1 betonun ısı iletkenliği ile sıcaklık arasında orantılı bir ilişki olduğu sonucuna varmışlardır. Sıcaklık artışı ile ısı iletkenlik artmıştır. Isı iletkenlik değerinde kaydedilen en yüksek artış, sıcaklık 20-90 °C arasında arttığında %15,5 oldu. Ayrıca ısı iletkenlik nem %0-100 arasında değiştiğinde ısı iletkenlik değerlerinin %19,51 azaldığını bildirmişlerdir (Y. Wang vd., 2019).

Seo, Bae, Jang, I., Park, Yang, B., Lee, K. (2020) agrega malzemesinin %0 ile %75 arasında değişen oranlarda Aerojel ile ikame edilmesiyle üretilen Alkali aktive edilmiş uçucu kül ve cüruf kompozitlerinin ısı 1 davranışını araştırmıştır. Çalışmalarında, üretilen numuneleri 200 °C ile 800 °C arasında değişen sıcaklıklara maruz bırakarak ısı 1 işleme tabi tutmuşlardır. Sonuçlarından elde edilen bulgulara göre, Aerojel eklenmesinin termal genleşmeyi 600 °C'ye ulaşan sıcaklıklara kadar düşürdüğünü bildirmişlerdir. Aerojel ilavesinin 600 °C'nin üzerindeki sıcaklıklarda hızlı termal genleşmeye neden olduğunu bulmuşlardır. Yüksek miktarda Aerojel içeren numunelerin gözenek yapısı, yüksek sıcaklıklara maruz kaldıklarında önemli ölçüde değişmiştir. Isı iletkenliğin kumun yerini alan Aerojel miktarındaki artışla birlikte azaldığını bildirmişlerdir. %75 Aerojel içeren numunelerin ısı iletkenlik değeri, kontrol numunesinin yarısı kadar olduğu, Aerojelin dahil edilmesi ile 800 °C'ye ulaşan daha yüksek sıcaklıklara maruz kaldıktan sonra basınç dayanımında kayıp oluşmaması yönünde faydalı olduğunu bulmuşlardır.

Referans numune muazzam bir mukavemet kaybı gösterirken, diğer numuneler Aerojel miktarına bağlı olarak başlangıç basınç dayanımı değerlerinin %40 ile 80'ini koruyabilmişlerdir (Seo vd., 2020).

ÜÇÜNCÜ BÖLÜM

Materyal ve Yöntem

Materyal

Silika Aerojel Tozunun (SAT) sentezi için hidroklorik asit (HCl), Trimetilklorosilan (TMCS), Etanol (MeOH, CH₃OH), n-Heptan (C₇H₁₆), boncuk formundaki Sodyum Hidroksit kimyasalları ve volkanik tüf kullanılmıştır. Ayrıca alçı esaslı yüksek performanslı sıva üretimi için üretilen Silika Aerojel tozu, su ve alçı malzemeleri kullanılmıştır. Kullanılan malzemelerin özellikleri ve içerikleri aşağıdaki bölümlerde ayrı ayrı belirtilmiştir.

Bayburt volkanik tüf atıkları.

Bu çalışmada kullanılan volkanik tüf atıklarının kimyasal ve fiziksel özellikleri tablo 3'te verilmiştir. Bayburt ili yerel taş ocaklardan temin edilen volkanik tüf atığı (VTA) olarak bilinen Beyaz Bayburt Taşı kullanılmıştır. Şekil 8'de VTA, yüksek Silika içeriğinden dolayı SAT sentezi için başlangıç malzemesi olarak kullanılmak üzere seçilmiştir. Ayrıca atık malzemelerin yeni kompozit üretimine dönüştürülmesi ile inşaat sektörünün sürdürülebilirlik hedefleri desteklenmiştir.

Tablo 3. Volkanik Tüf Atıklarının Kimyasal ve Fizikler Analiz Verileri.

Kimyasal İçerik	Yüzdesi (%)
Toplam SiO ₂	69,96
Al ₂ O ₃	12,25
Fe ₂ O ₃	0,33
CaO	2,52
MgO	1,20
SO ₃	0,05
K ₂ O	2,43
Na ₂ O	0,57
Kızdırma Kaybı	10,08
Cl	0,0280
Toplam	99,42
Fiziksel Özellikler	
45 µ elek üzeri (%)	7,0
Özgül Ağırlık (g/cm ³)	2,32
Blaine (cm ² /g)	7194
Puzolanik Aktivite	8,8



Şekil 8. Bayburt ili ocaklarından çıkan volkanik tuf blokları.

Su.

SAT sentezi sırasında jelin yıkama işlemi için kullanılan su olarak, çift arıtılmış saf su kullanılmıştır. Silika Aerojel alçılı (SAA) sıva numunelerinin üretiminde ise karışım suyu olarak içilebilir şebeke suyu kullanılmıştır.

Alçı.

Alçı, insanoğlunun kullandığı en eski yapı malzemelerinden biridir. İlk kullanımı 4000 yıl öncesine dayanmaktadır. Bugüne kadar en yaygın kullanılan inşaat malzemelerinden biridir. Alçı, çevre dostu ve düşük maliyetli olması gibi diğer özelliklerinin yanı sıra mükemmel yangın dayanımı özelliği nedeniyle yaygın olarak kullanılmaktadır. İnşaata kullanımı için β hemihidrat türü tercih edilmiştir. Su ile sertleşip dayanımını kazanabilmesi için gereken su miktarı kütlece sadece 0,186 iken, geniş spesifik alanı göz önüne alındığında yeterli işlenebilirliğe ulaşmak için normalden daha fazla miktarda su kullanılır. Kullanılan bu yüksek su miktarı alçı sıva kompozitlerine, zayıf mekanik özelliklerin yanında iyi termal özellikler katmaktadır.

Volkanik tuf atıklarından sentezlenen SAT mekanik ve fiziksel özelliklere etkisinin deneysel olarak belirlenmesi amacıyla, laboratuvar ortamında ABC alçı tarafından üretilen kaba alçı kullanılarak SAA sıva örnekleri üretilmiştir. Kullandığımız kaba alçı yerel işletmelerden temin edilmiştir (Şekil 9). Yukarıda belirtilen alçı, TS EN 13279-1,2'nin tüm şartlarına uygundur. Çalışmada kullanılan alçının özellikleri Tablo 4'te verilmiştir.



Şekil 9. Bu çalışmada kullanılan alçı.

Tablo 4. Alçının Özellikleri.

Özellikler	Değerler
Isı iletkenliği	0,30 W/mK
Basınç dayanımı	2,5 N/mm ² min
Çekme dayanımı	1 N/mm ² min
Önerilen su / bağlayıcı oranı	0,6-0,625
Kuruma zamanı	4 gün maksimum
Önerilen uygulama kalınlığı	5 mm

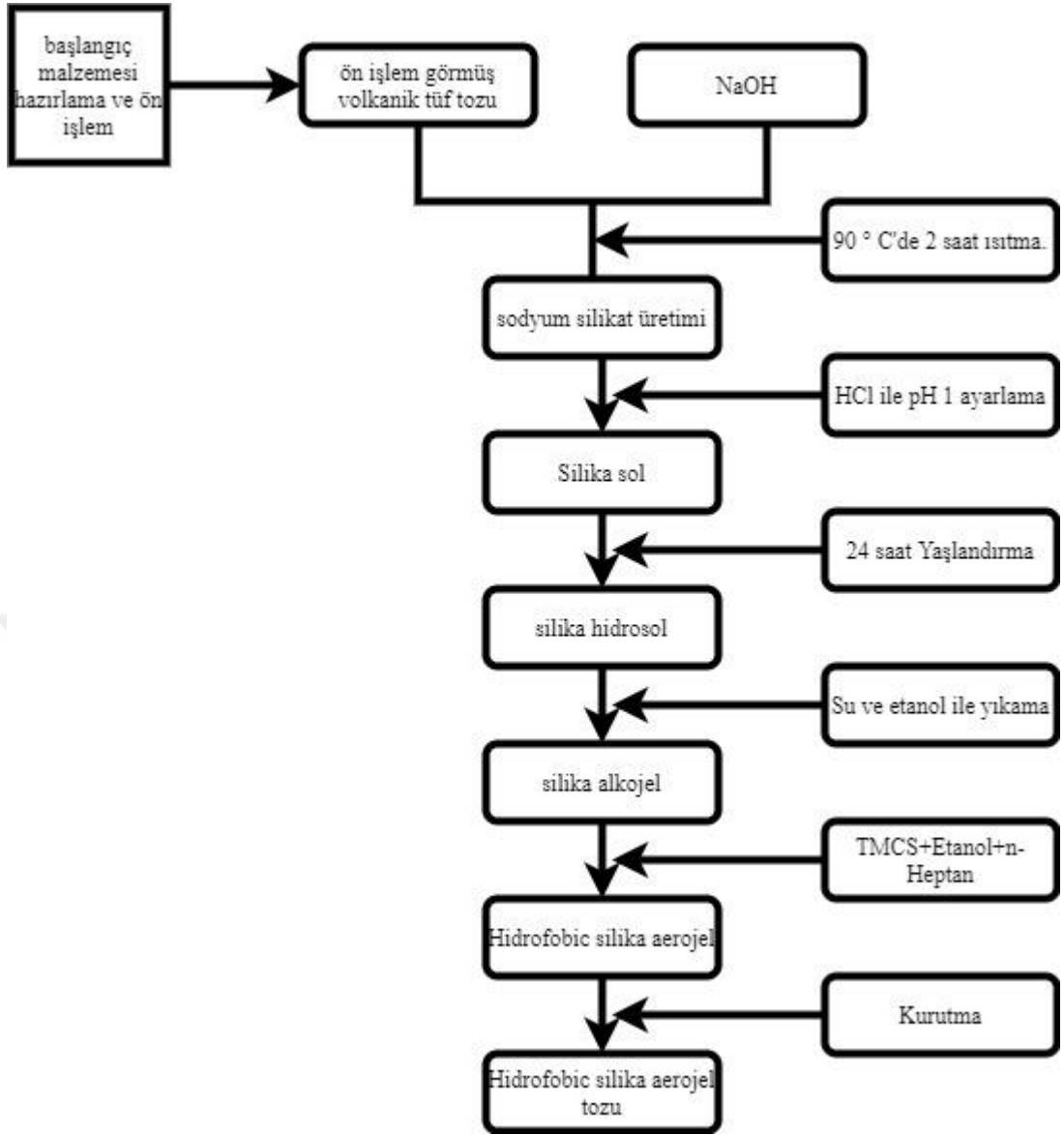
Yöntem

Silika Aerojel üretimi.

Bu çalışmada, SAT sentezi için çeşitli kimyasallar kullanılarak sırayla aşağıdaki gibi işlemler gerçekleştirilmiştir.

- Başlangıç materyalinin jel oluşumu için kullanılan hidroklorik asit (HCl),
- Yüzey modifikasyonu ve hidrofobizasyon için trimetilklorosilan (TMCS),
- Çözücü değişimi için etanol (MeOH, CH₃OH), n-Heptan (C₇H₁₆),
- Sodyum Silikat Na₂SiO₃ sentezi için sodyum öncüsü olarak kullanılan boncuk formundaki Sodyum hidroksit

kullanılmıştır. Yukarıdaki tüm kimyasal malzemeler Sigma-Aldrich firmasından temin edilmiştir. SAT sentezi Şekil 10'da özetlenmiştir.



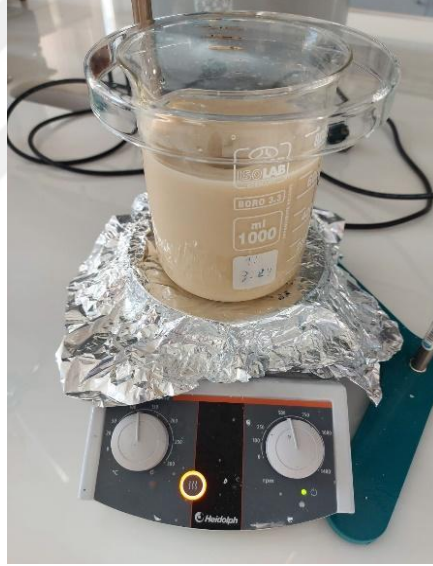
Şekil 10. Bu çalışmanın Silika Aerogel tozunun özet sentezi.

SAT sentezi, sol-jel yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu yöntem, genellikle küçük sıvı moleküllerden katıların Sol-jel yönteminin sentezi için kullanılır (Abbas vd., 2016). Şekil 10'a SAT sentezi akış şeması gösterilmiştir. Bayburt ili ocaklarından volkanik tüf atıkları toplanmış, daha sonra yatay ekseninde dönen bilyalı değirmen yardımıyla ezilerek toz haline getirilmiştir. Dane büyüklüğü 5-10 μm arasında olacak şekilde öğütülmüştür. Hazırlanan toz malzeme daha sonra kullanılmak üzere hava ile temasının kesilmesi suretiyle plastik torbalar içinde muhafaza edildi. SAT sentezi için, önceden işleminden geçirilmiş volkanik tüf tozunun 1M NaOH ile karıştırılmasıyla sodyum Silikat üretildi. Karışıma daha sonra termal olarak 4 saat 150 °C'de ısıtma işlemi uygulanmıştır. (Şekil 11).

Volkanik tüf tozunun ön işlemi, volkanik tüf tozu pH=1 oluncaya kadar, hidroklorik asit ile karıştırıldı. Karıştırma işlemi 2 saat boyunca kaynama sıcaklığında gerçekleştirildi (Şekil 11). Üretilen sodyum Silikat daha sonra Silika sol oluşumu için kullanıldı. Silika sol oluşum

işlemi, sodyum Silikat içerisine HCl'in yavaş ve sabit bir hızla damlatılmasıyla gerçekleştirildi. Optimum düşürme hızı, bir dizi deneme yanılma sonrasında belirlendi. Oluşan Silika sol, ortam sıcaklığında 24 saat yaşlandırıldı. Silika sol yaşlanma süresi sonrasında ortaya çıkan Silika hidrosol yıkanma prosesi tabi tutuldu. Yıkanma prosesi ön denemeler sonucunda optimum yıkanma sayısı belirlenerek yapıldı. Yıkanma her iki saatte bir su değiştirilerek 4 kez distile su ile yıkandı.

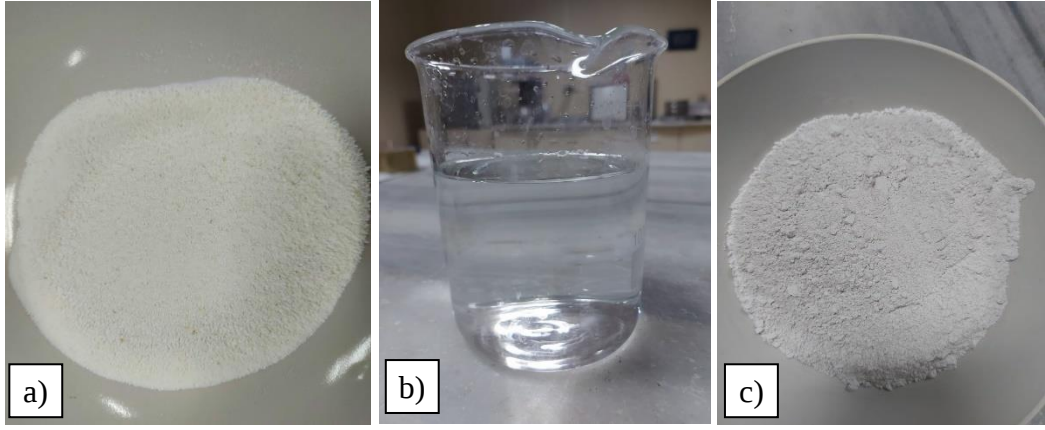
Yıkandıktan sonra Silika hidrosol, Silika alkojel oluşturmak için 24 saat boyunca etanol içine bekletildi. Silika alkojel daha sonra çözücü değişimi ve daha fazla hidrofobizasyon için TMCS, n-heptan ve etanol olan sililasyon karışımının içinde 24 saat boyunca batırıldı. Kullanılan TMCS: n-heptan: etanol oranı 1: 1: 1 idi. Bu işlemin tamamlanmasının ardından, alkojel, hidrofobik Silika Aerojel elde etmek için, 24 saat boyunca ortam sıcaklığında, ardından 140°C'de 3 saat süreyle kurutuldu. Sentezlenen Silika Aerojel, daha sonra kullanılmak üzere sızdırmaz poşetlerde muhafaza edildi.



Şekil 11. Başlangıç malzemesi ön işlemi.

Silika Aerojel alçı sıva kompozitlerinin üretimi.

Bu çalışmada, laboratuvarında sentezlenen SAT, alçı sıvanın içerisine hacimce %25, %50, ve %75 oranlarında katılarak Silika Aerojel katkılı alçı sıva numuneleri üretilmiştir. Karışımda kullanılan malzemeler Şekil 12'de verilmiştir.



Şekil 12. Alçı esaslı kompozitlerin üretiminde kullanılan malzemeler: a) Silika Aerojel b) musluk suyu c) alçı sıva.

Birleştirme malzemesi olarak alçı kullanılırken, SAT, elde edilen karışımda daha gözenekli bir yapıyı teşvik etmek amacıyla dolgu malzemesi olarak alçıya dahil edilmiştir. Ayrıca alçı ile reaksiyona girerek hidrat ürünleri yani sıvanın mukavemetinden sorumlu kalsiyum sülfat hidrat ve işlenebilirliğin sağlanması için musluk suyu ilave edilmiştir.

Laboratuvarda numune üretimi için üç farklı karışım türü kullanılmıştır. Karışıma SAT hacimce % miktarına bağlı olarak eklenmiştir. Hazırlanan her karışımın miktarı ayrıntılı olarak tablo 5'te verilmiştir. Tablo 5'te görüldüğü gibi, referans karışım sadece alçı ve su karıştırılarak hazırlanmıştır. Karışımların geri kalanı, alçı, su ve SAT'ı hacimce% 25, %50 ve %75 gibi farklı miktarlarda karıştırılarak numuneler hazırlanmıştır.

Numunelerin üretimi sırasında, EN 1015-2'ye (160 ± 10 mm akış değeri) uygun olarak tüm sıvalar için ihtiyaç duyulan uygun işlenebilirliğe uyması için her karışım türünde su / bağlayıcı oranı (s/b) optimize edilmiştir. s/b oranının optimizasyonu, SAT'ın % hacmindeki artış, işlenebilirliği zorlaştırması nedeniyle ve bu yüzden kalıba döküm yapılamaması sebebiyle yapılmıştır. Bu durum, literatürdeki önceki çalışmalarla da uyumludur (Abbas vd., 2019; Soares, de Fátima Júlio, Flores-Colen, Ilharco, & Brito, 2018).

Karıştırma prosedürü, başlangıçta alçının SAT ile önceden belirlenmiş oranlarda karıştırılmasından ibarettir, daha sonra alçı bağlayıcı ile SAT'ın homojen karışabilmesi için karışıma yavaşça su ilave edilmiştir. Elde edilen taze karışım kalıplara dökülmüştür. Numuneler 7 gün boyunca ortam sıcaklığında kürlenmiştir. Bu kürlenme süresi, alçı sıva bazlı kompozitlerin optimum mukavemetine ilişkin literatürde bildirilenlere uygun olarak seçilmiştir (Khalil, Ibrahim, & Mobarak, 2005). Deneyler yapılmadan önce, numuneler 0,01'den büyük ağırlık değişimi kaydedilmeyene kadar etüvde $105\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'de bekletilmiştir.

Tablo 5. Numune İçerikleri ve Numaralandırma Açıklaması.

Numune Kodu	Numune Tanımı	SAT hacim içeriği (%)
R	Alçı + Su	0
SAA 25	Alçı + Su+ SAT	25
SAA 50	Alçı + Su+ SAT	50
SAA 75	Alçı + Su+ SAT	75

Bu çalışmada seçilen numunelerin tanımlama yöntemi, karışıma katılan Silika Aerojel hacminin % miktarına dayanmaktadır. Örneğin, SAA 25, karışımında hacimce %25 SAT içeren bir numuneyi temsil eder. Böylece SAA, Silika Aerojel Alçılı sıva anlamına gelir. Şekil 13, bu çalışmada seçilen örnek tanımlama için ayrıntılı bir açıklama vermektedir.

S	A	A	25
Silika	Aerojel	Alçı	Hacimce Aerojel yüzde miktarı

Şekil 13. Çalışmadaki numunelerin seçilen tanımlama yöntemin açıklaması.

Üretilen Aerojeli karakterizasyon çalışmaları.

XRD analizi.

Sentezlenen SAT yanı sıra eklenmesi ile üretilen alçı kompozitlerinin kristal özelliklerinin belirlenmesi için X-ışını kırınımı (XRD) kullanıldı. XRD, farklı malzemelerin kristalografik özelliklerinin belirlenmesi söz konusu olduğunda yaygın olarak kullanılan bir analiz tekniğidir. Bu çalışmada, XRD analizinin performansı bir X-ışını difraktometresi (Rigaku ürünü) yardımıyla gerçekleştirilir. Tüm tarama aktiviteleri 2 theta 5⁰-65⁰ aralığında gerçekleştirilir. Taramalar sırasında 20/dak'lık açısal hız kullanılır.

BET analizi.

Yüzey alanı ve gözeneklilik, birçok malzemenin kalitesi ve işlevselliği için çok önemli bir özelliktir. Aynı şekilde, gözeneklilik ve yüzey alanı bilgisi, farklı doğal veya sentetik malzemelerin potansiyel uygulamalarını, oluşumunu ve yapısını anlamada son derece önemli bir özelliktir. Bu nedenle olası kullanım alanlarının belirlenmesi için bu özelliklerin doğru analiz edilmesi çok önemlidir.

BET teorisi, gaz moleküllerinin sert bir yüzeye fiziksel olarak adsorpsiyonunu açıklar ve bir malzemenin spesifik yüzey alanını gaz adsorpsiyonu ile ölçmek için önemli bir temel sağlar. 1938'de Stephen Brunauer, Paul Hugh Emmett ve Edward Teller bir dergide ilk kez BET teorisi hakkında bir makale yayınladılar. BET kavramı, bu araştırmacıların soyadlarının ilk

harflerinin bir araya getirilmesiyle oluşturulmuştur. Malzemelerin yüzey alanlarını hesaplamak ve adsorpsiyon davranışlarını incelemek için kullanılır (Brunauer, Emmett, & Teller, 1938).

Ölçümlerde kullanılan cihaz minimum 0,01 m²/g'a kadar ölçüm yapabilmektedir. Sonuçlar bilgisayar monitöründen çok noktalı BET yüzey alanı, tek noktalı BET yüzey alanı ve çok noktalı Langmuir yüzey alanı değerleri olarak alınabilmektedir.

Kompozitlerin fiziksel özellikleri.

Su emme.

Bu çalışmada SAA kompozitlerin su emme deneyi için TS EN 12390-7 göre yapıldı, deneyler 25x25x25 mm boyutlarında her bir karışım modelinden üçer numune kullanılarak gerçekleştirildi. Numuneler başlangıçta 24 saat su içerisine batırıldı. Bu sürenin sonunda, doymuş ağırlıklarını (DA) belirlemek için 0,001g hassaslık ölçeğinde tartıldılar. Son olarak, numunelerin kuru ağırlıklarını (KA) belirlenmesi için 110 °C'de 24 saat fırında kurutulmuştur. Bu süre sonunda numunelerin ağırlıkları tartılmıştır. Porozite hesaplamalarında kullanılan formül Denklem 6'da verilmiştir.

$$Su\ emme\ (\%) = \frac{(DA - KA)}{KA} \times 100 \quad (6)$$

DA: doymuş ağırlık, KA: kuru ağırlıktır.

Yoğunluk.

Bu çalışmanın deney aşamasında üretilen SAA kompozitlerinin yoğunluğu 25×25×25 mm boyutlarında her bir karışım modelinden üçer numune kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Yoğunluğun hesaplanması, yoğunluğun hesaplanması için yaygın olarak kullanılan bir formül olan Denklem 7 yardımıyla yapılmıştır.

$$\rho = \frac{m}{V_d} \quad (7)$$

ρ : SAA'in yoğunluğu, m: SAA'in tartılmış kütlesi ve V_d : SAA'in hesaplanan dolu hacmidir.

Porozite.

Bu çalışmada porozitesi tayini, 25x25x25 mm boyutlarında her bir karışım modelinden üçer numune kullanılarak gerçekleştirildi. Numuneler başlangıçta 24 saat su içerisinde doymuş hale getirildi. Bu sürenin sonunda, doymuş ağırlıklarını (DA) belirlemek için 0,001g hassaslık ölçeğinde tartıldı. Son olarak, numunelerin kuru ağırlıklarını (KA) belirlenmesi için 110 °C'de

24 saat fırında kurutulmuştur ve bu süre sonunda numunelerin ağırlıkları tarttırılmıştır. Porozite hesaplamalarında kullanılan formül denklem 8'de verilmiştir.

$$\text{Porozite} = \frac{(DA-KA)}{KA} \quad (8)$$

Denklemde; DA: doymuş ağırlık, KA: kuru ağırlıktır.

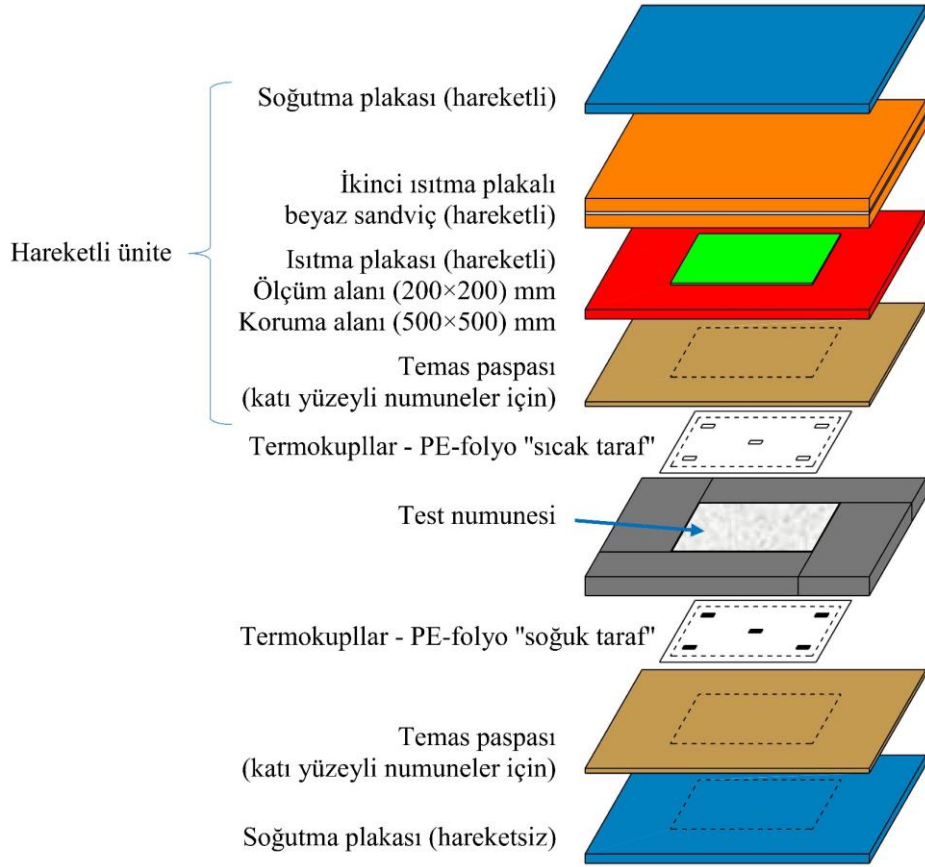
Termal iletkenlik.

SAA numunelerinin ısı iletkenlik deneyi Gümüşhane Üniversitesi İnşaat Mühendisliği bölümü Yapı malzemesi laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Isıl iletkenlik testi için 120x120x10 mm boyutlarında numuneler kullanılmıştır. Bu amaçla kullanılan kalıplar şekil 17'de gösterilmektedir. Ölçümler TLP 300 cihaz kullanılarak yapılmıştır (şekil 14).



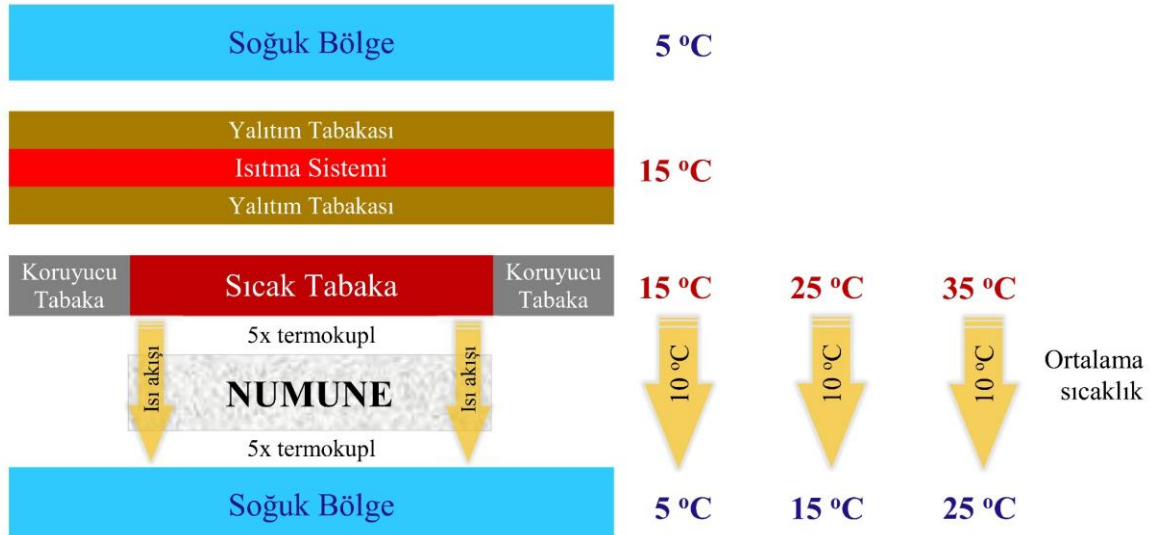
Şekil 14. Isıl iletkenlik ölçümleri için kullanılan TLP 300 cihazı.

Bu yöntem ve cihaz, TS EN 12664, TS EN 12667, TS EN 12939 standartları esas alınarak ölçüm yapmaktadır ve yalıtım kompozitlerinin ısı iletkenliğinin belirlenmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Cihazı ölçüm yapan içyapısı Şekil 15.'te gösterilmiştir.



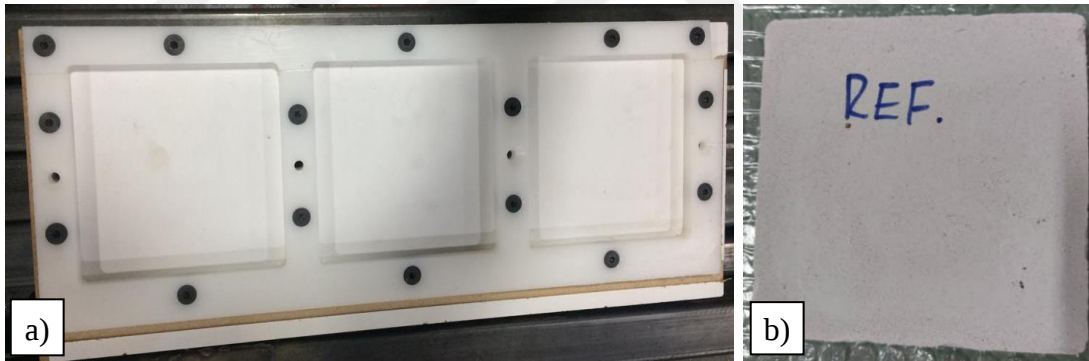
Şekil 15. Taurus TLP300 cihazının içyapısı.

Başlangıçta cihaz sistemi dengeye getirilmesi için ortalama sıcaklık değerleri olarak 10 °C, 20 °C ve 30 °C girilerek çalıştırılmıştır. Cihazın çalışma şekli Şekil 16.'da gösterildiği gibi, üst ve alt kısımlara sıcak ve soğuk yüzeylere termokupl ile değerler ölçülür. Bu ölçülen değerler ile ortalama sıcaklık değerleri sırasıyla 15/5/10 °C, 25/15/10 °C, 35/25/10 °C olacak şekilde, üst kısımdan numuneye elektrik ile ısı vererek alt kısımdaki soğuk yüzeye ısı geçişini sağlar ve numunenin ısı dengelenmesi beklenir. Isıl geçişin dengelenmesi sırasında üst üste alınan en az 3 benzer λ (lambda) değeri sonrasında deney bitirilip diğer sıcaklıktaki deneye başlanır. Cihaz 3 farklı sıcaklık deneyi döngüsü sonucunda çıkan λ (lambda) değerleri ve sıcaklık arasında bir bağlantı kurarak numuneye ait λ (lambda) değerini tespit etmektedir.



Şekil 16. Taurus TLP300 çalışma şeması.

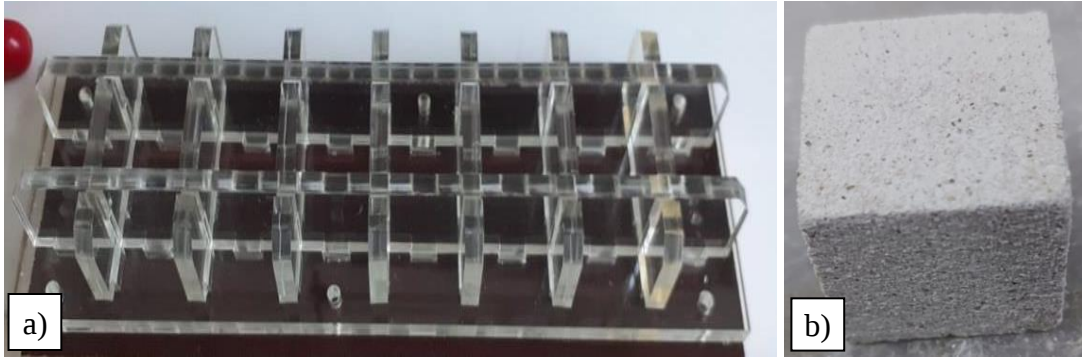
Isı iletim katsayısı tespiti için, cihazın alt kısmında bulunan soğuk tarafta bulunan termokupl'un üzerine Şekil 17-b'de üretilen numuneler yerleştirilmiştir. Daha sonra üzerine sıcak taraftaki termokupl yerleştirildikten sonra numune, termokupl'lar arasına 200N'luk bir kuvvetle sıkıştırılır. Cihaz çalıştırılarak numunenin kalınlığına ve ısı geçirgenliğine bağlı olarak yaklaşık 20-25 saat sonra numunenin ısı iletim katsayısı tespit edilir.



Şekil 17. a) Isıl iletkenlik testi numune üretmek için kullanılan kalıp, b) kalıptan çıkan numune.

Basınç dayanımı.

Basınç dayanımı deneyi Bayburt Üniversitesi İnşaat Mühendisliği bölümü Yapı malzemesi laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Basınç dayanımı deneyi ASTM C109 / C109M-16a'ya göre yapılmıştır. Bu standarda göre, çimento esaslı harçların Basınç dayanımının belirlenmesinde 50x50x50 mm boyutlarında küp numuneler kullanılmaktadır. Ancak üretilen Aerojel miktarının kısıtlı olması nedeniyle, 25x25x25 mm (Şekil 18) boyutlarında küp numuneler kullanılmıştır.



Şekil 18. a) Basınç dayanımı numunelerinin üretiminde kullanılan kalıp, b) kalıptan çıkarılan numune.

Literatürde de Aerojel katkılı çalışmalarda bu boyutlarda numuneler kullanıldığı görülmektedir (Abbas vd. 2019). Bu çalışmada, basınç dayanımı hesaplamak için denklem 9’da verilen formülü kullanılmıştır. Basınç dayanımı deneyi için 20 KN kapasiteli hidrolik pres kullanılmıştır (Şekil 19).

$$f_c = \frac{P}{A} \quad (9)$$

f_c hesaplanan basınç dayanımı, P yük ve A numunenin yüzey alanı



Şekil 19. Basınç dayanımı testi için kullanılan hidrolik pres.

DÖRDÜNCÜ BÖLÜM

Bulgular ve Tartışma

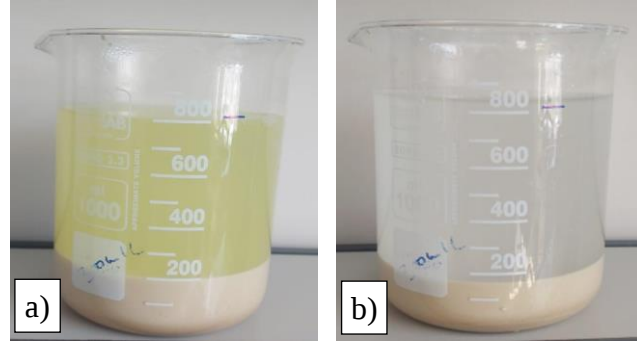
Bu çalışma, iki aşamalı olarak planlanmıştır. Birinci aşamada, bayburt taşının toz atıkları kullanılarak Silika esaslı Aerojel malzemenin üretimi ve karakterizasyonu yapılmıştır. İkinci aşamada ise sentezlenen Aerojel malzeme %25, %50 ve %75 oranlarda alçı sıvaya eklenerek yalıtım özellikli kompozit yapı malzemesi olarak kullanılabilirliği araştırılmıştır. Çalışmanın ilk bölümünde sentezlenen partiküllerin yapısal ve morfolojik özellikleri, X-ışını kırınım tekniği (XRD) yardımı ile karakterize edilmiştir.

Aerojel Üretimi ve Karakterizasyon Çalışmaları

Sol-gel metoduyla Aerojel üretimi.

Bayburt yöresine özgü volkanik tüf atıkları, yaklaşık %70 oranında silisyum içermektedir. Geri kalan kısım, bazı killer ve diğer safsızlıklardan ibarettir. Buna göre, ilk olarak Bayburt taşının içerdiği silisyum dışındaki kil ve benzeri kısımlar, hidroklorik asit yardımı ile uzaklaştırılmıştır. Safsızlıkları gidermek için başlangıç malzemeleri kullanılarak ön işlem uygulanır. Bazı çalışmalarda, verimini arttırmak için yüksek sıcaklıklarda (600°C <) ve uzun işlem süreleri ile ısıtım işlemi uygulanmıştır (Abbas vd., 2019; Shi, Liu, Song, & Wang, 2010b; Shi vd., 2006). Fakat bu durum, işlem basamağı sayısının, işgücü gereksiniminin ve enerji tüketiminin artmasına ve dolayısıyla da üretilen Aerojelin birim maliyetlerinin artmasına neden olmaktadır. Dolayısıyla bu çalışmada bu işlem adımının uygulanması tercih edilmemiştir.

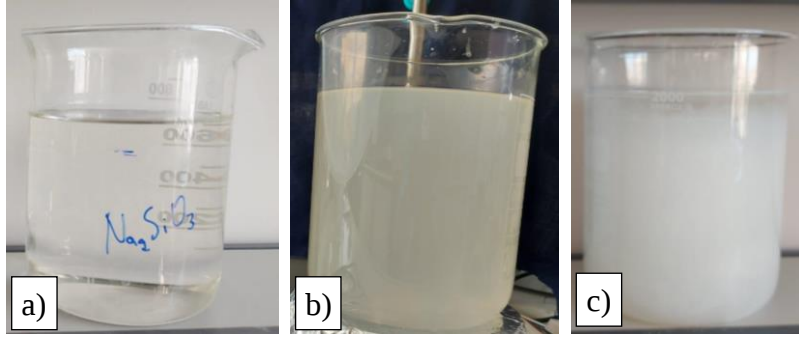
Bu çalışmada, 60 gr Volkanik Tüf Atık Tozu 600 ml saf suyla karıştırıldı. Ardından üzerine çözeltinin pH değeri 1 oluncaya kadar hidroklorik asit çözeltisi (HCl , %37 w/w) eklendi ve bir ısıtmalı manyetik karıştırıcı üzerinde yaklaşık 90°C derecede 2 saat kadar süre ile karıştırıldı. Çözündürme işleminin sonunda sıcak karışım bir buhner hunisi ve vakum filtrasyon sistemiyle filtrelendi. İşlem sonunda büyük oranda silisyum dioksitten oluşan bir katı madde elde edilmiştir. Elde edilen katı madde asit ve çözelti kalıntılarının tamamen uzaklaştırılması için birkaç kez saf su ile yıkanmıştır. Yıkama işlemine, asit kalıntısının tamamen uzaklaştırıldığı bir göstergesi olarak değerlendirilen, çözelti renginin sarıdan şeffaf hale geldiği gözlemlenene kadar devam edilmiştir. Çözeltinin başlangıç ve son durumunda renk farklılıklarını gösteren bir resim Şekil 20’de sunulmuştur.



Şekil 20. HCl'nin yıkanarak uzaklaştırılması, a) yıkamadan önce b) yıkamadan sonra.

Yıkama işlemi sonunda elde edilen katı madde, filtrelendi ve etüvde 60°C'de 24 saat kurutuldu. Ön işleminden geçirilmiş volkanik tüf atık tozu daha sonra sodyum Silikat üretiminde kullanılmak üzere kapalı kaplarda muhafaza edilmiştir. Sodyum Silikat üretimi için formül $\text{Na}_2\text{O} \cdot n\text{SiO}_2$ 'dir. Bu formülde n , SiO_2 'in Na_2O 'e molar oranıdır. Bu formülden, NaOH çözeltisinin molaritesinin değiştirilmesiyle farklı molariteye sahip sodyum Silikat bileşiklerinin üretilebileceği anlaşılmaktadır. SAT sentezinde kullanılmak üzere, sodyum Silikat (Na_2SiO_3) üretmek için, ön işlemlerden geçirilmiş volkanik tüf atık tozundan 60 gram tartılır ve üzerine 1M konsantrasyonuna sahip NaOH çözeltisi eklenerek karıştırılmıştır. Elde edilen karışım 4 saat boyunca 150°C'de ısıtılma işlemine tabi tutulmuştur. Sıcaklık ve ısıtma süresi, sodyum Silikat elde etmek için oldukça belirleyici parametrelerdir (Shi vd., 2010b). Bu çalışmada optimum sıcaklık ve ısıtma süresi, yapılan ön denemeler ile belirlenmiştir.

Elde edilen sodyum Silikat çözeltisi behere alınır ve Silika sol elde etmek amacıyla bir manyetik karıştırıcı üzerinde çok düşük hızlarla karıştırılırken üzerine çözeltinin pH değeri 1 oluncaya kadar yaklaşık 1,5 mL/dak akış hızı ile HCl çözeltisi eklenir. HCl, sodyum Silikat sulu çözeltisine damlatılırken, Şekil 21'de gösterildiği gibi çözelti içerisinde jellerin oluşmaya başladığı ve çözelti renginin beyazdan açık mavi renge doğru dönüşmeye başladığı gözlemlenmiştir. Daha fazla HCl ilavesi ile jelleşmenin arttığı ve bunun sonucu olarak da çözelti renginin saydamlığını kaybederek gibi opak beyaza dönüştüğü gözlemlenmiştir. Jel oluşumu sırasında çözeltinin renginde meydana gelen bu renk değişimleri, literatürde sol jel yöntemi ile Aerojel üretimi üzerine yapılan başka çalışmalarda da gözlemlenmiştir (De Pooter, Latré, Desplentere, & Seveno, 2018).



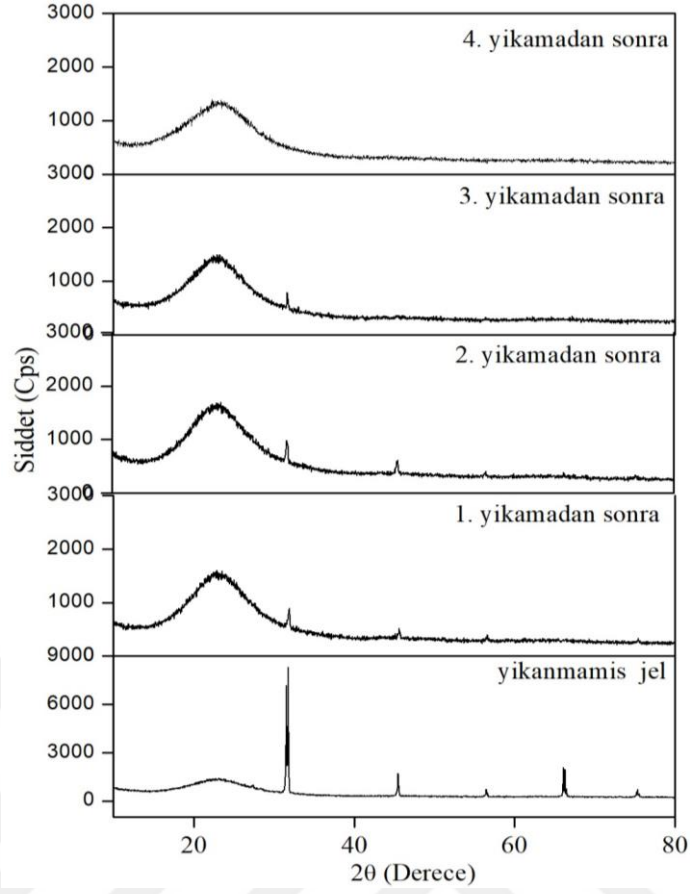
Şekil 21. Sodyum Silikat: a) jelleşmeden önce; b) jelleşme sırasında jeller oluşmaya başladığında; c) jelleşmeden sonra.

Jelleşme sürecine etki eden parametreleri belirlemek ve optimize etmek amacıyla yapılan ön denemelerde, bu işlemde karıştırma hızının oldukça yavaş olmasının, jel oluşumu üzerinde son derece önemli bir parametre olduğu gözlemlenmiştir. Yaklaşık 500 rpm ve üzerindeki karıştırma hızlarında, hemen hemen hiç jel oluşumu gözlemlenmemiştir.

Jelleşme sürecinde, jel oluşumu üzerinde oldukça etkili olan bir diğer parametre ise, HCl'nin çözeltiye eklenme hızıdır. Yüksek akış hızları ile HCl eklendiğinde jelleşme olmadan direkt katı bir faz oluşumu ile sonuçlandığı gözlemlenmiştir. Ayrıca, daha önce yapılan bazı çalışmalarda, üretilen Aerojelin yalıtım performansı üzerinde oldukça etkili bir özelliği olan yüksek gözeneklilik için, düşük HCl ekleme hızının yüksek HCl ekleme hızına göre çok daha uygun olduğu bildirilmiştir.

Jel oluşumu tamamlandıktan sonra, oluşan hidrojel oda sıcaklığında 24 saat boyunca yaşlandırıldı. Yaşlanma aşaması, matrisin yoğunlaşmasını ve güçlenmesini destekler, bu nedenle daha güçlü bir matriste jeller oluşmaktadır (Abbas vd, 2016).

Su ile yapılan yıkama işlemi, sentezlenen hidrojel formundaki örneğin gözeneklerini dolduran sodyum klorürü tamamen uzaklaştırılması amacıyla uygulanmaktadır. Ardışık yapılan yıkama işlemlerinde her aşama sonunda üretilen örneklerde yapılan XRD analizi, 3 kez yapılan yıkamadan sonra dahi hala tuz kalabildiği fakat 4 kez yapılan yıkamadan sonra tuz içeriğinin tamamen giderilebildiği görülmektedir. Buna göre, elde edilen XRD verileri birlikte değerlendirildiğinde, saf bir ürün edebilmek için yıkama işleminin en az 4 kez tekrarlanması gerektiği açık bir şekilde görülmektedir. Bu aşamada elde edilen jelin kurutulması ile elde edilen toz örnekte, XRD analizi yapılmıştır. Elde edilen X ışını difraktogramı şekil 22'de sunulmuştur.



Şekil 22. Ardışık yapılan yıkama işlemlerinden sonra elde edilen örneklerin X ışını difraktogramları.

4 kez tekrarlanan yıkamadan sonra elde edilen örneğin X ışını difraktogramında, literatürde amorf yapılı silica aerogel fazına ait olduğu ifade edilen nispeten düşük bir pik şiddetine sahip ve geniş bir tabana sahip bir pik gözlemlenmiştir. Dolayısıyla bu sonuca göre, elde edilen bu fazın aerogel olduğu değerlendirilmektedir.

Bu çalışmada yürütülen deneysel çalışmalar, jellerin iyice yıkanmasının, sentezlenen Silika Aerojellerin gözenekliliği üzerinde de büyük bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir. XRD sonuçları, yapıda bulunan sodyum klorür içeriğinin yıkama ile tamamen giderilebileceği ve amorf yapıya sahip nispeten saf olarak nitelenebilecek Aerojel üretilebileceğini göstermektedir. Amorf bir yapıya sahip malzemelerin, kristalleşme açısından zengin olanlara göre yalıtım olarak daha iyi performans gösterdiği bilinmektedir. Bu çalışmada sentezlenen Silika Aerojelin bu şekilde amorf yapıya sahip olması, yalıtım malzemeleri olarak daha iyi performans göstermesi açısından istenen bir özellik olarak değerlendirilebilir.

Çalışmanın bir sonraki aşaması üretilen Aerojellerin hidrofobizasyonunu içermektedir. Literatürde çözücü değişimi ve hidrofobizasyon işlemleri için uygulanmakta olan birçok farklı yöntemler bulunmaktadır. Örneğin Abbas ve ark. hidrofobizasyon ve çözücü değişimini iki ayrı fazda gerçekleştirmiştir (Abbas vd, 2016). Pooter vd. (2018) ise hidrofobizasyon ve çözücü

değişim aşamalarının eş zamanlı olarak gerçekleştirilebilmesine imkân veren bir yöntem önermektedirler (De Pooter vd., 2018). Bu çalışmada, Silika Aerojel üretiminde çözücü değişimi ve hidrofobizasyonu süreci için yenilikçi bir yaklaşım uygulanmıştır. Bu amaçla, Pooter ve arkadaşları tarafından önerilen yöntem modifiye edilerek kullanılmıştır. Bu yöntem, esas olarak yüksek verimli olması ve zaman açısından daha kısa sürelerde yapılabilmesi gibi üstünlerinden dolayı tercih edilmiştir. Bu şekilde prosesin endüstriyel olarak uygulanabilirliği için ekonomik açıdan daha cazip hale getirilmesi amaçlanmaktadır.

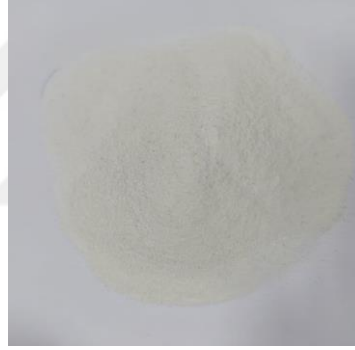
Pooter vd. (2018) çözücü değişimi, hidrofobizasyon ve yıkama işlemlerini eş zamanlı olarak gerçekleştirmiştir. Fakat çözücü değişimi için kullanılan kimyasal madde olarak TMCS kullanıldığında, sentezlenen ürün Silika Aerojelin X ışını difraktogramında bazı sodyum klorür pikleri gözlemlendiğini bildirmektedir. (De Pooter vd., 2018). Sodyum klorür piklerinin, silicate dönüşümü için kullanılan sodyum hidroksitten ve/veya jellerin gözeneklerinde kalan ve yeterince yıkanmadığından dolayı burada kalmış olabilecek safsızlıklardan kaynaklanıyor olabileceğini ifade etmektedirler (Abbas vd., 2019; De Pooter vd., 2018).

Yukarıda yıkama bölümünde açıklandığı üzere, jelleri birkaç kez saf suyla yıkayarak bu safsızlıklar giderilebilir ve böylece oldukça gözenekli ve ultra hafif jeller elde edilebilecektir. Çalışmada kullanılan çözücü değişim maddesinin, TMCS olduğu gerçeği göz önüne alındığında, jeller, çözücü değişimi ve hidrofobizasyon aşamalarına geçilmeden önce saf su kullanarak dikkatli bir şekilde yıkanmıştır. TMCS, Etanol ve n-Heptan'ın belli oranlarda karıştırılması ile elde edilen karışıma sililasyon çözeltisi denir. Sentezlenen, yaşlandırılan ve 4 defa saf su ile yıkanan jel hidrofobizasyon için hazırlanan sililasyon çözeltisi ile muamele edilmiştir. Şekil 23'te sililasyon çözeltisi içerisinde bekletilen jellerin pozisyonu gösterilmektedir. Jellerin su ve etanol çözeltisine batırılırken, çözelti içine aktarıldıktan yaklaşık 6 saat sonra sililasyon çözeltisinin yüzeyinde toplandığı gözlemlenmiştir. Sililasyon çözeltisinin üst kısmında, yüzer halde bulunan jeller, su kullanılarak gerçekleştirilen jelleşme ve yıkama adımlarının bir sonucu olarak, başlangıçta su ve kalıntı HCI ile dolu olan gözeneklerin temizlendiğini ve suyun tamamen uzaklaştırıldığını göstermektedir. Dahası, jelin TMCS ile reaksiyona girdiğinin ve çözücünün n-heptan ile değiştirildiğinin de bir gösytergesi olarak değerlendirilebilir. Üretilen jelin gözeneklerindeki su ve asit kalıntılarının başarılı ve kapsamlı bir şekilde değişimi, ürün aerogelin çeşitli katrakteristikleri üzerinde oldukça etkili olabileceğinden, bu işlem son derece önemlidir ve nihai ürün Aerojelin hafifliği ve gözenekliliği için hayati bir rol oynar.



Şekil 23. Sililasyon çözeltisinde jel konumu.

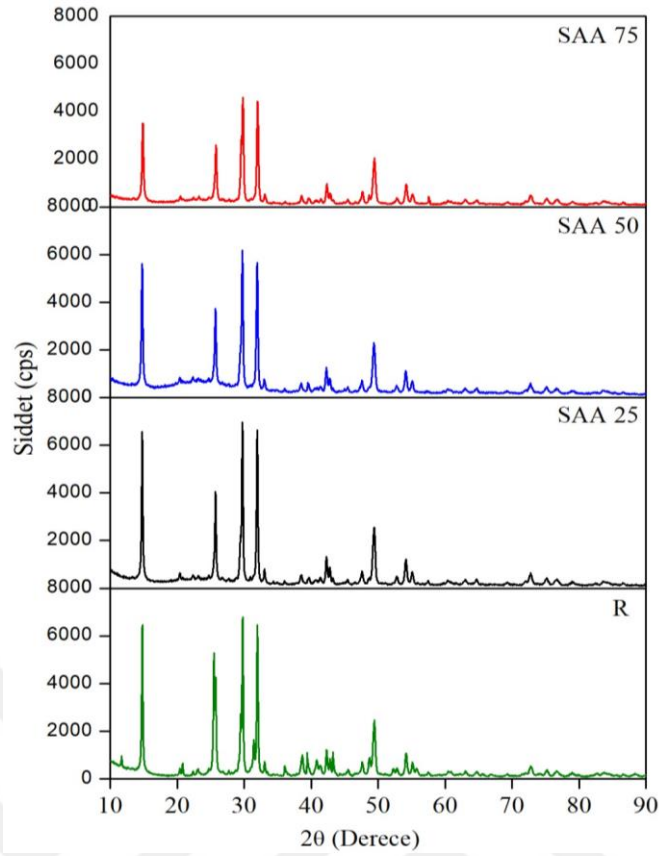
Bu gözlemler literatürde daha önce bildirilen sonuçlarla uyumludur. Örneğin Pooter ve diğerleri. sililasyon çözeltisinin üzerinde yüzen jelleri rapor etmiştir. (De Pooter vd., 2018). Çözücü değişimi ve hidrofobikleştirme sürecinin sonunda elde edilen hidrofobik Silika Aerojel, ortam sıcaklığında 24 saat kurutuldu, ardından fırında 140°C'de 3 saat bekletildi. Fırından alınan katı madde toz haldeki Silika Aerojeldir. Elde edilen nihai Aerojel tozu Şekil 24'de görülmektedir.



Şekil 24. Üretilen Silika Aerojel tozu.

XRD analizi.

SAA Kompozitlerin yapısal karakterizasyonu için çeşitli oranlarda, Aerojel katılarak üretilen kompozitlerde XRD analizi yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar, Şekil 25'te verilmiştir.



Şekil 25. Çeşitli oranlarda aerogel ile katkılanarak üretilen alçı kompozitlerin X- ışını difraktogramları.

Şekilde verilen farklı miktarlarda Aerojel içeren tüm örnekler için X ışını difraktogramlarında, sadece kristal yapıya sahip bir yapı görülmektedir. Bu difraktogramların standart veri tabanlarında yapılan karşılaştırmalarında bu fazın $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ile tam uyumlu olduğu belirlenmiştir. Bu durum beklenen bir sonuç olup, üretilen Aerojelin amorf yapıda olmasından dolayı difraktogramlarda görülmemesinden kaynaklanmaktadır. X ışını difraktogramlarında pik şiddeti (Intensity) değeri kristalleşme oranının bir ölçüsü olarak değerlendirilebilir. Bu durumda, karışımdaki Aerojel oranı arttıkça, pik şiddetinde gözlemlenen azalma, eklenen Aerojelin amorf yapıya sahip olmasından dolayı karışımdaki toplam kristal haldeki madde miktarının azalması ile açıklanabilir. Tüm bu sonuçlar, karışımı oluşturan Aerojel ve alçı arasında hiçbir kimyasal etkileşim olmadığını da açık bir şekilde göstermektedir. Bu durum, bu çalışma için beklenen bir sonuçtur.

Mevcut sonuçlara uygun olarak, literatürdeki önceki çalışmalar, Silika Aerojel tozunun çimentolu kompozitlere dâhil edilmesinin, Silika Aerojel miktarına bağlı olarak XRD piklerinin şiddeti (Intensity) bir azalmaya yol açtığını göstermiştir (Abbas vd., 2016). XRD piklerinin şiddeti (Intensity) azalma, SAA Kompozitlerinin amorf yapısında bir artışı gösterir, bu da mevcut çalışmanın SAA kompozitlerinin kristallik yapısında bir azalma anlamına gelir. Bu

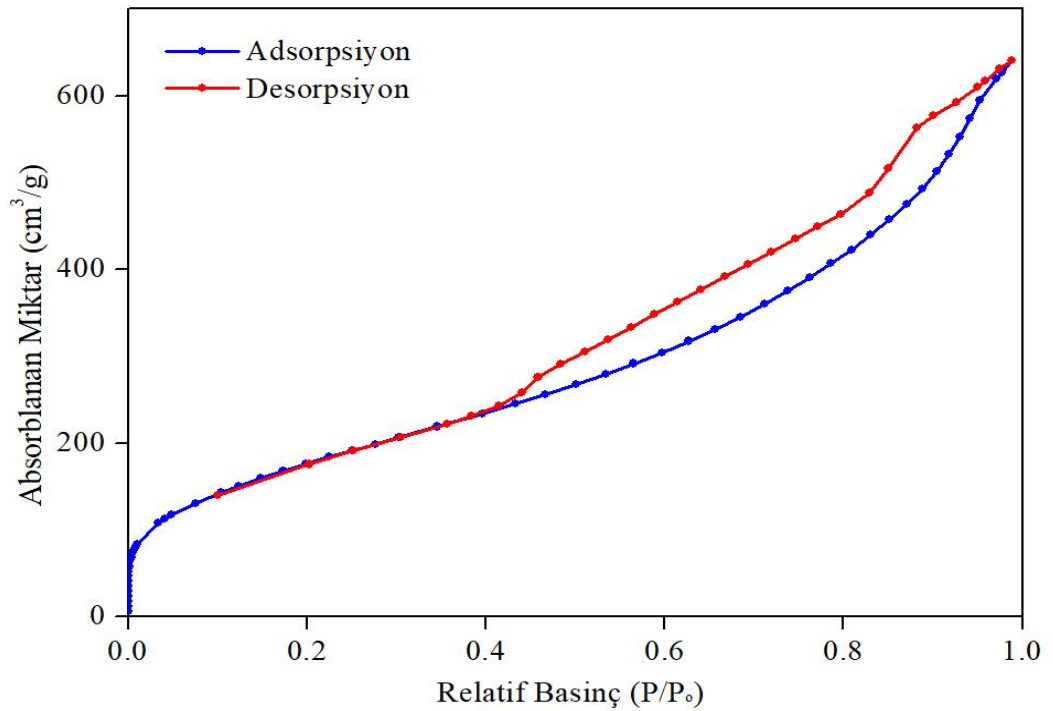
çalışmanın alçı kompozitlerinin XRD piklerinin şiddeti (Intensity) azalma, SAT'ın amorf yapısına bağlanabilir.

Bu çalışmada SAA kompozitlerinin XRD piklerinin şiddeti (Intensity) azalması ile SAA kompozitlerinin ısı iletkenliğinin, azalan XRD piklerinin şiddeti (Intensity) paralel olarak azalması beklenmektedir. Bunun nedeni, önceki çalışmaların, bağlayıcı malzemelerin XRD piklerinin şiddeti (Intensity) azalması her zaman termal iletkenlikte bir azalmaya yol açtığını göstermiş olmasıdır (Wu, Wang, Monteiro, & Zhang, 2015).

Yüzey alanı ölçümleri.

SAT yüzey alanı ölçümleri.

Aerojellerin mümkün olduğunca yüksek bir poroziteye ve yüzey alanına sahip olmaları beklenmektedir. Dolayısıyla, spesifik yüzey alanı ve porozite özellikleri Aerojel malzemeler için oldukça önemli karakteristiklerdir. Bu çalışmada, sentezlenen ürün Aerojelin spesifik yüzey alanını belirleyebilmek için, metod olarak 77 K sıcaklıkta bir gazın bir katı madde madde yüzeyinde absorblanmasını temel alan, gaz sorpsiyon tekniği uygulanmıştır (Brunauer vd, 1938). Bu analiz sonucunda elde edilen adsorpsiyon-desorpsiyon izotermi Şekil 26' da sunulmuştur.



Şekil 26. Üretilen aerogel örneğinin Adsorpsiyon-Desorpsiyon izotermi.

Şekil 26'da verilen adsorbsiyon desorpsiyon izotermi IUPAC tarafından yapılan sınıflandırmaya göre, mezoporoz yapı 1 malzemeleri niteleyen tip 4 izotermi ile büyük benzerlik göstermektedir. Mezoporoz bir malzeme, IUPAC sınıflandırmasına göre, gözenek

Çapları 2 ila 50 nm arasında olan malzemeleri tanımlamak için kullanılmaktadır. Üretilen Aerojel örneğinin yüzey alanının belirlenebilmesi için, numune yüzeyindeki kirlilikler ve su kalıntıları ya da diğerkimyasal madde kalıntılarını temizlemek için analizden önce 1 saat 110°C de ve vakum altında degaz işleminuygulanmıştır. Analiz verileri kullanılarak çeşitli teorilerle hesaplanan yüzey alanları ve toplam por hacmi verileri Tablo 6’da sunulmuştur.

Tablo 6. Üretilen Silika Aerojelin Çeşitli Yüzey Özellikleri.

BET yüzey alanı (m ² /g)	Langmuir (m ² /g)	T-Plot (m ² /g)	Single Point (m ² /g)	Toplam Por Hacmi (cm ³ /g)
662,9876	2340,5341	747,1208	590,6506	0,9096

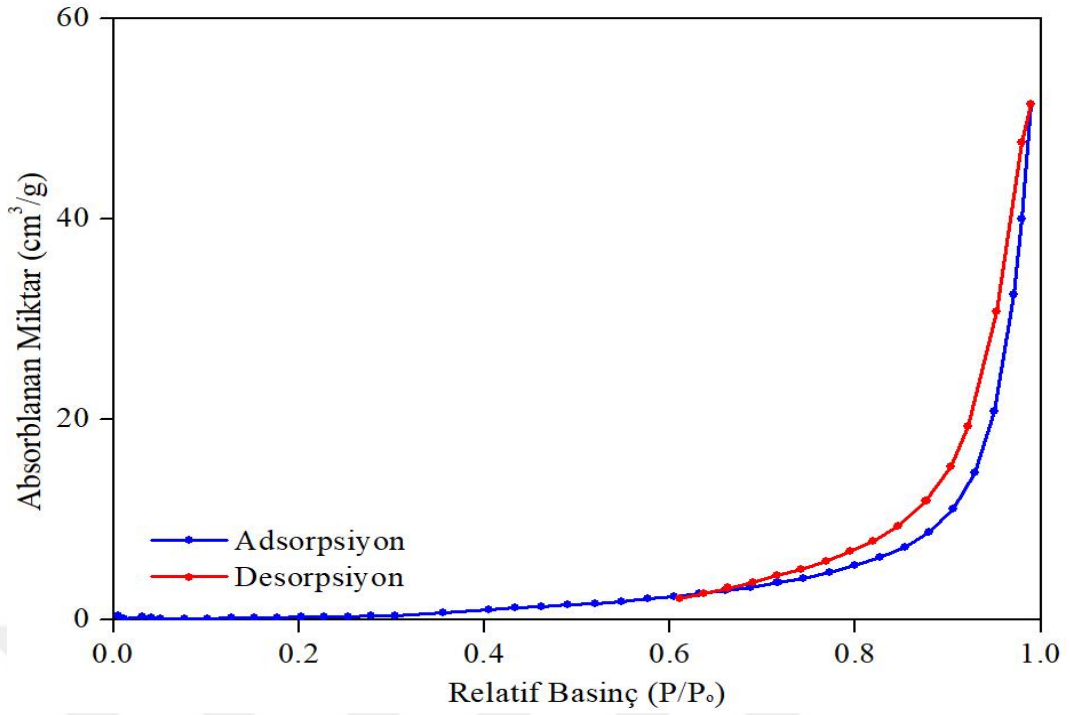
Tablo 6’da sunulan yüzey alanları incelendiğinde sentezlenen Silika örneğinin oldukça yüksek olarak değerdendirilebilecek bir yüzey alanına sahip olduğu görölmektedir. Bu sonuç, üretilen Aerojelin porozitesinin de yüksek olduğunu göstermektedir. Elde edilen sonuçlar literatürde daha önce yapılmış birçok çalışma ile uyum halindedir. Bu çalışmada sentezlenen SAT tozunun literatürdeki önceki çalışmalarda sentezlenen endüstriyel Aerojel Aerojellerle kısa bir karşılaştırması tablo 7’ da verilmiştir. Tablo 7’ dan görölebileceği gibi, volkanik tuf atıklarından sentezlenen SAT, hâlihazırda sanayileşmiş Aerojellere benzer özelliklere sahiptir.

Tablo 7. Farklı Silika Aerojellerin Özellikleri Karşılaştırması.

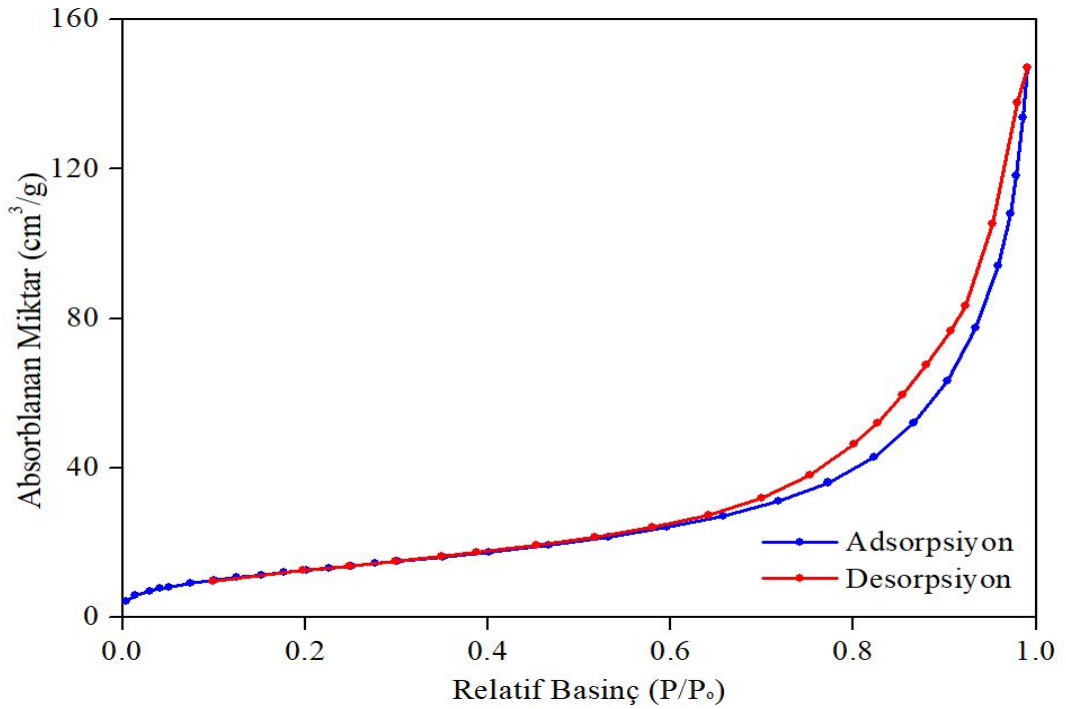
Aerojel tipi	BET yüzey alanı (m ² /g)	Por hacmi (cm ³ /g)	Referans
İnorganik	984	1,8	(de Fátima Júlio vd., 2016)
Ticari	706	3,4	
Hibrit	698	2,5	
Bildirilmemiş	366,54	-	(Hanif vd., 2016)
Pirinç kabuğundan sentezlenen	769	2,81	(Abbas vd., 2019)
Endüstriyel sodyum Silikattan	318	0,64	(De Pooter vd., 2018)
sentezlenmiştir	431	2,71	
	425	2,87	
Bildirilmemiş	600–800	-	(Ng vd., 2015)
Volkanik tuf atıklarından sentezlenen	629,876	0,9096	Bu çalışma

SAA kompozitlerin yüzey alanı ölçümleri.

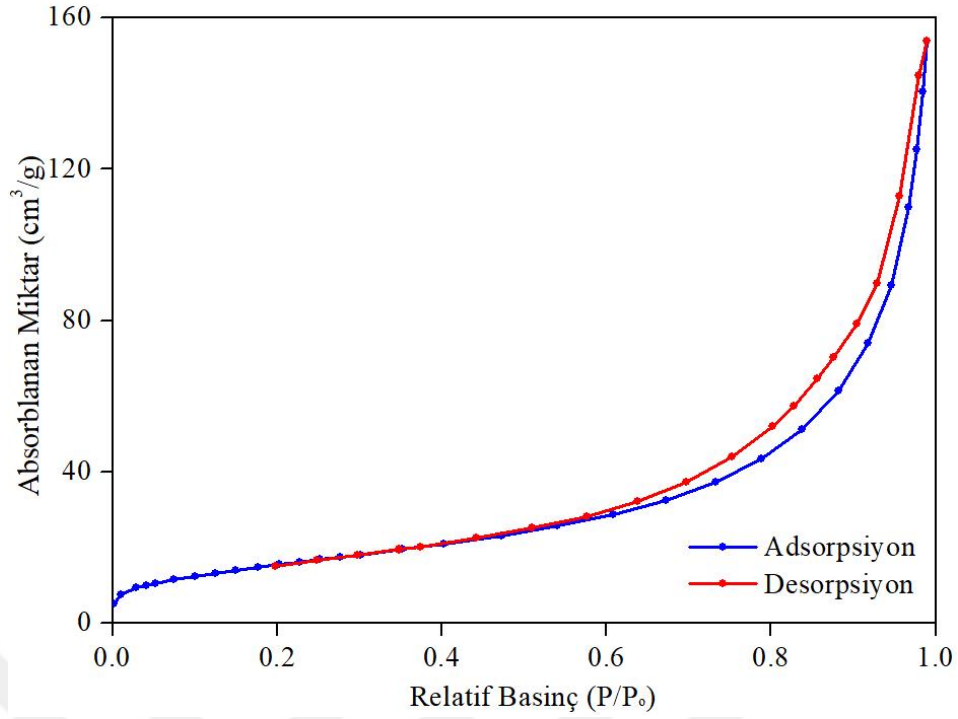
Belirli oranlarda Aerojel ile katkılanarak üretilen SAA kompozitlerin, yüzey özellikleri, gaz adsorbsiyonu tekniği ile yüzey analiz edilmiştir. Analizden önce örnekler, 110°C de vakum altında degasa tabi tutulmuştur. Bu analizler sonucunda elde edilen, adsorbsiyon desorpsiyon izotermeleri, Aerojel içermeyen referans numune için Şekil 27’de, SAA 25 numunesi için Şekil 28’ da, SAA 50 numunesi için Şekil 29’ de ve SAA 75 numunesi için Şekil 30’ de sunulmuştur.



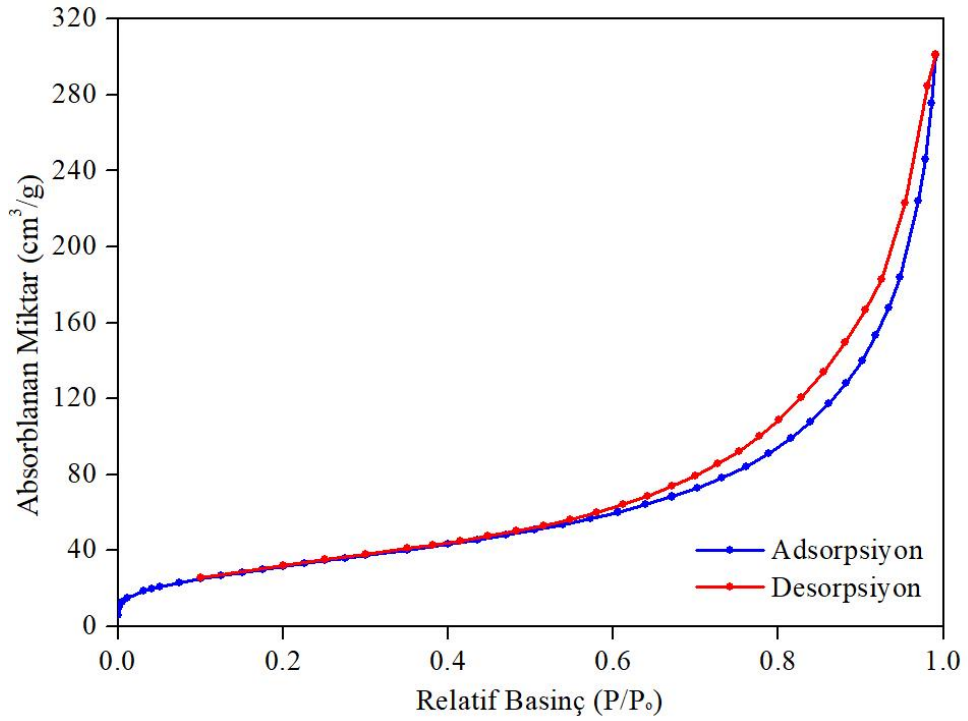
Şekil 27. Aerojel içermeyen referans numune için elde edilen adsorbsiyon desorpsiyon izotermeleri ve por boyut dağılımı grafiği.



Şekil 28. SAA 25 numunesi için elde edilen adsorbsiyon desorpsiyon izotermeleri ve por boyut dağılımı grafiği.



Şekil 29. SAA 50 numunesi için elde edilen adsorbsiyon desorpsiyon izotermi ve por boyut dağılımı grafiği.



Şekil 30. SAA 75 numunesi için elde edilen adsorbsiyon desorpsiyon izotermi ve por boyut dağılımı grafiği.

Yukarıda verilen adsorbsiyon desorpsiyon izotermelerinde, çeşitli oranlarda Aerojel ilavesi ile üretilen SAA örneklerine ait izotermelerin birbirlerine çok benzerken, Aerojel ilavesi olmadan üretilen örneğe ait izoterminden oldukça farklı bir yapıda oldukları görülmektedir. Ayrıca Aerojel katkılı örneklerin, artan Aerojel miktarı ile yüzey alanlarının arttığı ve ortalama por çapının azaldığı görülmektedir. Aerojel miktarı arttıkça, yapının saf Aerojelerle benzer yüzey

özellikleri sergilemesi beklenen bir sonuçtur. Bu analizlerden elde edilen veriler kullanılarak, BET, Langmuir, T-Plot ve Single Point gibi çeşitli teorilere göre hesaplanan yüzey alanları Tablo 8’de sunulmuştur.

Tablo 8. *Aerojel Alçı Kompozitlerinin Yüzey Özellikleri.*

Örnek	BET (m ² /g)	Langmuir (m ² /g)	T-Plot (m ² /g)	Single Point (m ² /g)	Toplam Por Hacmi (cm ³ /g)
R	0,9017	7,5785	2,8202	0,6721	0,032050
SAA 25	46,7737	1013,3114	58,7125	41,7313	0,134553
SAA 50	56,6893	1062,0299	65,3310	51,7694	0,141734
SAA 75	117,5601	1132,3359	142,9937	106,0118	0,287809

Tablo 8’de sunulan verilerde farklı teorilerle hesaplanan tüm yüzey alanlarında, artan Aerojel dozajı ile önemli bir artış görülmektedir. Bu durumun karışıma eklenen oldukça yüksek bir yüzey alanına sahip olan Aerojel katkısından kaynaklandığı açık bir şekilde görülmektedir. Referans numuneye kıyasla, SAA 25, SAA 50 ve SAA75 için sırasıyla %5087,28%; 6186,94 ve %12937,6 BET yüzey alanı ve %319,822; %342,228 ve %798 toplam por hacmi artışı gözlemlenmiştir. BET yüzey alanı ve toplam por hacmimdeki artışları eklenen SAT yüksek porozitesi ve geniş yüzey alanından kaynaklandığını inanılmaktadır. Bu durum malzemenin termal iletkenliğini önemli ölçüde azaltması ve dolayısıyla yalıtım özelliğini geliştirmesi beklenmektedir.

SAA kompozitlerine SAT ilavesinin etkisine ilişkin bu çalışmanın bulguları, literatürde bildirilen önceki çalışmalarla uyumludur. Abbas vd. (2019), pirinç kabuğundan sentezlenen Silika Aerojelin, çimento esaslı harçlara dahil edilmesinin, eklenen Silika Aerojel miktarına oranla daha geniş yüzey alanına ve gözenek hacmine sahip kompozitler ile sonuçlandığını bildirmiştir (Abbas vd., 2019).

Kompozitlerin Fiziksel Özellikleri

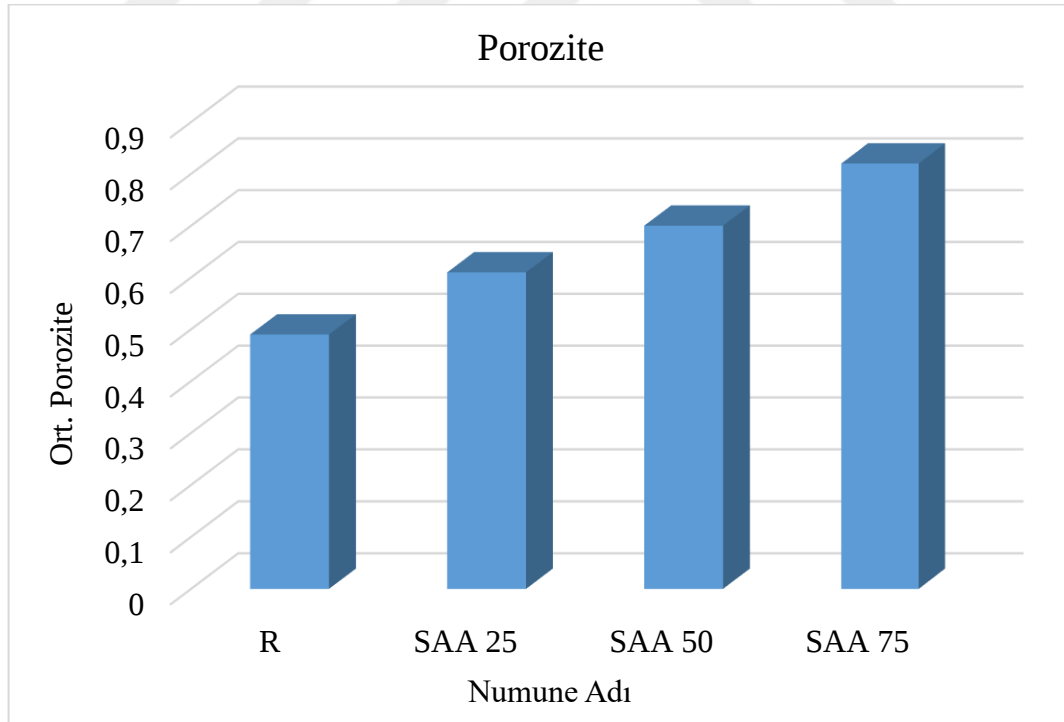
Bu çalışmada, deney aşamasında üretilen SAA kompozitlerinin fiziksel ve mekanik özelliklerinin belirlenmesi için, gözeneklilik, su emme, yoğunluğu basınç dayanımı ve termal iletkenlik deneyleri yapılmıştır. Bu deneyler için 25 × 25 × 25 mm boyutlarına her bir deney için üçer adet numune kullanılmıştır. SAA kompozitlerinden belirlenen tüm değerler Tablo 9’da verilmiştir.

Tablo 9. *Kompozitlerin Fiziksel Özellikleri.*

Numune Adı	Hacmi (cm ³)	Kuru ağırlığı (g)	Suya doygun ağırlığı (g)	Ağırlıkça su emme %	Yoğunluk (g/cm ³)	Porozite	Ort. Ağırlıkça Su Emme %	Ort. Yoğunluk (g/cm ³)	Ort. Porozite
R1	15,63	14,24	22,00	54,53	1,83	0,50			
R2	15,63	14,23	21,90	53,94	1,85	0,49	53,55	1,87	0,49
R3	15,63	14,46	22,00	52,18	1,92	0,48			
SAA 25-1	15,63	9,23	18,85	104,31	0,96	0,62			
SAA 25-2	15,63	9,39	18,80	100,28	1,00	0,60	103,02	0,97	0,61
SAA 25-3	15,63	9,19	18,80	104,48	0,96	0,61			
SAA 50-1	15,63	8,56	19,70	130,09	0,77	0,71			
SAA 50-2	15,63	8,35	19,25	130,43	0,77	0,70	130,81	0,76	0,70
SAA 50-3	15,63	8,24	19,10	131,91	0,76	0,70			
SAA 75-1	15,63	6,38	19,25	201,77	0,50	0,82			
SAA 75-2	15,63	6,46	19,50	202,04	0,49	0,83	202,54	0,49	0,82
SAA 75-3	15,63	6,25	19,00	203,81	0,49	0,82			

Porozite.

Bu çalışmadaki SAA kompozitler için porozite deneyinin sonuçları Şekil 31’de verilmiştir. Bağlayıcı kompozitler için porozite belirlenmesi hayati öneme sahiptir çünkü bu kompozitlerin mekanik mukavemet, dayanıklılık ve ısı iletkenlik gibi özellikler, yapılarında bulunan gözeneklerin boyutu, şekli, miktarı ve birbirine bağlanabilirliği ile doğrudan ilişkilidir (Hanif, Lu, & Li, 2017; Strzalkowski, & Garbalińska, 2016).



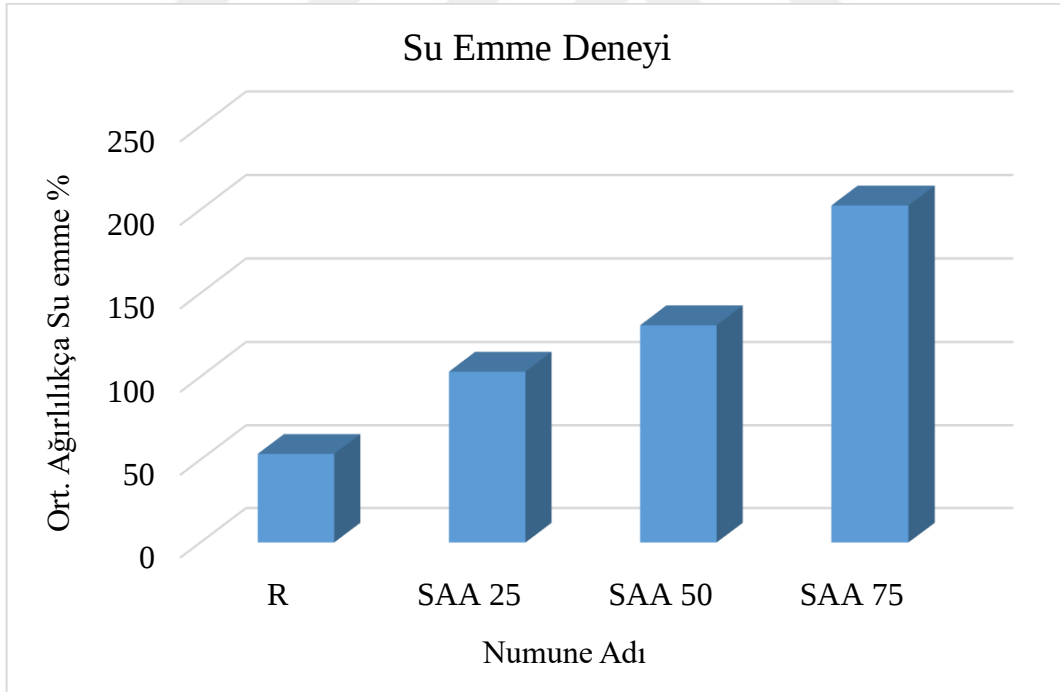
Şekil 31. Porozite deneyi verileri.

Şekil 31’deki grafik incelendiğinde, SAT’ın alçı bazlı kompozite dahil edilmesinin bileşiğin gözenekliliğini artırdığını göstermiştir. Referans numuneye kıyasla, SAA 25, SAA 50 ve SAA75 için sırasıyla %24,5 %;42,85 ve %67,35 porozite artışı gözlemlenmiştir. SAT

eklenmesiyle gözeneklilikteki bu artış, esas olarak Silika Aerojelin yüksek gözenekliliğine bağlanabilir (Abbas vd., 2019). Bu çalışmanın farklı bağlayıcı materyallere Silika Aerojel katılmasının etkisine ilişkin bulguları, literatürdeki diğer çalışmaların bulguları ile uyumludur. (Abbas vd. 2019), çimento esaslı harçların gözenekliliğinin, bileşimlerine eklenen Silika Aerojel miktarının artmasıyla arttığını bildirmiştir (Abbas vd., 2019). Volkanik tüf atıklarından sentezlenen SAT'ın alçı bazlı kompozitlere eklenmesinin gözenekliliği artırdığı deneysel olarak da gözlenmiştir.

Su emme.

SAA kompozitlerinin su emme oranı deneyi için 25x25x25 mm'lik numuneler kullanılarak belirlenmiştir. Tüm numuneler 0,001g hassasiyetli elektronik terazi ile tartıldı. Sonuçlar şekil 32'deki grafikte verilmiştir. Grafikte Silika Aerojel tozunun alçı bazlı kompozitlere katılmasının, su emme oranlarında önemli bir artışa neden olduğu görülmüştür. Referans numuneye kıyasla, SAA 25, SAA 50 ve SAA 75 numuneleri için sırasıyla yaklaşık %92,38, %144,27 ve %278,23 oranda su emme artışı gözlenmiştir. Ağırlıkça en fazla su emme oranı SAA 75 numunesinde gözlenirken, en az düşük SAA 25 numunesinde gözlenmiştir.

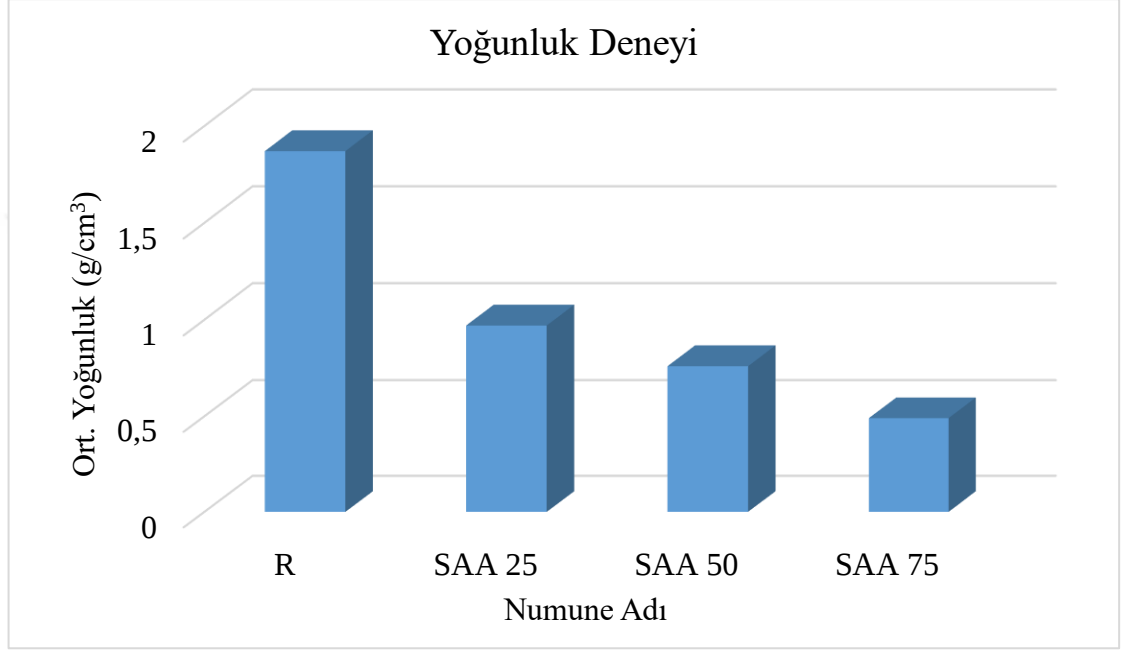


Şekil 32. Su emme deneyi sonuçları.

Ayrıca SAT su emme deney sonuçları, literatürdeki diğer çalışmalar ile uyumludur. Calisesi ve Berardi (2017) yaptıkları araştırmada, farklı sıva türlerine Silika Aerojel ilavesi üzerine yaptıkları çalışmada, hacimce %70 Silika Aerojel birleşiminde ağırlıkça %72 azalma olduğunu bildirmişlerdir (Calisesi, & Berardi, 2017).

Yoğunluk.

SAA kompozitin hesaplanan yoğunluk deneyi sonuçları Şekil 33'te verilmiştir. Alçı bazlı kompozitlere Silika Aerojel tozu katkı oranı arttıkça yoğunluğunda ters orantılı olarak azalmıştır. Referans numuneye kıyasla, SAA 25, SAA 50 ve SAA 75 için yoğunluğu sırasıyla %48,12, %59,36 ve %73,8'lik bir azalma gözlenmiştir. Ayrıca, en yüksek yoğunluğu referans numuneden belirlenirken, en düşük yoğunluğu, bileşiminde en yüksek oranda SAT içeren SAA 75'te görülmüştür.



Şekil 33. Yoğunluk deney sonuçları.

Bu sonuçlara dayanarak, yoğunluğun hacimsel Silika Aerojel tozu miktarıyla ters orantılı bir eğilim izlediği kesin olarak belirlenebilir. Eklenen SAT miktarına bağlı olarak yoğunluğun azalmasının, sentezlenmiş Silika Aerojelin daha düşük yoğunluğu ve yüksek boşluk alanı ile ilişkili olduğu görülmüştür.

Silika Aerojellerin temel özelliklerinden birinin ultra hafif olması ve geniş bir özgül yüzey alanına sahip olması gerçeği göz önüne alındığında, ilave edildikleri alçı kompozitlerinin yoğunluğundaki azalmayı açıklamaktadır. Bu durum ayrıca, mevcut çalışmada sentezlenmiş Silika Aerojelin ultra hafif, oldukça gözenekli ve büyük bir özgül yüzey alanına sahip olduğunu kanıtlamaktadır.

Bu sonuçlar literatürdeki önceki çalışmaların büyük bir kısmının bulgularını doğrulamaktadır (Gao vd., 2014; Hanif vd., 2016; Schnellenbach-Held, Welsch, Fickler, Milow, & Ratke, 2016).

Bu çalışmanın bulguları, Abbas'ın çimentolu kompozitlere Silika Aerojel ilavesinin etkisine ilişkin bildirdiği sonuçları geniş ölçüde desteklemektedir. Pirinç kabuğu külünden sentezlenen Silika Aerojel ile kumun kısmi ikamesi üzerine yaptıkları çalışmada, Silika Aerojelin, çimento esaslı harç kompozitlerinin yoğunluğunda büyük azalmaya neden olduğunu bildirmişlerdir(Abbas vd., 2019).

Çimentolu kompozitlere Silika Aerojel ilavesinin etkisini doğrulayan benzer sonuçlar (Wang vd. 2019) tarafından da bildirilmiştir. Silika Aerojelin betona katılması üzerine yaptıkları çalışmada, kuru ağırlık ve kuru kütle yoğunluğunun artan Silika Aerojel miktarı ile azaldığını bildirmişlerdir (Y. Wang vd., 2019).

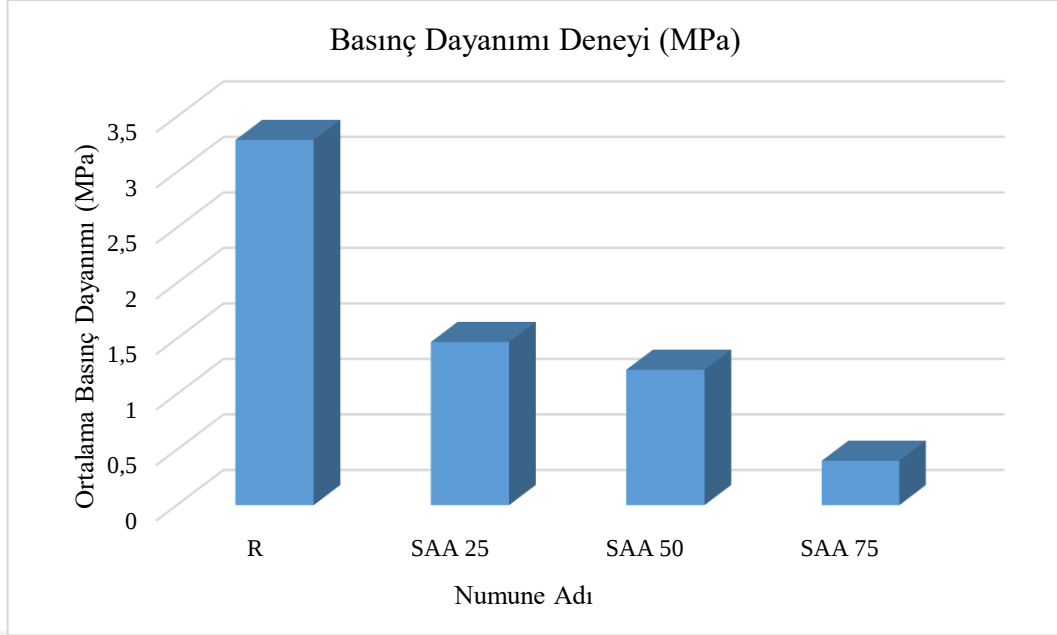
Basınç Dayanımı

Basınç dayanımı değerleri Tablo 10'da, SAT katkılı alçı bazlı kompozitlerin basınç dayanımına etkisini gösteren grafik Şekil 34'te verilmiştir.

Tablo 10. Basınç Dayanımı Deney Sonuçları

Numune Adı	Numune alanı (mm ²)	Kırılma yükü (N)	Basınç dayanımı (N/mm ²)	Ort. basınç dayanımı (MPa)	S. sapma
R1	625,00	2230,05	3,57		
R2	625,00	2056,34	3,29	3,29	0,276
R3	625,00	1884,98	3,02		
SAA 25-1	625,00	896,714	1,43		
SAA 25-2	625,00	941,315	1,51	1,47	0,036
SAA 25-3	625,00	920,188	1,47		
SAA 50-1	625,00	718,31	1,15		
SAA 50-2	625,00	800,469	1,28	1,22	0,066
SAA 50-3	625,00	760,563	1,22		
SAA 75-1	625,00	309,859	0,50		
SAA 75-2	625,00	187,793	0,30	0,40	0,098
SAA 75-3	625,00	248,826	0,40		

Alçı bazlı kompozitlerde; SAT hacimsel olarak arttıkça basınç dayanımı değerleri ters orantılı olarak düştüğü görülmüştür. SAT miktarındaki artış, basınç dayanımı değerlerinin düşmesine neden olmuştur.



Şekil 34. SAA kompozitlerinin basınç dayanımı değerleri.

Referans numuneye kıyasla, SAA 25, SAA 50 ve SAA 75 için sırasıyla %55,32, %63 ve %87,8'lik bir basınç mukavemetinde azalma olmuştur. Ayrıca, basınç dayanımında en yüksek değer referans numuneden kaydedilirken, en düşük değer, bileşiminde en yüksek miktarda SAT içeren SAA 75'te görülmüştür.

Şekil 34' e bakıldığında, en yüksek basınç dayanımı değeri 3,21 MPa karışımında Silika Aerojel bulunmayan referans numuneden kaydedilirken, en düşük basınç dayanımı değerinin hacimce %87,8 Silika Aerojel içeren numuneden 0,4 MPa kaydedilmiştir. Basınç dayanımı değerleri, Silika Aerojel içeriğindeki artışın basınç dayanımı değerlerinin azalmasına neden olmuştur.

Silika Aerojel ilavesinin alçı bazlı kompozitlerin basınç dayanımı üzerindeki etkisine ilişkin bulguları, diğer araştırmaların bulguları ile tutarlıdır (Abbas vd., 2019; Gao vd., 2014; Hanif vd., 2016; Ng vd., 2015). Abbas ve arkadaşları 2019 çalışmasında, Silika Aerojelin çimento esaslı harçlara dahil edilmesinin basınç dayanımında bir azalmaya neden olduğunu bildirdi. %100 Silika Aerojel içeriğindeki basınç dayanımı değerinin, Silika Aerojel ilavesi olmaksızın numuneden kaydedilen değerden %80 daha düşük olduğunu belirtmişlerdir (Abbas vd., 2019).

Benzer şekilde Gao vd., (2014) ve Ng vd., (2015), Silika Aerojelin ilavesi ile çimento esaslı kompozitlerin basınç dayanımı değerlerinde kayıplar bildirmişlerdir. Gao vd. (2014), Silika Aerojelin %60 hacimsel içeriğinde, hiç Silika Aerojel ilavesi bulunmayan kontrol numunesine kıyasla yaklaşık %92'lik bir azalma gözlemlendiğini bildirmiştir (T. Gao vd., 2014).

Basınç dayanımındaki bu kayıp, basınç dayanımı üzerinde zararlı etkiye sahip olduğu bilinen SAT yüksek gözenekliliğine bağlanabilir (Strzalkowski, & Garbalińska, 2016; Tsioulou, Ayegbusi, & Lampropoulos, 2018). Bu nedenle, mevcut çalışmanın basınç dayanımındaki dramatik kayıplar, alçıya yüksek gözenekli Silika Aerojel eklenmesinin neden olduğu gözeneklilikteki artışla açıklanabilir. Farklı bağlayıcı malzemelerin basınç dayanımlarının, yapısında bulunan gözeneklerin miktarı ve bağlayıcılığı ile ters orantılı olduğu bilinmektedir (Abbas vd., 2019). Dolayısıyla alçı malzemeye, oldukça gözenekli olan SAT eklenmesi, üretilen kompozit malzemenin daha gözenekli ve çok kırılğan davranış göstermesine sebep olmuştur.

Basınç dayanımındaki bu büyük düşüşü açıklayan diğer bir durum, bağlayıcı maddenin bağlayıcı olmayan hacimsel oranındaki azalmadır. Alçı içeriğindeki azalma ve Silika Aerojel içeriğindeki artış hacimsel olarak, karışımların bağlanma kabiliyetinde bir azalma meydana getirmiş ve bu da mukavemet kaybına yol açmıştır. Bu sonuç, (Abbas vd., 2019; Gao vd., 2014) tarafından yapılan önceki gözlemlerle uyumludur. Ayrıca, bu çalışmada %75 Silika Aerojel katkılı numuneler alçı içeriğinin az olmasından dolayı bazı numuneler kırılğan olduğundan ve kalıptan çıkarılırken dağılmasından dolayı test edilememiştir.

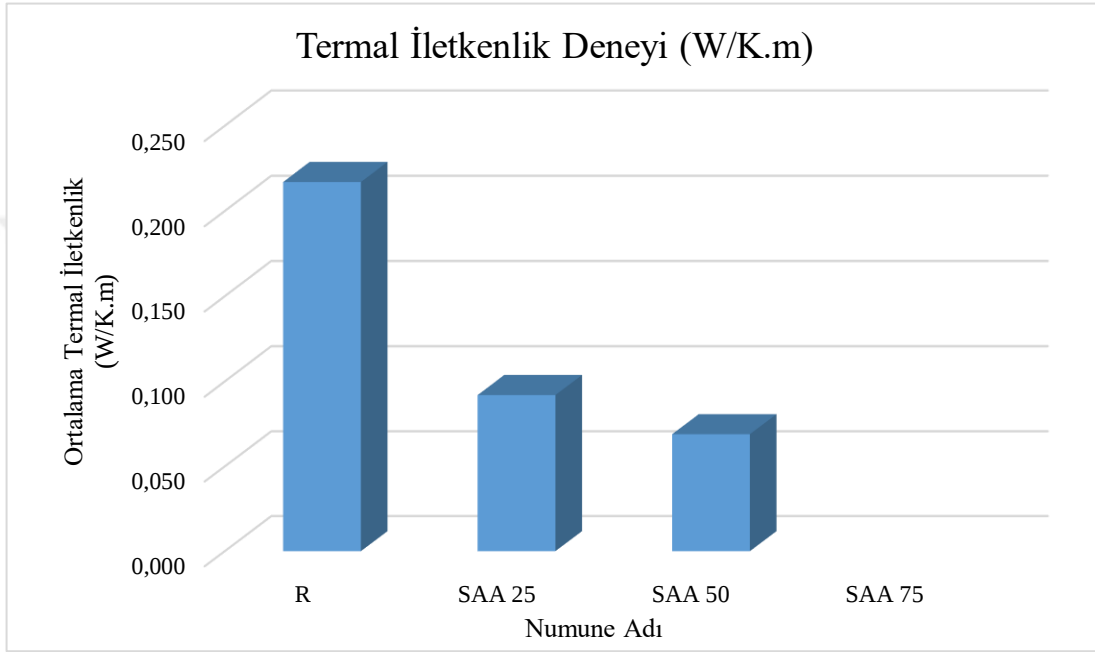
Termal iletkenlik

Ölçülen SAA kompozit numunelerinin termal iletkenlik değerleri Tablo 11'de verilmiştir. SAT'ın alçı bazlı alçı kompozitler için ölçülen değerlerin ortalaması Şekil 35'teki grafikte verilmiştir. Şekil 35'te SAT'ın hacimsel olarak katılmasıyla termal iletkenlik değerleri ile ters orantılı bir olduğu açıkça görülmüştür. SAT oranı arttıkça termal iletkenlik değeri düşmüş, bu durum kompozitleri daha iyi yalıtkan haline getirmiştir.

Tablo 11. *Termal İletkenlik Deney Sonuçları.*

Numune Adı	Numune Boyutları En (mm)	Numune Boyutları Boy (mm)	Numune Alanı (mm ²)	Termal İletkenlik (W/K.m)	Ortalama Termal İletkenlik (W/K.m)	S. Sapma
R1	120,00	10,00	1200,00	0,220	0,217	0,006
R2	120,00	10,00	1200,00	0,220		
R3	120,00	10,00	1200,00	0,210		
SAA 25-1	120,00	10,00	1200,00	0,093	0,092	0,001
SAA 25-2	120,00	10,00	1200,00	0,091		
SAA 25-3	120,00	10,00	1200,00	0,091		
SAA 50-1	120,00	10,00	1200,00	0,070	0,069	0,001
SAA 50-2	120,00	10,00	1200,00	0,069		
SAA 50-3	120,00	10,00	1200,00	0,069		
SAA 75-1	120,00	10,00	1200,00	-	-	-
SAA 75-2	120,00	10,00	1200,00	-		
SAA 75-3	120,00	10,00	1200,00	-		

Referans numuneye kıyasla, SAA 25 ve SAA 50 için termal iletkenlikte sırasıyla %57,6 ve %68,2'lik bir azalma olmuştur. Ayrıca, termal iletkenlikte en yüksek değer referans numuneden kaydedilirken, en düşük değer, bileşiminde hacimce %50 SAT içeren SAA 50'de kaydedilmiştir. Termal iletkenlik ölçümleri sırasında, bileşiminde en yüksek miktarda SAT içeren numunenin, çok fazla kırılğan olması nedeniyle ölçülememiştir. Bileşiminde yüksek miktarda Silika Aerojel içeren numunelerde aşırı kırılğanlık olması diğer çalışmalarda da rapor edilmiştir. (Ng vd., 2015).



Şekil 35. SAA kompozitlerinin ısı iletkenlik değerleri.

Termal iletkenliğin gözeneklerle doğru orantılı bir ilişkisi vardır. Bu, daha yüksek miktarda eşit dağılmış boşluklara sahip bir malzemenin daha iyi bir yalıtım malzemesi ile eşanlamlı olduğunu bilinmektedir. Boşluklar veya gözenekler, daha yüksek özgül yüzey alanı ve daha düşük yoğunluk ile doğrudan ilişkilidir. Aslında Aerojel süper yalıtım malzemeleri yapan bu özelliklerin birleşimidir.

Bu çalışmada termal iletkenliğin iyileştirilmesi, alçı bazlı kompozitlere eklenen SAT yüksek gözenekliliğine bağlanabilir (Strzalkowski, & Garbalińska, 2016; Tsioulou vd., 2018). Bu nedenle, bu çalışmada alçıya yüksek gözenekli Silis Aerojel ilavesi, gözeneklilikte bir artışa neden olmuş ve bu durum termal iletkenlik değerlerindeki düşüşü açıklamaktadır.

Alçı katkılı Aerojel kompozitlerin ısı iletkenliğinin daha düşük olmasına yol açan bir diğer durum, malzemelerin ısı iletkenliğinin yapılarıyla, zengin kristal yapıya sahip malzemelerin daha yüksek termal iletkenliğe sahip malzemelerle sonuçlanacak şekilde ilişkili

olmasıdır ve amorf bir yapı daha düşük termal iletkenlik değerlerine neden olmaktadır (Abbas vd., 2019; Harmathy Tz, 1970; Wu vd., 2015).

Bu çalışmada Şekil 25'teki XRD görüntülerinden de görülebileceği gibi, amorf silis Aerojelinin alçı içerisine eklenmesi, hacimsel Silika Aerojel ilavesi miktarına göre daha az kristal yapıya ve daha yüksek amorf yapıya sahip kompozitler ile sonuçlanmıştır.

Eklenen Aerojel miktarıyla orantılı olarak termal iletkenlikteki bu azalma, sentezlenmiş Silika Aerojelin oldukça gözenekli olduğunun ve daha yüksek bir özgül yüzey alanına sahip olduğunun, dolayısıyla alçı bazlı kompozitlerin termal iletkenliğini geliştirdiğinin bir göstergesidir.

SAT'ın birleştirilmesinin alçı bazlı kompozitlerin ısı özellikleri üzerindeki etkisine ilişkin bu çalışmanın bulguları, literatürdeki diğer çalışmalarla tutarlıdır. Abbas vd., (2019), kumun Silika Aerojel ile değiştirilmesiyle çimentolu harçların ısı iletkenliğinin önemli ölçüde azaldığını bildirdi. Kontrol numunesine kıyasla hacimce %62 Silika Aerojel içeren numuneden termal iletkenlikte %18,75 azalma kaydedildi (Abbas vd., 2019). Benzer şekilde Y. Wang vd., (2019), Silika Aerojelin betona dâhil edilmesinin daha düşük ısı iletkenlik değerlerine sahip betonla sonuçlandığını bildirmiştir. Betonun ısı iletkenliğinin, silis Aerojel miktarına bağlı olarak kuadrik bir fonksiyonun ardından düştüğünü belirttiler. Aynı şekilde Bostancı (2020), çimento esaslı hibrit harç üretiminde çimentolu katkı maddesi olarak Silika Aerojel kullanımı üzerine yaptığı çalışmada, Silika Aerojel içeriğinin ağırlıkça %0,35 oranında, harçların ısı iletkenliğinin kontrol numunesine kıyasla %21,83 oranında azaldığını bildirmiştir.

Bu çalışmanın bulgularının literatürdeki diğer çalışmalarla karşılaştırılması pek mümkün olmamakla birlikte, numunelerin farklı tipte bağlayıcı malzemeler, katkı maddeleri ve farklı yöntemler kullanılarak hazırlanmış olması nedeniyle pek mümkün olmamaktadır. Tablo 12, silis Aerojelinin farklı bağlayıcı materyallere dâhil edilmesinin termal özellikleri üzerindeki etkisine ilişkin bir fikir vermek için verilmiştir.

Tablo 12. Silika Aerojeli Kullanılan Çalışmaları Karşılaştırması.

Kullanım Şekli	Aerojel Tipi	Aerojel Hacimce % İçeriği	Termal İletkenliği (W/mK)	Basınç Dayanımı (MPa)	Referans
Çimento harcı	Pirinç kabuğundan sentezlenen	47	0,701	11,86	(Abbas vd., 2019)
		62	0,327	8,85	
Beton	Ticari (PCAS FRANCE)	40	0,8	20	(Gao vd., 2014)
		60	0,26	8,3	
Yüksek performanslı betonu	Ticari (Cabot Corporation, Germany)	60	0,5	10	(Ng vd., 2015)
		70	0,45	5	
		80	0,31	Ölçülemedi.	
Çimento harcı	Ticari (Cabot Corporation, Germany)	60	0,52	11,25	(Ng, Jelle, Zhen, & Wallevik, 2016)
		70	0,465	5,75	
Çimento Kaplama	Inorganik	45	0,567	Bilgi verilmedi	(de Fátima Júlio vd., 2016)
High performance hydraulic lime plaster	Ticari (Cabot Corporation, Germany)	0	0,140		(Nosrati & Berardi, 2018)
		25	0,113	Bilgi verilmedi	
		50	0,072		
		90	0,027		
Alçı Bazlı Kaplama	Volkanik tüf attıklarından sentezlenen	0	0,217	3,29	Bu Çalışma.
		25	0,092	1,47	
		50	0,069	1,22	

Sonuç ve Öneriler

Bu çalışmada, Bayburt ilinde bol miktarda bulunan volkanik tüf atıklarının SAT sentezinde başlangıç maddesi ve Silika öncüsü olarak potansiyel kullanılabilirliği araştırılmıştır. Ayrıca sentezlenen SAT inşaat sektöründe kullanılabilirliği, alçı bazlı kompozitlerin üretimine dahil edilerek deneysel olarak araştırılmış olup, volkanik tüf atıklarından, yüksek gözenekli ve maliyeti açısından diğer yöntemlerine göre düşük rekabetçi özelliklere sahip Silika Aerojel, sentezlenmiştir.

Aerojeller endüstriyel yöntemlerle üretilirken başlangıç malzemeleri ile ön işlemlere tabi tutulurken uzun süreler boyunca yüksek sıcaklıkta beklemesi gerekmektedir. Ancak bu çalışmada asit süzdürme tekniği ile Silika Aerojel özelliklerini değiştirmeden başarılı bir şekilde sentezlenebileceği XRD ve yüzey alanı ölçümleriyle belirlenmiştir.

Jelleşme sürecini etkileyen parametreleri belirlemek ve optimize etmek için yapılan ön testlerde, bu süreçteki yavaş karıştırma hızının (<250 rpm) jel oluşumu üzerinde son derece önemli bir parametre olduğu gözlemlenmiştir.

NaCl içermeyen Silika Aerojel ürünü elde etmek için optimum jel yıkama işleminin en az 4 kez tekrarlanması gerektiği XRD yardımıyla belirlendi.

IUPAC tarafından yapılan sınıflandırmaya göre, bu çalışmada sentezlenen Silika Aerojel, gözenek çapları 2-50 nm arasında değişen mezogözenekli yapıya sahip malzemelere ait olan tip 4 izotermine çok benzer bulunmuştur.

Sentezlenen Silika Aerojelin ilave edildiği alçı kompozitlerin yüzey alanlarının artan Silika Aerojel miktarı ile arttığı ancak yüzey alanının aksine ortalama gözenek çapının azaldığı görülmektedir.

Karışıma eklenen SAT hacimce%75 olduğunda, BET yüzey alanı ve gözenek hacminin sırasıyla %12937.6 ve %798 arttığı gözlenmiştir.

SAT'ın alçı kompozitlere eklenmesinin, bileşiğin gözenekliliğini ve su emmesini sırasıyla %67.35 ve %278.23 artırdığı görülmüştür.

SAT'ın alçı bazlı kompozitlere eklenmesi, bileşiğin yoğunluğunda %73,8 oranında bir azalmaya neden olmuştur.

SAT'ın alçı bazlı kompozite eklenmesi, kompozitlerin basınç dayanımında %87,8 oranında bir azalmaya neden olmuştur.

SAT'ın alçı bazlı kompozitlere eklenmesi, kompozitlerin termal iletkenliğinde %68,2 oranında bir azalmaya neden olmuştur.

Alçı kompozitlere SAT katılması, basınç dayanımını düşürmüştür. Bu nedenle yalıtım özelliği ve dayanımı özelliği birlikte değerlendirildiğinde optimum hacimsel ekleme oranı %50 olarak tavsiye edilmektedir.

Alçı sıva kompozitlere SAT eklenmesi, kompozitlerin mukavemetine herhangi bir katkısı olmadığından, kompozitlerin dayanımını artırmak için çeşitli file veya elyaf kullanılması çalışmanın devamında önerilmektedir.

TS 13279-1'e göre alçı sıvanın en düşük basınç dayanımı 2,5 MPa olması gerekir. Bu çalışmada üretilen SAA sıvanın basınç dayanımı bu değerin altında kalmıştır. Standart değerlerini sağlamamıştır. Ancak yukarıda belirtilen standart, alçı kompozitlerin minimum ısı iletkenlik değerinin 0,3 W/mK. olması gerektiğini belirtmektedir. Bu kapsamda mevcut çalışmada silika Aerojel katkısını hacimce %25 yada daha az oranlarda eklenerek standartın ön gördüğü basınç dayanımı da sağlanabilecektir. Bu sebeple daha sonraki araştırmalarda SAA kompozitlerinin mukavemetinin artırılmasına yönelik çalışmalar planlanmaktadır.

Bunun için, sadece ısı iletkenlik gereksinimi düşünüldüğünde, bu çalışmanın SAA örneklerinden yararlanılabileceği sonucuna varılmıştır. Çalışmanın devamında, yüksek basınç dayanımı değerlerine sahip çimento esaslı kompozitlerde kullanılması düşünülmektedir.

Kaynakça

- Abbas, N., Khalid, H. R., Ban, G., Kim, H. T., & Lee, H. K. (2019). Silica aerogel derived from rice husk: an aggregate replacer for lightweight and thermally insulating cement-based composites. *Construction and Building Materials*, 195, 312–322. doi:10.1016/j.conbuildmat.2018.10.227
- Abbas, N., Shao, G. N., Haider, M. S., Imran, S. M., Park, S. S., & Kim, H. T. (2016). Sol–gel synthesis of TiO₂-Fe₂O₃ systems: Effects of Fe₂O₃ content and their photocatalytic properties. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*. doi:10.1016/j.jiec.2016.05.015
- Ahmad, M. W., Mourshed, M., Mundow, D., Sisinni, M., & Rezgui, Y. (2016). Building energy metering and environmental monitoring - A state-of-the-art review and directions for future research. *Energy and Buildings*, 120, 85–102. doi:10.1016/j.enbuild.2016.03.059
- Anna Javellana Lising, M. P. P. (2012). Buying down our carbon footprint: An econometric analysis of the impact of green pricing programs on electricity consumption in the US residential sector. *Urban Climate*. doi:10.1016/j.uclim.2012.09.001
- ASTM D3766-08(2018), Standard Terminology Relating to Catalysts and Catalysis, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2018, www.astm.org. DOI: 10.1520/D3766-08R18. Retrieved from: <http://www.astm.org/cgi-bin/resolver.cgi?D3766>
- ASTM C109 / C109M-16, Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens), ASTM International, West Conshohocken, PA, 2016, www.astm.org. DOI: 10.1520/C0109_C0109M-16. Retrieved from: <http://www.astm.org/cgi-bin/resolver.cgi?C109C109M>.
- Babu, D. S., Ganesh Babu, K., & Wee, T. H. (2005). Properties of lightweight expanded polystyrene aggregate concretes containing fly ash. *Cement and Concrete Research*. doi:10.1016/j.cemconres.2004.11.015
- Baetens, R., Jelle, B. P., & Gustavsen, A. (2011). Aerogel insulation for building applications: A state-of-the-art review. *Energy and Buildings*, 43(4), 761–769. doi:10.1016/j.enbuild.2010.12.012
- Bangi, U. K. H., Rao, A. V., & Rao, A. P. (2008). A new route for preparation of sodium-silicate-based hydrophobic silica aerogels via ambient-pressure drying. *Science and Technology of Advanced Materials*, 9(3). doi:10.1088/1468-6996/9/3/035006
- Bianco, L., Serra, V., Fantucci, S., Dutto, M., & Massolino, M. (2015). Thermal insulating plaster as a solution for refurbishing historic building envelopes: First experimental results. *Energy and Buildings*, 95, 86–91. doi:10.1016/j.enbuild.2014.11.016

- Brás, A., Leal, M., & Faria, P. (2013). Cement-cork mortars for thermal bridges correction. Comparison with cement-EPS mortars performance. *Construction and Building Materials*. doi:10.1016/j.conbuildmat.2013.08.006
- Brunauer, S., Emmett, P. H., & Teller, E. (1938). Adsorption of Gases in Multimolecular Layers. *Journal of the American Chemical Society*. doi:10.1021/ja01269a023
- Buratti, C., Moretti, E., Belloni, E., & Agosti, F. (2014). Development of innovative aerogel based plasters: Preliminary thermal and acoustic performance evaluation. *Sustainability (Switzerland)*. doi:10.3390/su6095839
- C.J. Brinker; G. W. Scherer. (1990). Sol-Gel_Science_The_physics_and_chemistry_of_sol-gel_processing_-_Brinker_1990.pdf. doi:10.1016/S0254-0584(02)00315-2
- Calisesi, M., & Berardi, U. (2017). Aerogel Incorporated Plasters and Mortars. *Sustainable Energy Technologies*.
- Carlson, G., Lewis, D., McKinley, K., Richardson, J., & Tillotson, T. (1995). Aerogel commercialization: technology, markets and costs. *Journal of Non-Crystalline Solids*. doi:10.1016/0022-3093(95)00069-0
- Chen, W., Hao, H., Hughes, D., Shi, Y., Cui, J., & Li, Z. X. (2015). Static and dynamic mechanical properties of expanded polystyrene. *Materials and Design*. doi:10.1016/j.matdes.2014.12.024
- Cuce, E., Cuce, P. M., Wood, C. J., & Riffat, S. B. (2014a). Optimizing insulation thickness and analysing environmental impacts of aerogel-based thermal superinsulation in buildings. *Energy and Buildings*. doi:10.1016/j.enbuild.2014.03.034
- Cuce, E., Cuce, P. M., Wood, C. J., & Riffat, S. B. (2014b). Toward aerogel based thermal superinsulation in buildings: A comprehensive review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 34, 273–299. doi:10.1016/j.rser.2014.03.017
- de Fátima Júlio, M., Ilharco, L. M., Soares, A., Flores-Colen, I., & de Brito, J. (2016). Silica-based aerogels as aggregates for cement-based thermal renders. *Cement and Concrete Composites*, 72, 309–318. doi:10.1016/j.cemconcomp.2016.06.013
- 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*. doi:10.1016/j.jnoncrysol.2018.07.028
- Feng, J., Nguyen, S. T., Fan, Z., & Duong, H. M. (2015). Advanced fabrication and oil absorption properties of super-hydrophobic recycled cellulose aerogels. *Chemical Engineering Journal*. doi:10.1016/j.cej.2015.02.034
- Feng, Q., Chen, K., Ma, D., Lin, H., Liu, Z., Qin, S., & Luo, Y. (2018). Synthesis of high specific surface area silica aerogel from rice husk ash via ambient pressure drying.

- Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. doi:10.1016/j.colsurfa.2017.12.025
- Fricke, J., & Tillotson, T. (1997). Aerogels: Production, characterization, and applications. *Thin Solid Films*, 297(1–2), 212–223. doi:10.1016/S0040-6090(96)09441-2
- Fricke, Jochen. (1992). Aerogels and their applications. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 147–148(C), 356–362. doi:10.1016/S0022-3093(05)80644-1
- Gao, T., Jelle, B. P., Gustavsen, A., & Jacobsen, S. (2014). Aerogel-incorporated concrete: An experimental study. *Construction and Building Materials*. doi:10.1016/j.conbuildmat.2013.10.100
- Glaves, C. L., Davis, P. J., & Smith, D. M. (1988). Surface area determination via NMR: Fluid and frequency effects. *Powder Technology*. doi:10.1016/0032-5910(88)80056-1
- Han, Y., Zhang, X., Wu, X., & Lu, C. (2015). Flame Retardant, Heat Insulating Cellulose Aerogels from Waste Cotton Fabrics by in Situ Formation of Magnesium Hydroxide Nanoparticles in Cellulose Gel Nanostructures. *ACS Sustainable Chemistry and Engineering*. doi:10.1021/acssuschemeng.5b00438
- Hanif, A., Diao, S., Lu, Z., Fan, T., & Li, Z. (2016). Green lightweight cementitious composite incorporating aerogels and fly ash cenospheres - Mechanical and thermal insulating properties. *Construction and Building Materials*. doi:10.1016/j.conbuildmat.2016.04.134
- Hanif, A., Lu, Z., Cheng, Y., Diao, S., & Li, Z. (2017). Effects of Different Lightweight Functional Fillers for Use in Cementitious Composites. *International Journal of Concrete Structures and Materials*. doi:10.1007/s40069-016-0184-1
- Hanif, A., Lu, Z., & Li, Z. (2017). Utilization of fly ash cenosphere as lightweight filler in cement-based composites – A review. *Construction and Building Materials*. doi:10.1016/j.conbuildmat.2017.03.188
- Harmathy Tz. (1970). Thermal Properties Of Concrete At Elevated Temperatures. *J Mater.*
- Herzog, T. (2009). World Greenhouse Gas Emissions in 2005. *World*.
- Hrubesh, L. W. (1998). Aerogel applications. *Journal of Non-Crystalline Solids*. doi:10.1016/S0022-3093(98)00135-5
- Ibn-Mohammed, T., Greenough, R., Taylor, S., Ozawa-Meida, L., & Acquaye, A. (2013). Operational vs. embodied emissions in buildings - A review of current trends. *Energy and Buildings*. doi:10.1016/j.enbuild.2013.07.026
- Ibrahim, M., Biwole, P. H., Achard, P., Wurtz, E., & Ansart, G. (2015). Building envelope with a new aerogel-based insulating rendering: Experimental and numerical study, cost analysis, and thickness optimization. *Applied Energy*, 159, 490–501. doi:10.1016/j.apenergy.2015.08.090

- IEA. (2013). Redrawing The Energy Climate Map. *World Energy Outlook Special Report*. doi:<http://www.worldenergyoutlook.org/media/weowebiste/2013/energyclimatemap/RedrawingEnergyClimateMap.pdf>
- Jelle, B. P. (2011). Traditional, state-of-the-art and future thermal building insulation materials and solutions - Properties, requirements and possibilities. *Energy and Buildings*. doi:10.1016/j.enbuild.2011.05.015
- Jelle, B. P., Gustavsen, A., & Baetens, R. (2010). The path to the high performance thermal building insulation materials and solutions of tomorrow. *Journal of Building Physics*. doi:10.1177/1744259110372782
- Jia, G., Li, Z., Liu, P., & Jing, Q. (2018). Preparation and characterization of aerogel/expanded perlite composite as building thermal insulation material. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 482(October 2017), 192–202. doi:10.1016/j.jnoncrysol.2017.12.047
- Jin, C., Han, S., Li, J., & Sun, Q. (2015). Fabrication of cellulose-based aerogels from waste newspaper without any pretreatment and their use for absorbents. *Carbohydrate Polymers*. doi:10.1016/j.carbpol.2015.01.056
- Khalil, A. A., Ibrahim, A. A., & Mobarak, F. M. (2005). I1-Gypsum Plaster-Fiber Composites By, (November), 1–16.
- Kim, C. E., Yoon, J. S., & Hwang, H. J. (2009). Synthesis of nanoporous silica aerogel by ambient pressure drying. *Journal of Sol-Gel Science and Technology*, 49(1), 47–52. doi:10.1007/s10971-008-1828-7
- Kistler, S. S. (1931). Coherent expanded aerogels and jellies [5]. *Nature*. doi:10.1038/127741a0
- Kockal, N. U. (2016). Investigation about the effect of different fine aggregates on physical, mechanical and thermal properties of mortars. *Construction and Building Materials*. doi:10.1016/j.conbuildmat.2016.08.008
- Koebel, M., Rigacci, A., & Achard, P. (2012). Aerogel-based thermal superinsulation: An overview. *Journal of Sol-Gel Science and Technology*, 63(3), 315–339. doi:10.1007/s10971-012-2792-9
- Korkmaz, S., & Kariper, A. (2020). Graphene and graphene oxide based aerogels: Synthesis, characteristics and supercapacitor applications. *Journal of Energy Storage*, 27(December 2019). doi:10.1016/j.est.2019.101038
- Laustsen, J. (2008). Energy Efficiency Requirements in Building Codes , Energy Efficiency Policies for New Buildings. *Buildings*.
- Liu, X., Chen, Y., Ge, H., Fazio, P., & Chen, G. (2015). Numerical investigation for thermal performance of exterior walls of residential buildings with moisture transfer in hot summer and cold winter zone of China. *Energy and Buildings*. doi:10.1016/j.enbuild.2015.02.016

- Liu, Z. hui, Wang, F., & Deng, Z. ping. (2016). Thermal insulation material based on SiO₂ aerogel. *Construction and Building Materials*, 122, 548–555. doi:10.1016/j.conbuildmat.2016.06.096
- Lu, J., Xue, Y., Wang, Z., & Fan, Y. (2020). Optimized mitigation of heat loss by avoiding wall-to-floor thermal bridges in reinforced concrete buildings. *Journal of Building Engineering*. doi:10.1016/j.jobe.2020.101214
- Markom, M., Singh, H., & Hasan, M. (2001). Supercritical CO₂ fractionation of crude palm oil. *Journal of Supercritical Fluids*, 20(1), 45–53. doi:10.1016/S0896-8446(00)00104-2
- Mills, N. J. (1993). Handbook of polymeric foams and foam technology. *Polymer*. doi:10.1016/0032-3861(93)90758-3
- Mohyeddin, A., Dorji, S., Gad, E. F., & Goldsworthy, H. M. (2017). Inherent limitations and alternative to conventional equivalent strut models for masonry infill-frames. *Engineering Structures*, 141, 666–675. doi:10.1016/j.engstruct.2017.03.061
- Najjar, M. K., Figueiredo, K., Hammad, A. W. A., Tam, V. W. Y., Evangelista, A. C. J., & Haddad, A. (2019). A framework to estimate heat energy loss in building operation. *Journal of Cleaner Production*. doi:10.1016/j.jclepro.2019.07.026
- Nataly Echevarria Huaman, R., & Xiu Jun, T. (2014). Energy related CO₂ emissions and the progress on CCS projects: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. doi:10.1016/j.rser.2013.12.002
- Nazriati, N., Setyawan, H., Affandi, S., Yuwana, M., & Winardi, S. (2014). Using bagasse ash as a silica source when preparing silica aerogels via ambient pressure drying. *Journal of Non-Crystalline Solids*. doi:10.1016/j.jnoncrysol.2014.04.027
- Nejat, P., Jomehzadeh, F., Taheri, M. M., Gohari, M., & Muhd, M. Z. (2015). A global review of energy consumption, CO₂ emissions and policy in the residential sector (with an overview of the top ten CO₂ emitting countries). *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 43, 843–862. doi:10.1016/j.rser.2014.11.066
- Ng, S., Jelle, B. P., Sandberg, L. I. C., Gao, T., & Wallevik, Ó. H. (2015). Experimental investigations of aerogel-incorporated ultra-high performance concrete. *Construction and Building Materials*. doi:10.1016/j.conbuildmat.2014.12.064
- Ng, S., Jelle, B. P., Zhen, Y., & Wallevik, Ó. H. (2016). Effect of storage and curing conditions at elevated temperatures on aerogel-incorporated mortar samples based on UHPC recipe. *Construction and Building Materials*. doi:10.1016/j.conbuildmat.2015.12.162
- Nosrati, R. H., & Berardi, U. (2018). Hygrothermal characteristics of aerogel-enhanced insulating materials under different humidity and temperature conditions. *Energy and Buildings*. doi:10.1016/j.enbuild.2017.09.079

- Panesar, D. K., & Shindman, B. (2012). The mechanical, transport and thermal properties of mortar and concrete containing waste cork. *Cement and Concrete Composites*. doi:10.1016/j.cemconcomp.2012.06.003
- Pierre, A. C., & Pajonk, G. M. (2002). Chemistry of aerogels and their applications. *Chemical Reviews*. doi:10.1021/cr0101306
- Plakhotnikov, K., Bondarenko, D., Dedenyova, E., Saliia, M., & Kostuk, T. (2018). *Heat-insulating materials in modern building industry*. In *MATEC Web of Conferences*. doi:10.1051/mateconf/201823002024
- Rao, A. P., Rao, A. V., & Pajonk, G. M. (2007). Hydrophobic and physical properties of the ambient pressure dried silica aerogels with sodium silicate precursor using various surface modification agents. *Applied Surface Science*, 253(14), 6032–6040. doi:10.1016/j.apsusc.2006.12.117
- Rao, A. V., Pajonk, G. M., Bhagat, S. D., & Barboux, P. (2004). *Comparative studies on the surface chemical modification of silica aerogels based on various organosilane compounds of the type R_nSiX_{4-n}* . In *Journal of Non-Crystalline Solids*. doi:10.1016/j.jnoncrysol.2004.06.034
- Robert, A., & Kummert, M. (2012). Designing net-zero energy buildings for the future climate, not for the past. *Building and Environment*. doi:10.1016/j.buildenv.2011.12.014
- Schnellenbach-Held, M., Welsch, T., Fickler, S., Milow, B., & Ratke, L. (2016). Development of high performance aerogel concrete | Entwicklung von Hochleistungsaerogelbeton. *Beton- Und Stahlbetonbau*.
- Seo, J., Bae, S. J., Jang, D. I., Park, S., Yang, B., & Lee, H. K. (2020). Thermal behavior of alkali-activated fly ash/slag with the addition of an aerogel as an aggregate replacement. *Cement and Concrete Composites*, 106(November 2019), 103462. doi:10.1016/j.cemconcomp.2019.103462
- Shi, F., Liu, J. X., Song, K., & Wang, Z. Y. (2010). Cost-effective synthesis of silica aerogels from fly ash via ambient pressure drying. *Journal of Non-Crystalline Solids*. doi:10.1016/j.jnoncrysol.2010.08.005
- Shi, F., Wang, L., & Liu, J. (2006). Synthesis and characterization of silica aerogels by a novel fast ambient pressure drying process. *Materials Letters*, 60(29–30), 3718–3722. doi:10.1016/j.matlet.2006.03.095
- Silva, S. P., Sabino, M. A., Fernandes, E. M., Correlo, V. M., Boesel, L. F., & Reis, R. L. (2005). Cork: Properties, capabilities and applications. *International Materials Reviews*. doi:10.1179/174328005X41168
- Smirnova, I., & Gurikov, P. (2017). Aerogels in Chemical Engineering: Strategies Toward

- Tailor-Made Aerogels. *Annual Review of Chemical and Biomolecular Engineering*. doi:10.1146/annurev-chembioeng-060816-101458
- Smirnova, I., & Gurikov, P. (2018). Aerogel production: Current status, research directions, and future opportunities. *Journal of Supercritical Fluids*, 134(December 2017), 228–233. doi:10.1016/j.supflu.2017.12.037
- Soares, A., de Fátima Júlio, M., Flores-Colen, I., Ilharco, L. M., & Brito, J. de. (2018). EN 998-1 performance requirements for thermal aerogel-based renders. *Construction and Building Materials*. doi:10.1016/j.conbuildmat.2018.05.197
- Soleimani Dorcheh, A., & Abbasi, M. H. (2008). Silica aerogel; synthesis, properties and characterization. *Journal of Materials Processing Technology*. doi:10.1016/j.jmatprotec.2007.10.060
- Stahl, T., Ghazi Wakili, K., Hartmeier, S., Franov, E., Niederberger, W., & Zimmermann, M. (2017). Temperature and moisture evolution beneath an aerogel based rendering applied to a historic building. *Journal of Building Engineering*, 12(May), 140–146. doi:10.1016/j.jobbe.2017.05.016
- Strzalkowski, J., & Garbalińska, H. (2016). Thermal and strength properties of lightweight concretes with the addition of aerogel particles. *Advances in Cement Research*. doi:10.1680/jadcr.16.00032
- Tang, Q., & Wang, T. (2005). Preparation of silica aerogel from rice hull ash by supercritical carbon dioxide drying. *Journal of Supercritical Fluids*. doi:10.1016/j.supflu.2004.12.003
- Tsioulou, O., Ayegbusi, J., & Lampropoulos, A. (2017). *Experimental investigation on thermal conductivity and mechanical properties of a novel Aerogel Concrete*. In *High Tech Concrete: Where Technology and Engineering Meet - Proceedings of the 2017 fib Symposium*. doi:10.1007/978-3-319-59471-2-16
- Tsioulou, O., Ayegbusi, J., & Lampropoulos, A. (2018). Experimental Investigation on Thermal Conductivity and Mechanical Properties of a Novel Aerogel Concrete. In *High Tech Concrete: Where Technology and Engineering Meet*. doi:10.1007/978-3-319-59471-2_16
- TS EN 13279-1(2007), Gypsum binders and gypsum plasters - Part 1: Definitions and requirements.
- TS EN 12390-7. (2002), Testing hardened concrete - Part 7: Density of hardened concrete.
- TS EN 12667. (2003), Thermal performance of building materials and products - Determination of thermal resistance by means of guarded hot plate and heat flow meter methods - Products of high and medium thermal resistance.
- TS EN 12939. (2005), Thermal performance of building materials and products - Determination

- of thermal resistance by means of guarded hot plate and heat flow meter methods - Thick products of high and medium thermal resistance.
- U.S. Department of Energy. (2012). Buildings energy databook. *Energy Efficiency & Renewable Energy Department*.
- Wang, L., Liu, P., Jing, Q., Liu, Y., Wang, W., Zhang, Y., & Li, Z. (2018). Strength properties and thermal conductivity of concrete with the addition of expanded perlite filled with aerogel. *Construction and Building Materials*, 188, 747–757. doi:10.1016/j.conbuildmat.2018.08.054
- Wang, Y., Huang, J., Wang, D., Liu, Y., Zhao, Z., & Liu, J. (2019). Experimental investigation on thermal conductivity of aerogel-incorporated concrete under various hygrothermal environment. *Energy*. doi:10.1016/j.energy.2019.115999
- Woignier, T., & Phalippou, J. (1987). Skeletal density of silica aerogels. *Journal of Non-Crystalline Solids*. doi:10.1016/S0022-3093(87)80024-8
- Wu, Y., Wang, J. Y., Monteiro, P. J. M., & Zhang, M. H. (2015). Development of ultra-lightweight cement composites with low thermal conductivity and high specific strength for energy efficient buildings. *Construction and Building Materials*. doi:10.1016/j.conbuildmat.2015.04.004
- Xing, Y., Hewitt, N., & Griffiths, P. (2011). Zero carbon buildings refurbishment - A Hierarchical pathway. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. doi:10.1016/j.rser.2011.04.020
- Yang, J., Muhammad, S., Jo, M. R., Kim, H., Song, K., Agyeman, D. A., ... Kang, Y. M. (2016). In situ analyses for ion storage materials. *Chemical Society Reviews*. doi:10.1039/c5cs00734h
- Yau, Y. H., & Hasbi, S. (2013). A review of climate change impacts on commercial buildings and their technical services in the tropics. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. doi:10.1016/j.rser.2012.10.035
- Yavuz Çelik, M., & Sabah, E. (2008). Geological and technical characterisation of Iscehisar (Afyon-Turkey) marble deposits and the impact of marble waste on environmental pollution. *Journal of Environmental Management*. doi:10.1016/j.jenvman.2007.01.004
- Yekrangnia, M., & Mohammadi, M. (2017). A new strut model for solid masonry infills in steel frames. *Engineering Structures*, 135, 222–235. doi:10.1016/j.engstruct.2016.10.048

ÖZ GEÇMİŞ

Baraka CIZA, 1992 yılında Burundi’de doğdu. İlk ve orta öğrenimini Mabanda’da, lise öğrenimini 2010 yılında Kamenge Teknik Lisesi’nde (Ecole Technique Secondaire de KAMENGE) tamamladı.

2014 yılında Ankara Üniversitesi Türkçe Dil eğitim aldı ve aynı sene Bayburt Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü’nde başladığı lisans öğrenimini 2018 yılında tamamladı. 2019 yılında Bayburt Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı’nda yüksek lisans eğitimine başladı.

