



**KTO KARATAY ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
MİMARLIK ANABİLİM DALI
MİMARLIK PROGRAMI**

**SİLİKA İÇERİKLİ AEROJELİN SOL-JEL YÖNTEMİ İLE SENTEZLENMESİ
VE MİMARİ YAPI MALZEMESİNİN PERFORMANSININ GELİŞTİRİLMESİ**

Tuba ARKAN DEMİRÖRS

Doktora Tezi

**KONYA
Ocak 2023**

SİLİKA İÇERİKLİ AEROJELİN SOL-JEL YÖNTEMİ İLE SENTEZLENMESİ VE
MİMARİ YAPI MALZEMESİNİN PERFORMANSININ GELİŞTİRİLMESİ

Tuba ARKAN DEMİRÖRS

KTO Karatay Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Mimarlık Anabilim Dalı
Mimarlık Programı

Doktora Tezi

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Kerim ÇINAR

Konya
Ocak 2023

BİLDİRİM

Enstitü tarafından onaylanan Doktora tezimin tamamını veya herhangi bir kısmını basılı veya dijital biçimde arşivleme ve aşağıda belirtilen koşullar dahilinde erişime açma iznini KTO Karatay Üniversitesine verdiğimi bildiririm. Bu izinle, Üniversiteye verilen kullanım hakları dışındaki tüm fikri mülkiyet haklarım bende kalacak ve gelecekteki çalışmalar (makale, kitap, lisans, patent vb.) için tezimin tamamının veya bir bölümünün kullanım hakları yalnızca bana ait olacaktır.

Tezimin bütünüyle kendi çalışmam olduğunu, başkalarının haklarını ihlal etmediğimi ve tezimin tek yetkili sahibi olduğumu beyan ve taahhüt ederim. Telif hakkı bulunan ve sahiplerinden yazılı izinle kullanılması zorunlu olan kaynakları, yazılı izin alarak kullandığımı ve istenildiğinde izinlerin suretlerini Üniversiteye teslim etmeyi taahhüt ederim.

Yükseköğretim Kurulu tarafından yayımlanan “Lisansüstü Tezlerin Elektronik Ortamda Toplanması, Düzenlenmesi ve Erişime Açılmasına İlişkin Yönerge” kapsamında, tezim, aşağıda belirtilen koşullar haricince, YÖK Ulusal Tez Merkezi ve KTO Karatay Üniversitesi Açık Erişim Sisteminde erişime açılır.

Enstitü / Fakülte Yönetim Kurulu kararı ile tezimin erişime açılması mezuniyet tarihimden itibaren 2 yıl ertelenmiştir.¹

Enstitü / Fakülte Yönetim Kurulunun gerekçeli kararı ile tezimin erişime açılması mezuniyet tarihimden itibaren 6 ay ertelenmiştir.²

Tezimle ilgili gizlilik kararı verilmiştir.³⁴

19 Ocak 2023

**Tuba ARKAN
DEMİRÖRS**

¹ MADDE 6(1) Lisansüstü teze ilgili patent başvurusu yapılması veya patent alma sürecinin devam etmesi durumunda, tez danışmanının önerisi ve enstitü anabilim dalının uygun görüşü üzerine enstitü veya fakülte yönetim kurulu iki yıl süre ile tezin erişime açılmasının ertelenmesine karar verebilir.

² MADDE 6(2) Yeni teknik, materyal ve metotların kullanıldığı, henüz makaleye dönüşmemiş veya patent gibi yöntemlerle korunmamış ve internetten paylaşılması durumunda 3. şahıslara veya kurumlara haksız kazanç imkanı oluşturabilecek bilgi ve bulguları içeren tezler hakkında tez danışmanının önerisi ve enstitü anabilim dalının uygun görüşü üzerine enstitü veya fakülte yönetim kurulunun gerekçeli kararı ile altı ayı aşmamak üzere tezin erişime açılması engellenebilir.

³ MADDE 7(1) Ulusal çıkarları veya güvenliği ilgilendiren, emniyet, istihbarat, savunma ve güvenlik, sağlık vb. konulara ilişkin lisansüstü tezlerle ilgili gizlilik kararı, tezin yapıldığı kurum tarafından verilir. Kurum ve kuruluşlarla yapılan işbirliği protokolü çerçevesinde hazırlanan lisansüstü tezlere ilişkin gizlilik kararı ise, ilgili kurum ve kuruluşun önerisi ile enstitü veya fakültenin uygun görüşü üzerine üniversite yönetim kurulu tarafından verilir. Gizlilik kararı verilen tezler Yükseköğretim Kuruluna bildirilir.

⁴ MADDE 7(2) Gizlilik kararı verilen tezler gizlilik süresince enstitü veya fakülte tarafından gizlilik kuralları çerçevesinde muhafaza edilir, gizlilik kararının kaldırılması halinde Tez Otomasyon Sistemine yüklenir.

ETİK BEYAN

KTO Karatay Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Tez Hazırlama ve Yazım Kurallarına uygun olarak Prof. Dr. Kerim ÇINAR danışmanlığında tarafımdan üretilen bu tez çalışmasında; sunduğum tüm veri, enformasyon, bilgi ve belgeleri bilimsel etik kuralları çerçevesinde elde ettiğimi, tüm değerlendirme, analiz, bulgu ve sonuçları bilimsel usullere uygun olarak sunduğumu, tez çalışmasında yararlandığım kaynakların tümüne bilimsel normlara uygun biçimde atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi, tezimin gösterilen durumlar dışında özgün olduğunu bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarımı kabullendiğimi beyan ederim.

19 Ocak 2023

**Tuba ARKAN
DEMİRÖRS**

Anneme ve Babama.

TEŞEKKÜR

Mimarlık uygulamalarında malzeme ve üretim teknolojilerinin gelişmesiyle birlikte yenilikçi malzemelerin önemini vurgulayan bu araştırmayı bir biyokimyacı ve iç mimarın bakış açısından yorumlamanın gayretiyle yaptım. Doktora sürecim disiplinlerarası çalışabilmem sayesinde bana farklı bakış açıları kazanmamı sağladı. Bu yolculukta, lisans ve doktora eğitim hayatım süresince her türlü yardımı ve desteği hiçbir zaman esirgemeyen, tez çalışmamın yürütülmesinde değerli bilgi ve etkin mesleki tecrübelerinden her daim yararlanma fırsatı bulduğum, disiplinli ve çalışkan kişiliği ile bana daima örnek olan çok kıymetli hocam, tez danışmanım Sayın Prof. Dr. Kerim ÇINAR'a sonsuz teşekkürlerimi sunuyorum. Bana değerli vaktini ayırıp yoğun bilgi donanımları ve deneyimlerini her zaman benimle paylaşarak tez çalışmamın yönlendirilmesinde ve ilerlemesinde çok büyük katkısı olan, ayrıca araştırmaya sevk eden yol gösterici tutumu, analitik ve sorgulayıcı yaklaşımı ile bana yeni ufuklar kazandıran değerli hocam Sayın Doç. Dr. Hakan GÖKMEŞE'ye; bilgi ve tecrübesinden her daim yararlandığım tezime büyük ölçekte katkı sağlayan değerli hocam Sayın Dr. Öğr. Üyesi Nazım KOÇU'ya; lisans eğitimim boyunca bilgi birikimleri ile beni destekleyen ve tez savunma sürecinde değerli katkılarını hiç esirgemeyen kıymetli hocalarım Sayın Prof. Dr. Rabia KÖSE DOĞAN'a ve Sayın Dr. Öğr. Üyesi Mustafa KAŞ'a; tez savunma süresince değerli katkısı için değerli hocam Sayın Dr. Öğr. Üyesi Halil SEVİM'e hem hayata dair hem de mesleki bilgi ve tecrübelerini paylaşmaktan çekinmeyen ve manevi desteği ile her zaman yanımda olan değerli hocam Sayın Mimar Semra ÇINAR'a; ayrıca KTO Karatay Üniversitesi İç Mimarlık ve Mimarlık Bölümü'ndeki değerli hocalarıma ve çalışma arkadaşlarıma çok teşekkür ederim.

Bu tez çalışmasını hazırlarken deneysel çalışmalarım doğrultusunda yapılan deneyler, Eti Alüminyum A.Ş. Ar-Ge laboratuvarında yürütülmüştür. Bana bu Ar-Ge laboratuvarında araştırma ve çalışma fırsatı veren, laboratuvar çalışmalarımda gerekli bütün imkanları sağlayan, ayrıca eğitim hayatımın her sürecinde beni destekleyen, bilgi ve tecrübesiyle yolumu her zaman açan değerli babam Eti Alüminyum Genel Müdürü Mehmet ARKAN'a; deneysel çalışmalarımın yürütüldüğü Eti Alüminyum A.Ş. Ar-Ge Müdürlüğü ve laboratuvar çalışanlarına bu uzun süreçte çalışmama sundukları katkılardan dolayı çok teşekkür ederim.

En özel teşekkürümü sevgili eşim Av. Uğur DEMİRÖRS'e sunuyorum. Yoğun ve yorucu zamanlarda gösterdiği cömert ve sevecen tutumuyla bana "eş" kavramının önemini öğretti. Tez çalışmam süresince beni motive ettiğin, attığım her adımda arkamda olduğun ve bütün desteklerin için sana sonsuz teşekkürlerimi sunuyorum. Ve son olarak beni bugünlere kadar getiren sadece yetişmemde değil tüm eğitim hayatım boyunca büyük emekleri olan hiçbir fedakârlıktan kaçınmaksızın her türlü desteği veren, her konudaki koşulsuz sevgileri, ilgileri, özverileri ve güvenleri sayesinde var olduğum canım ailem babam Mehmet ARKAN'a ve annem Hatice ARKAN'a benim tez çalışmamın görünmez kahramanlarına; bilgiyi ve doğruyu arayan; görgüsü, zarafetiyle ve bilge kişiliği ile kendime örnek aldığım biricik ablam Leman DURSUN'a tüm süreçte yanımda oldukları ve destekleri için ne kadar teşekkür etsem azdır. İyi ki varsınız.

19 Ocak 2023

Tuba ARKAN DEMİRÖRS

ÖZET

Tuba ARKAN DEMİRÖRS

SİLİKA İÇERİKLİ AEROJELİN SOL-JEL YÖNTEMİ İLE SENTEZLENMESİ VE MİMARİ YAPI MALZEMESİNİN PERFORMANSININ GELİŞTİRİLMESİ

Doktora Tezi

Konya, 2023

Mimari yapılarda ısı muhafazası ve enerji tasarrufu sağlayarak insan konforunu arttıran, binalarda performans geliştirici kabiliyete sahip silika aerojel katkılı yapı malzemelerinin kullanımı son yıllarda oldukça önem kazanmaktadır. Özellikle silika aerojel malzemeler, termal ve mekanik özellikleri, hafifliği, düşük yoğunlukları, yüksek gözeneklilik, yüksek yüzey alanı, hidrofobiklik gibi üstün özelliklerinin yanı sıra birçok uygulama alanında dikkat çekmektedir. Bu bakımdan tez çalışmasında, Konya ve çevresinden temin edilen 4 farklı silisyum kaynağı kullanılarak sol-jel yöntemi ile silika bazlı aerojel sentezi, karakterizasyonu ve mimarlık uygulamalarında yenilikçi yapı malzemesinin termal yalıtkan olarak kullanımının geliştirilmesi hedeflenmiştir. Yapılan deneysel çalışmalarda sol-jel yöntemi ile 4 farklı başlangıç malzemesi (ticari döküm kumu, atık döküm kumu, radyolarit, kuvars) ve 5 farklı pH (2-4-6-8-9) değerleri kullanılmıştır. Çeşitli sol-jel üretim parametrelerinin malzeme özellikleri üzerindeki etkisi incelenmiştir. Ardından sentezleme çalışmaları sırasında belirlenen optimum parametrelerle yüksek performanslı silika aerojel üretimi gerçekleştirilmiştir. Son olarak üretilen hidrofilik yapıdaki silika arojelleri süperhidrofobik özelliğe getirebilmek amacıyla Trimethylchlorosilane (TMCS) modifikasyon kimyasalı kullanılarak, yüzey modifikasyonu işlemi sonrası süperhidrofobik silika aerojel tozu elde edilmiştir. Elde edilen nihai silika arojellerin karakterizasyonu bakımından; XRF, XRD, ICP-OES, yoğunluk çalışması, FT-IR, BET, FE-SEM, temas açısı incelemeleri yapılmıştır. Mimari yapı malzemesi uygulamaları açısından ağırlıkça %0, %0.5, %1, %2, %5 silika aerojel düşük katkı oranları kullanılarak alçı levha deney numuneleri üretilmiştir. Üretilen silika aerojel takviyeli alçı levha deney numunelerinin mekanik ve fiziksel özelliklerinin belirlenmesi amacıyla sırasıyla üç nokta eğilme dayanımı, basınç dayanımı, termal iletkenlik ve su emme testleri uygulanmıştır. Genel olarak elde edilen deneysel sonuçlar incelendiğinde düşük katkı oranlarında silika aerojel takviyesinin malzemenin termal iletkenlik ve mekanik özellikleri açısından olumlu sonuçlar sergilediği tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler

Sol-jel, silika aerojel, mimari yapı malzemesi, alçı levha, termal iletkenlik

ABSTRACT

Tuba ARKAN DEMİRÖRS

SYNTHESISING SILICA AEROGEL BY SOL-GEL METHOD AND DEVELOPING THE PERFORMANCE OF ARCHITECTURAL BUILDING MATERIAL

Ph. D. Thesis

Konya, 2023

The use of silica aerogel-added building materials, which increase human comfort by providing heat preservation and energy savings in architectural structures and have performance enhancing ability in buildings, has gained importance in recent years. In particular, silica aerogel materials attract attention in many application areas, in addition to their superior properties such as thermal and mechanical properties, lightness, low densities, high porosity, high surface area, hydrophobicity. In this respect, in the thesis study, it was aimed to develop the synthesis and characterization of silica based aerogel by sol-gel method by using 4 different silica sources obtained from Konya and its surroundings, and to develop use of innovative building material as a thermal insulator in architectural applications. In the experimental studies, 4 different starting materials (commercial casting sand, waste casting sand, radiolarite, quartz) and 5 different pH (2-4-6-8-9) values were used with the sol-gel method. The effects of various sol-gel production parameters on material properties were investigated. Then high performance silica aerogel production was carried out with the optimum parameters determined during the synthesis studies. Finally, in order to make the produces hydrophilic silica aerogels superhydrophobic, Trimethylchlorosilane (TMCS) modification chemical was used and superhydrophobic silica aerogel power was obtained after the surface modification process. In terms of characterization of the final silica aerogels, XRF, XRD, ICP-OES, density study, FT-IR, BET, FE-SEM, contact angle investigations were performed. In terms of architectural material applications, plasterboard test samples were produced by using low additive rates of %0, %0.5, %1, %2, %5 silica aerogel by weight. In order to determine the mechanical and physical properties of the produced silica aerogel added plasterboard test samples, three point bend strength, compressive strength, thermal conductivity and water absorption tests were applied respectively. When the experimental results obtained in general were examined, it was determined that the silica aerogel reinforcement at low additive ratios showed positive results in terms of thermal conductivity and mechanical properties of the material.

Keywords

Sol-gel, silica aerogel, architectural building material, plasterboard, thermal conductivity

İÇİNDEKİLER

KABUL VE ONAY	i
BİLDİRİM	ii
ETİK BEYAN.....	iii
TEŞEKKÜR.....	v
ÖZET	vi
ABSTRACT.....	vii
İÇİNDEKİLER	viii
TABLolar DİZİNİ	xi
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xii
SİMGELER DİZİNİ	xvi
KISALTMALAR DİZİNİ.....	xvii
1. GİRİŞ	1
1.1. Tez Projesinin Amacı	3
1.2. Tez Çalışmasının Kapsamı.....	3
1.3. Tez Projesinin Yöntemi.....	4
2. KAVRAMSAL ÇERÇEVE	7
2.1. Malzemenin Mimarlıkta Yeri ve Önemi	7
2.2. Alçı.....	9
2.2.1. Alçının Tarihçesi	10
2.2.2. Alçı Üretimi.....	11
2.2.3. Alçının Özellikleri ve Kullanım Alanları	13
2.3. Alçı Levha	15
2.3.1. Alçı Levha Tarihçesi.....	16
2.3.2. Alçı Levha Üretimi	16
2.3.3. Alçı Levha Özellikleri ve Kullanım Alanları	17
2.3.4. Alçı Levha Çeşitleri.....	19
2.4. Aerojeller.....	21
2.4.1. Aerojellerin Tarihçesi	22
2.4.2. Aerojel Çeşitleri.....	25
2.5. Silika Aerojellin Özellikleri	31
2.5.1. Silika Aerojellerin Yoğunluk Özellikleri	32
2.5.2. Silika Aerojellerin Gözeneklilik Özellikleri.....	33

2.5.3. Silika Aerojellerin Hidrofobiklik Özellikleri	35
2.5.4. Silika Aerojellerin Termal İletkenlik Özellikleri.....	38
2.5.5. Silika Aerojellerin Mekanik Özellikleri	41
2.5.6. Silika Aerojellerin Optik Özellikleri	41
2.5.7. Silika Aerojellerin Akustik Özellikleri.....	44
2.6. Silika Aerojelin Sentezi.....	46
2.7. Silika Aerojelin Kullanım Alanları	59
2.8. Silika Aerojelin Mimarlık Alanında Yeri ve Önemi	64
2.9. Silika Aerojelin Mimarlık Alanında Kullanımı.....	65
2.9.1. Mimari Yapılarda Yarı Saydam ve Saydam Silika Aerojel Malzemeler ve Uygulamaları	69
2.9.2. Mimari Yapılarda Opak Silika Aerojel Yalıtım Malzemeleri ve Uygulamaları	76
2.10. Bölüm Sonucu	92
3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	93
3.1. Malzemeler.....	96
3.1.1. Hammaddeler.....	96
3.1.2. Kimyasal Malzemeler.....	96
3.2. Deneysel Yöntem	97
3.2.1. Farklı Silika Kaynaklarından Sodyum Silikat Çözeltisi Eldesi.....	99
3.2.2. Sol-jel Yöntemi ile Silika Kaynaklarından Aerojel Üretimi	101
3.2.3. Silika Aerojel Katkılı Alçı Levha Numunelerinin Karışım Oranları ve Üretimi.....	105
3.3. Sentezlenen Silika Aerojellerin Karakterizasyonu.....	114
3.3.1. XRF İncelemeleri	115
3.3.2. XRD İncelemeleri.....	115
3.3.3. ICP-OES İncelemeleri	116
3.3.4. Yoğunluk Çalışması	117
3.3.5. FT-IR Çalışması	117
3.3.6. BET Ölçümleri	117
3.3.7. Temas Açısı Ölçümleri.....	118
3.3.8. FE-SEM İncelemeleri.....	119
3.4. Mekanik Mukavemet Testleri	119
3.4.1. Eğilme Dayanımı Testi.....	119
3.4.2. Basınç Dayanımı Testi.....	120

3.5. Fiziksel Özellik Testleri	123
3.5.1. Termal İletkenlik İncelemeleri	123
3.5.2. Su Emme Analizi	123
3.6. Bölüm Sonucu	124
4. DENEYSEL SONUÇLAR	125
4.1. Sentezlenen Malzemelerin Karakterizasyonu	125
4.1.1. XRF Sonuçları	125
4.1.2. XRD Sonuçları	126
4.1.3. ICP-OES Sonuçları	132
4.1.4. Yoğunluk Sonuçları	133
4.1.5. FT-IR Sonuçları	136
4.1.6. BET Sonuçları	143
4.1.7. Temas Açısı Ölçüm Sonuçları	145
4.1.8. FE-SEM Sonuçları	148
4.2. Mekanik Mukavemet Test Sonuçları	154
4.2.1. Üç Nokta Eğilme Analiz Sonuçları	154
4.2.2. Basınç Dayanımı Analiz Sonuçları	157
4.3. Fiziksel Özellik Test Sonuçları	160
4.3.1. Termal İletkenlik Analiz Sonuçları	160
4.3.2. Su Emme Analiz Sonuçları	162
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	165
KAYNAKLAR	172
ÖZGEÇMİŞ	191

TABLolar DİZİNİ

Tablo 1. Alçı taşının ayrışma sıcaklığı ile edilen ürünler	13
Tablo 2. Aerojellerin sınıflandırılması	26
Tablo 3. Silika aerojelin özellikleri	32
Tablo 4. Sol-jel sürecinde çeşitli basamaklarda etkili olan parametreler.....	48
Tablo 5. Özelliklerine göre silika aerojel uygulamaları.....	62
Tablo 6. Kalwall aerojel içerikli sandviç panel uygulamalarına ait yapı örnekleri	72
Tablo 7. Buratti ve arkadaşlarının laboratuvar testlerinde kullanılan farklı katkı oranlarında aerojel içeren sıvaların ısıl iletkenlik katsayıları	79
Tablo 8. Kimyasal Malzemeler	97
Tablo 9. Ticari döküm kumu (TDK), atık döküm kumu (ADK), radyolarit (R), kuvarsdan (K) silika aerojel üretiminde kullanılan parametreler tablosu	102
Tablo 10. Sentez sonrası üretilen süperhidrofobik silika aerojel numuneleri.....	104
Tablo 11. Mekanik testler için silika aerojel katkılı alçı levha numunelerinin karışım oranları (ağırlıkça %)	106
Tablo 12. Mekanik deneyler için silika aerojel katkılı alçı levha numunelerinin karışım oranları (g).....	107
Tablo 13. Termal iletkenlik deneyi için silika aerojel katkılı alçı levha numunelerinin karışım oranları (%)	108
Tablo 14. Termal iletkenlik deneyi için silika aerojel katkılı alçı levha numunelerinin karışım oranları (g).....	109
Tablo 15. Alçı levha deney numuneleri için yapılan testler.....	110
Tablo 16. Eğilme dayanımı ve basınç dayanımı testi için üretilen silika aerojel tozları ile hazırlanan 40x40x160 mm ölçülerinde tek tip prizmatik alçı levha deney numuneleri	112
Tablo 17. Termal iletkenlik katsayısının ölçümü için üretilen silika aerojel tozları ile hazırlanan deney numuneleri	113
Tablo 18. Deney Numunelerinin Mekanik Testleri	122
Tablo 19. Alçı tozuna (CaSO ₄) ait XRF tablosu (%).....	125
Tablo 20. TDK, ADK, R, K başlangıç kaynaklarına ait XRF tablosu (%).....	126
Tablo 21. Sodyum silikat çözeltisine bağlı ortaya çıkan ICP-OES Sonuçları.....	133
Tablo 22. TDK, ADK, R, K maddelerinden farklı pH'larda elde edilen hidrofilik silika aerojellerin F-TIR spektrumları	137
Tablo 23. TDK, ADK, R, K'dan optimum pH'larda elde edilen süperhidrofobik silika aerojellerin FT-IR spektrumları	141

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1. Çöken jips kristalleri	12
Şekil 2. Çift tarafı karton kaplı alçı levha	15
Şekil 3. (a) Granül silika aerojel, (b) Toz silika aerojel	21
Şekil 4. a) Monolitik aerojel, b)Toz aerojel, c) Aerojel film	25
Şekil 5. Monolitik Silika Aerojel	28
Şekil 6. a) Silindirik monolitik karbon aerojel, b)öğütülmüş toz karbon aerojel Kaynak: Balkabak (2009).....	29
Şekil 7. Monolitik alümina aerojel.....	31
Şekil 8. Silika aerojelin nano gözenekli SiO ₂ ağ yapısı	34
Şekil 9. Silika aerojellerin gözenek özellikleri a) SEM görüntüsü b)TEM görüntüsü ...	34
Şekil 10. Silika aerojelin kimyasal bağ yapılarının şematik gösterimi (a) Hidrofilik, (b) Hidrofobik, (c) Süperhidrofobik	36
Şekil 11. Silika Aerojeller üzerindeki su damlasının görüntüsü	37
Şekil 12. Su damlacığının hidrofilik, hidrofobik, superhidrofobik yüzeylerde temas açısının şeması	37
Şekil 13. Aerojel ısı transfer mekanizması	39
Şekil 14. Silika aerojelin ısı yalıtım uygulamaları	39
Şekil 15. Karton ev modeli kullanılarak gün ışığı yönetimi ile a) aynasal çift cam b) dağınık aerojel cam arasında karşılaştırma	43
Şekil 16. Granül dolgulu aerojel pencerelerin geleneksel şeffaf pencerelerle değiştirildiği iki inşa proje örneği. a) Detroit Sanat Okulu, (Michigan, ABD) b) SUNY Stony Brook Üniversitesi Nobel Salonları (Newyork, ABD).....	44
Şekil 17. Silika aerojel sentezinde kullanılan sol-jel yöntemin basamaklarının şematik gösterimi.....	46
Şekil 18. Asit ve baz katalizörlü sol-jel yöntemi şeması	49
Şekil 19. TEOS ve TMOS silika öncüleri.....	50
Şekil 20. Silisyumun asit ve baz katalizörlerindeki hidroliz mekanizması.....	50
Şekil 21. Çözelti pH'ına göre yoğunlaşma ve hidroliz oranlarının değişimi	51
Şekil 22. Silisyumun asit ve baz katalizörlüğündeki kondenzasyon mekanizması	52
Şekil 23. a) Asit katalizli mekanizma ile oluşan jel yapısı b) baz katalizli mekanizma ile oluşan jel yapısı.....	53
Şekil 24. Silika solun jelleşme sırasındaki TEM görüntüsü	53
Şekil 25. Zamana göre viskozite değişim grafiği.....	54
Şekil 26. Aerojellerin a) Stardust uydusunda b) Bina camında kullanımı	61

Şekil 27. Geleneksel (elyaf ve köpük) yalıtımda ısı transfer mekanizmaları	67
Şekil 28. Gözenekli yapı malzemesinde ısı transfer mekanizmaları.....	68
Şekil 29. Silika aerojel esaslı yapı ürünlerinin sınıflandırılması.....	69
Şekil 30. Spokane Uluslararası Havaalanı (Washington, ABD) için Zeck Butler Mimarlık tarafından yapılan, Kalwall şirketinin Cabot Lumira aerojel ile üretilen yarı saydam sandviç panel uygulaması.	71
Şekil 31. Cabot aerojel granül dolgululu Scobatherm cam elyafı kompozit panellerin şeffaf bir gün ışığı alan çatı konstrüksiyonu biçiminde kullanımının ilk örneği, Zürih'teki Buchwiesen okulunun jimnastik ve beden eğitimi salonundadır	73
Şekil 32. Yale Üniversitesi Heykel binası ve galerisinde (New Haven, ABD) dış duvarda kullanılan yarı saydam aerojel yalıtımı örneği.....	74
Şekil 33. Güneş ışığı aydınlatması için yüksek performanslı bir ısı yalıtım çözümü olarak yarı saydam aerojel yalıtımı örneği.....	74
Şekil 34. Silika aerojel takviyeli sıvaların yerinde uygulaması	78
Şekil 35. Test duvarına tek uygulamada uygulanan 1 m ² 'lik, kalınlığı az olan silika aerojel bazlı sıva uygulaması	80
Şekil 36. Empa ve Fixit tarafından geliştirilen yüksek performanslı silika aerojel yalıtım sıva malzemesinin enine kesiti.....	81
Şekil 37. Hidrofobik silika aerojel ile güçlendirilmiş sıva örnekleri	83
Şekil 38. İsviçre, Zürih'te 20. yüzyılın başlarından kalma çok aileli bir şehir evinin tadilatı. (a)Yenilemeden önceki dış görünüm (b)yenilemeden sonraki dış görünüm	86
Şekil 39. Spaceloft battaniyeleri ile dış cephe duvar yalıtımı montaj uygulaması	87
Şekil 40. Aspen aerojel'in geliştirdiği aerogel fiber kompozit örtü.....	87
Şekil 41. Aerocalce aerojel battaniye yalıtım sistemi ile binanın yalıtımının güçlendirilmesine ait örnekler. (a) binanın önden ve yandan görünümü (b) Aerocalce sisteminin katmanlı yapısının enine kesiti (c) zemindeki duvar ve pencere detayları....	88
Şekil 42. Aerogips alçı panelini iç duvarda termal yalıtım uygulaması	89
Şekil 43. Ama Aerojel firmasının ürettiği Thermogel Paint ürünün uygulaması	90
Şekil 44. Aerojel bazlı tekstil duvar kağıdının uygulanması	91
Şekil 45. Deneysel çalışma 1 (sentezleme) akış şeması.....	94
Şekil 46. Deneysel çalışma 2 (uygulama) akış şeması.....	95
Şekil 47. Radyolarit numunesinin aşamaları a) kırıcıda küçük parçalar haline getirilen numune b) öğütücüde pudra haline getirilen numune.....	99
Şekil 48. Radyolaritin sodyum silikat çözeltisi hazırlama aşamaları a) manyetik karıştırıcıda karıştırma ve pH ayarlama işlemi b) süzgeç kağıdından süzme işlemi c) otoklavda NaOH ile reaksiyon işleminden sonra süzülüp elde edilen sodyum silikat çözeltisi	100
Şekil 49. Sodyum silikat çözeltisinin pH ayarlaması yapıldıktan sonraki hali	101

Şekil 50. Silika aeorjelin yaşlandırma aşaması	102
Şekil 51. Hidrofilik silika aeorjel	103
Şekil 52. Süpehidrofobik silika aeorjel sentez şeması	104
Şekil 53. Su emme oranı tayini için TDK, ADK, K ve R'den üretilen silika aeorjel tozları ile hazırlanan deney numuneleri	114
Şekil 54. XRF analiz cihazı.....	115
Şekil 55. XRD analiz cihazı	116
Şekil 56. ICP-OES cihazı.....	116
Şekil 57. FT-IR analiz cihazı	117
Şekil 58. BET analiz cihazı.....	118
Şekil 59. Temas açısı analiz cihazı	118
Şekil 60. FE-SEM analiz cihazı	119
Şekil 61. Eğilme dayanım cihazı.....	120
Şekil 62. Basınç dayanım cihazı	121
Şekil 63. Termal iletkenlik ölçüm cihazı	123
Şekil 64. Ticari döküm kumuna ait XRD diyagramı	127
Şekil 65. Atık döküm kumuna ait XRD diyagramı.....	128
Şekil 66. Radyolarite ait XRD diyagramı	128
Şekil 67. Kuvarsa ait XRD diyagramı	129
Şekil 68. Ticari döküm kumunda üretilen optimum silika aeorjel numunesine ait XRD diyagramı	130
Şekil 69. Atık döküm kumunda üretilen optimum silika aeorjel numunesine ait XRD diyagramı	131
Şekil 70. Radyolaritten üretilen optimum silika aeorjel numunesine ait XRD diyagramı	131
Şekil 71. Kuvarsdan üretilen optimum silika aeorjel numunesine ait XRD diyagramı	132
Şekil 72. TDK-pH-X numunelerinin yoğunluk grafiği.....	135
Şekil 73. ADK-pH-X numunelerinin yoğunluk grafiği	135
Şekil 74. R-pH-X numunelerinin yoğunluk grafiği	136
Şekil 75. K-pH-X numunelerinin yoğunluk grafiği	136
Şekil 76. TDK-pH-8 numunesine ait FT-IR analiz sonucu.....	138
Şekil 77. ADK-pH-8 numunesine ait FT-IR analiz sonucu	138
Şekil 78. R-pH-6 numunesine ait FT-IR analiz sonucu	139
Şekil 79. K-pH-6 numunesine ait FT-IR analiz sonucu.....	139
Şekil 80. TDK-pH-8 numunesinin yüzey modifikasyonu sonucu F-TIR spektrumu ...	141

Şekil 81. ADK-pH-8 numunesinin yüzey modifikasyonu sonucu F-TIR spektrumu...	142
Şekil 82. R-pH-6 numunesinin yüzey modifikasyonu sonucu F-TIR spektrumu.....	142
Şekil 83. K-pH-6 numunesinin yüzey modifikasyonu sonucu F-TIR spektrumu.....	143
Şekil 84. BET yüzey alanı değişim sonuçları	144
Şekil 85. TMCS ile yüzey modifikasyonu yapılmış olan süperhidrofobik silika aerojel numune üzerinde su damlacığının görüntüsü.....	146
Şekil 86. TMCS ile yüzey modifikasyonu yapılmış olan süperhidrofobik TDK silika aerojel numunesinin temas açısı ölçümü.....	147
Şekil 87. TMCS ile yüzey modifikasyonu yapılmış olan süperhidrofobik silika aerojelin temas açısı ölçümü	147
Şekil 88. TMCS ile yüzey modifikasyonu yapılmış olan süperhidrofobik silika aerojelin temas açısı ölçümü	147
Şekil 89. TMCS ile yüzey modifikasyonu yapılmış olan süperhidrofobik silika aerojelin temas açısı ölçümü	148
Şekil 90. Ticari döküm kumundan üretilen silika aerojele ait FE-SEM görüntüsü	150
Şekil 91. Atık Döküm kumundan üretilen silika aerojele ait FE-SEM görüntüsü.....	151
Şekil 92. Radyolaritten üretilen silika aerojele ait FE-SEM görüntüsü	152
Şekil 93. Kuvarsdan üretilen silika aerojele ait FE-SEM görüntüsü	153
Şekil 94. Radyolaritten üretilen alçı levha numunesi eğilme dayanım sonucu.....	154
Şekil 95. Atık Döküm Kumundan üretilen alçı levha numunesi eğilme dayanım sonucu	155
Şekil 96. Ticari Döküm Kumundan üretilen alçı levha numunesi eğilme dayanım sonucu	155
Şekil 97. Kuvarsdan üretilen alçı levha numunesi eğilme dayanım sonucu	156
Şekil 98. Radyolaritten üretilen alçı levha numunesi basınç dayanımı sonucu	158
Şekil 99. Atık Döküm Kumundan üretilen alçı levha numunesi basınç dayanımı sonucu	158
Şekil 100. Ticari Döküm Kumundan üretilen alçı levha numunesi basınç dayanımı sonucu	159
Şekil 101. Kuvarsdan üretilen alçı levha numunesi basınç dayanımı sonucu.....	159
Şekil 102. Deney numunelerinin termal iletkenlik katsayısı sonucu	161
Şekil 103. Deney numunelerinin su emme analizi sonucu	163

SİMGELER DİZİNİ

Simge	Açıklama
>	Büyüktür
g	Gram
V	Hacim
λ	Isıl İletkenlik Katsayısı
<	Küçüktür
m	Kütle
μm	Mikrometre
ml	Mililitre
mm	Milimetre
ppm	Milyonda bir
$^{\circ}\text{C}$	Santigrat Derece
U	Isıl Geçirgenlik Katsayısı
θ	Temas Açısı
p	Yoğunluk
%	Yüzde

KISALTMALAR DİZİNİ

Kısaltma	Açıklama
AR-GE	Araştırma Geliştirme
ADK	Atık Döküm Kumu
BET	Brunauer, Emmet ve Teller
CaSO ₄	Kalsiyum Sülfat (Alçı Taşı)
DMCS	Dimetilklorosilan
DMDC	Dime tildiklorosilan
FE-SEM	Alan Emisyonlu Taramalı Elektron Mikroskobu
FT-IR	Fourier Transform Infrared Spektroskopi CC
HCl	Hidroklorik Asit
HDTMS	Heksadesiltrimetoksisi
HF	Hidrojel Florür
HNO ₃	Nitrik Asit
HMDZ	Hekzamet ildisilazan
H ₂ SO ₄	Sülfirik Asit
ICP-OES	Inductively Coupled Plasma Atomic Emission Spectroscopy
K	Kuvars
MTMS	Metiltrimetoksisilan
NaOH	Sodyum Hidroksit (Kostik)
Na ₂ CO ₃	Sodyum Karbonat
NH ₄ OH	Amonyum Hidroksit
PMMA	Polimetilmetakrilat
R	Radyolarit
SA	Ağırlıkça Artma Miktarı
TEOS	Tetraetil Ortosilikat
TDK	Ticari Döküm Kumu
TMCS	Chlorotrimethylsilane
TMES	Trimetiletoksisilan
XRD	X-Ray Diffraction
XRF	X-Ray Fluorescence Spectrometer
yy	Yüzyıl

1. GİRİŞ

Malzeme, ihtiyaçlarımızı karşılamak ve belli bir amacı gerçekleştirmek için kullanılan her türlü maddedir. Tasarlanan yapının belirli bir amaca hizmet edebilmesinde en önemli unsur malzemedir. Çünkü mimarlığın temelini yapı malzemeleri oluşturmaktadır. Bu nedenle yapı malzemelerinin özelliklerinin iyi bilinmesi ve kullanım alanlarına göre doğru seçimin yapılması oldukça önemlidir. Mimarlık ve iç mimarlık alanında yapı malzemelerinin seçiminde, üretimi aşamasında az enerji harcanan, çevreyle uyumlu ve insan sağlığına zarar vermeyen malzemeleri tercih etmek önemlidir. Bu özelliklere sahip alçı levha yapı malzemeleri etraflıca incelendiğinde inorganik yapısı ile bina biyolojisine uygun, doğal ve çevre dostu malzemeler arasında yer aldığı bilinmektedir. Geleneksel yapı malzemeleri olan alçı levhalar mimari yapıların iç ve dış cephelerinde sıklıkla kullanılan yapı malzemeleridir. İç ve dış duvar yüzeylerinde, asma tavanlarda, taşıyıcı olmayan bölme duvarlarda, giriş ve kolonlarda kaplama malzemesi olarak kullanılmaktadır. Ayrıca alçı levha malzemeleri uygulama kolaylığı ve uygulama süresinin kısa olması nedenleri ile mimarlar tarafından yapı üretiminde tercih edilen yapı malzemelerinin başında gelmektedir.

21. yy ile teknolojiye meydana gelen hızlı gelişme ve değişimler karşısında, mimarlık uygulamalarında malzeme ve üretim teknolojilerinin önemi giderek artmakta, bu durum yeni ve gelişmiş malzemeleri beraberinde getirmektedir. Malzeme bilimindeki bu ilerleyiş geleneksel yapı malzemelerinin fiziksel, kimyasal ve mekanik özelliklerini değiştirerek iyileştirilmesine ve üstün özelliklere sahip yeni yapı malzemelerinin geliştirilmesine neden olmaktadır. Teknoloji ile birlikte malzeme biliminin gelişmesi mimarlık ve iç mimarlık alanında tasarımlara uygun seçilen malzemelerin özelliklerinin gelişebilir olmasına olanak sağlamaktadır. Böylece teknolojik yapı malzemeleri, mimarlık alanında özgün ve yeni bir boyut kazanmıştır. Bu değişim sürecinde, malzeme seçiminin, tasarım sürecinin ilk aşamasından sonuna kadar bütün aşamalarda belirleyici olduğu gözlenmektedir. Bununla birlikte teknolojik gelişim yapılarında disiplinler arası çalışmalara yön vermiş, malzemelerin kullanılabilirliği ve içeriği analiz edilmeye başlanmıştır.

Öte yandan, günümüz itibariyle geline nokta küresel ısınmaya ilişkin artan endişe, doğal kaynakların hızla tüketilmesi ve kullanılan enerji kaynaklarının giderek azalması

ile yapılardaki ısıyı koruma düşüncesi enerji kaynaklarını daha etkin ve verimli kullanmayı gerektirmektedir. Mimari yapılarda enerji verimliliğini sağlamak amacıyla önlemler alınmış, binalarda ısı yalıtım uygulamaları hız kazanmıştır. Yapılarda ısı yalıtım uygulamaları binalara ek yük ve ek bir maliyet oluşturmakla birlikte ayrıca yalıtım uygulamaları için ek bir işçilik ve ek bir süreye ihtiyaç duyulması demektir. Bu nedenle, yapılarda klasik ısı yalıtımı uygulamaları yerine termal yalıtım düzeyi yüksek yeni nesil malzemelerin kullanılması binalarda enerji verimliliğinin sağlanması açısından daha ekonomik bir çözüm sunmaktadır. Bu amaçla mimari yapılarda enerji verimliliği sağlayan, bina yalıtım seviyelerini iyileştirmeyi kolaylaştıran yenilikçi yapı malzemelerinin kullanımı önem kazanmaktadır.

Son yıllarda araştırmacılar üstün yalıtım özelliği ve enerji verimliliği sağlama konusunda ilk sırada yer alan yüksek gözeneklilik, düşük yoğunluk gibi üstün özelliklere sahip ileri teknoloji ürünü olan silika aerojel malzemeler üzerine yoğunlaşmışlardır. Termal iletkenlik katsayısı oldukça düşük olan silika aerojel malzemeler, ilave edildikleri yapı malzemelerinin termal yalıtkanlık kabiliyetini arttırmaktadır. Bu nedenle yenilikçi yalıtım malzemesi olarak mimari yapılarda silika arojellerin kullanımları yeni bir yaklaşım getirmektedir. Geleneksel yapı malzemelerine alternatif olarak geliştirilen bu yenilikçi ve üstün özellikli yapı malzemeleri mimari tasarım sürecinde olduğu gibi yapının inşasında da belirleyici rol almaktadır. Aynı zamanda yenilikçi malzemelerin bina tasarımlarımda kullanılması yapıda hafiflik, enerji korunumu, ısı konfor, mekanik dayanım, küf ve nem karşı koruma, su yalıtımı ve yangın dayanımı gibi etkenler üzerinde olumlu değişimler göstermektedir. Bütün bu özellikler yenilikçi ve geleneksel yapı malzemelerinin bir arada tasarlanarak oluşturdukları yeni nesil yüksek performanslı malzemeye yeni ve farklı bir boyut kazandırmaktadır.

Tez çalışmasında teknolojik bir ürün olan silika aerojel sentezi gerçekleştirilerek, elde edilen toz ürünlerle silika aerojel katkılı yeni nesil bir alçı levha üretimi hedeflenmiştir. Geleneksel yapı malzemeleri ile çözülemeyen enerji, performans, verimlilik, çevre, sürdürülebilirlik gibi birçok sorun teknoloji ile geliştirilerek üretilen malzemeye istenilen fonksiyon verilebilmesiyle çözülmeye çalışılmış ve böylelikle malzemenin iyileştirilmesi (fiziksel ve mekanik özellikleri) ile malzemenin elde edilen verimlilik düzeyi artırılması hedeflenmiştir.

1.1. Tez Projesinin Amacı

Tezin amacı dünya genelinde büyük öneme sahip ileri teknoloji ürünü olan silika arojel malzemesinin saf silika kaynağı kullanılarak ve silisyum içeriği yüksek olan atıklardan silisyum çözeltisi elde edilerek farklı parametrelerle üretiminin gerçekleştirilmesi, optimum üretim koşullarının tespit edilmesi ve üretim parametrelerinin hidrofobisite ve yoğunluk üzerindeki etkilerinin incelenmesidir.

Tez çalışmasının diğer bir amacı ise elde edilen optimum yoğunluğa sahip silika arojel malzemelerinin düşük katkı oranlarında yalıtım amaçlı kullanılacak olan mimari yapı malzemesi olan alçı levha yapı malzemelerinin üretiminde değerlendirmesidir. Ayrıca elde edilen ürünün malzeme karakterizasyonunun ötesinde fiziksel özelliklerin (Isı iletkenlik katsayısı, su emme analizi) yanı sıra mekanik özelliklerinin (eğilme ve basınç dayanımı) tespit edilmesi amaçlanmıştır.

1.2. Tez Çalışmasının Kapsamı

Yapılan bu tez çalışması, geleneksel yapı malzemelerinin zayıf yönleri tespit edilerek, son zamanlarda alternatif ve gelişmiş malzemeler arasında üstün özellikleri ile ön plana çıkan silika arojel malzemesi ve mimari yapı malzemesi uygulamaları açısından ele alınmıştır.

Günümüzün bilimsel ve teknolojik gelişmeleri doğrudan mimariyi etkilemektedir. Özellikle malzeme bilimindeki gelişmeler, mimariyi yakından ilgilendirmektedir. Bu açıdan ele alındığında, yeni nesil ve ileri teknoloji ürün odaklı çalışmalar ve uygulamalar gün geçtikçe kendisini göstermektedir. Nitekim silika arojel malzemeler üstün özellikleri sayesinde son zamanlarda giderek uygulamalarda yer bulan ve tercih edilen malzemelerden bir tanesi olarak gösterilmektedir.

Literatür çalışmaları ve uygulama bakımından bir inceleme yapıldığında, daha önce yalıtım amaçlı üretilen sıva, çimento gibi malzemelerle silika arojel birleştirilerek nihai ürün elde edildiği karşımıza çıkmaktadır. Ancak yüksek ısı yalıtımına sahip silika arojel bazlı alçı levha üretimi gerçekleştirilmemiştir. Bu kapsamda farklı başlangıç malzemeleri kullanılarak silika arojel sentezi, karakterizasyonu ve malzeme mimari uygulama kapsamında alçı levha üretimi ve sonrası fiziksel-mekanik özellikleri ele alınmıştır. Ayrıca literatürde yer alan çalışmalarda daha önce yüksek katkı oranlarında

silika aerojel esaslı yapı malzemeleri üretimi gerçekleştirildiği bilinmektedir fakat düşük katkı oranlarında silika aerojel katkılı yapı malzemesi üretimine odaklanılmamıştır. Bu nedenle tez çalışmasının odak noktası düşük katkı (%0, %0.5, %1, %2, %5) oranlarında silika aerojel takviyesi ile alçı levha üretimi ve sonrasında termal iletkenlik, su emme ve mekanik özellikleri üzerindeki etkisi analiz edilmiştir.

Sonuç olarak literatür çalışmaları doğrultusunda yapılan tez çalışmasında; farklı başlangıç, atık malzemelerinin de ele alınması ve bu malzemelerin geri dönüşüm/kazanım noktasında nihai ürün olarak değerlendirilmesi bakımından oldukça önemlidir. Atık malzemelerin atık olarak bertaraf edilmesi yerine çevre dostu yöntemlerle ekonomik değeri olan faydalı ürünlere dönüştürülmesi hem çevreye hem de üretim ekonomisine önemli oranda katkı sağlayacağı öngörülmektedir. Ayrıca diğer bir husus ise, tez çalışmasının gerçekleştirildiği konum itibarı ile (Konya ve çevresi), bu bölgeden temin edilen hammaddelerin uygulamada değer bulması noktasında önemli bir nitelik ortaya koymaktadır.

1.3. Tez Projesinin Yöntemi

Bu bölümde, tezin amaçları ve önemi doğrultusunda literatüre bağlı olarak oluşturulan yöntem önerilmiştir.

Bu tez çalışmasında deneysel çalışmalar 4 aşamada ele alınmıştır. Bu aşamalar sırasıyla; başlangıç malzemelerinin temini ve karakterizasyonu, silika aerojel sentezi, nihai ürün karakterizasyonu, mimari yapılardaki uygulaması fiziksel ve mekanik özelliklerinin incelenmesinden oluşmaktadır.

Bu kapsamda çalışmanın yöntemi aşağıdaki işlem basamakları sırası ile verilmiştir.

1. Aşama: Başlangıç Malzeme Temini

Deneysel çalışmalarda, silika kaynağı olarak 4 farklı kaynak kullanılmıştır.

Bu kaynakların seçildiği bölgeler aşağıda verilmektedir:

1. Konya'nın Güneysınırı ilçesindeki %99.80 silisyum içerikli kuvars taşı
2. Konya'nın Beyşehir ilçesindeki Üstünler bölgesindeki %94.50 silisyum içerikli radyolarit numunesi

3. Seydişehir Eti Alüminyum Tesislerinin dökümanesinde kullanılan %97.80 silisyum içerikli ticari döküm kumu

4. Seydişehir Eti Alüminyum Tesislerinin döküm sonrası atık olarak çıkan %70.40 silisyum içerikli atık döküm kumu

2. Aşama: Silika Aerojel Sentezi

Farklı silika içerikli başlangıç malzemelerinin karakterizasyonu ve analizine yönelik olarak çalışmalar gerçekleştirilmiştir.

Başlangıç malzemeleri ile ilgili gerekli hazırlıklar tamamlandıktan sonra çalışmanın ana çıkış noktalarından bir tanesi olan sol-jel yöntemi odaklı sentezleme çalışmaları (silika aerojel üretimi) yapılmıştır.

Bu yöntem kapsamında deney numunelerinin sentezi için sırasıyla;

1. Silis kumunun saflaştırılması
2. Sodyum silikat sentezi
3. Çözelti hazırlama işlemi
4. Yaşlandırma işlemi
5. Kurutma işlemi
6. Nihai ürün eldesi

olarak süreç odaklı silika aerojel sentezinin yapılmıştır. Daha sonra hidrofilik yapıda olan silika aerوجلeri yüzey modifikasyonu işlemi uygulanarak süperhidrofobik silika aerojel sentezi gerçekleştirilmiştir.

3. Aşama: Sentezlenen süperhidrofobik silika aerوجلun karakterizasyonu

Sol-jel yöntemi ile farklı başlangıç silika içeriği kullanılarak üretilen silika aerوجلun deneysel çalışmalar kapsamında uygunluğu, sentezleme çalışmalarının optimizasyonu ve devamındaki uygulama alanına yönelik olarak kullanımı bakımından aşağıdaki malzeme karakterizasyonuna yönelik olarak çalışmalar yapılmıştır.

- Başlangıç malzemelerinin elementel ve kimyasal bileşenlerini belirlemek için XRF analizi
- Başlangıç malzemelerinin yapısal özelliklerini belirlemek için XRD analizi

- Başlangıç malzeleriden elde edilen sıvı sodyum silikatçözeltisinin elementlerini belirlemek için ICP-OES analizi
- Sentezlenen silika aerogelin yoğunluk analizi
- Sentezlenen silika aerogelin XRD analizi
- Sentezlenen silika aerogelin bağ yapısının belirlenmesi için FT-IR analizi
- Sentezlenen silika aerogelin BET analizi
- Sentezlenen silika aerogellerin Temas Açısı Ölçümleri
- Sentezlenen silika aerogelin, FE-SEM görüntülerinin incelenmesi

4.Aşama: Nihai ürün karakterizasyonu, mimari yapılardaki uygulaması fiziksel ve mekanik özelliklerinin incelenmesi

Mimari yapılarda uygulama ile birlikte fiziksel ve mekanik özelliklerin tayini sol-jel yöntemi kullanılarak sentezleme çalışmalarını sonrası uygulanan malzeme karakterizasyonu çalışmalarının akabinde mimari yapı elemanı olarak performans özelliklerinin iyileştirilmesi gerçekleştirilmiştir.

Bu amaç için; silika aerogel içerikli alçı levha üretimi odaklı mimari yapı uygulamaları kapsamında deney numuneleri üretilmiştir.

Bu mimari yapı elemanın üretiminde sentezlenen silika aerogelin farklı takviye oranları içeriğinde hazırlanmıştır. Nihai yapı elemanın optimum parametre ve oranlar neticesinde üretilmesi sonrası sırasıyla; ısı iletkenlik katsayısı ve su emme gibi fiziksel özelliklerin tespit edilmesine yönelik çalışmalar yürütülmüştür. Malzeme fiziksel özelliklerinin yanı sıra yapı elemanı üzerinde farklılık oluşturması açısından eğilme dayanımı ve basınç dayanımının belirlenmesi açısından standart deney numuneleri hazırlanarak mekanik özelliklerin elde edilmesine yönelik çalışmalar gerçekleştirilmiştir.

2. KAVRAMSAL ÇERÇEVE

Teknolojinin ilerlemesiyle malzeme bilimi gelişmekte yeni, nitelikli malzemeler mimarlık alanında olduğu gibi pek çok alanda kendine yer edinmektedir. Yeni bir teknoloji ürünü olan silika aerojel malzemeler eşsiz özellikleri ile mimarlık alanında pek çok uygulamada kullanılmaktadır. Mimari yapılara termal yalıtım, akustik yalıtım, su (nem) yalıtımı, yangın dayanımı ve optik geçirgenlik gibi muhteşem avantajlar sağlayan silika aerojel malzemeler aynı zamanda geleneksel malzemelere kıyasla yapılarda önemli miktarda enerji tasarrufu sağlamaktadır. Geleneksel bir yapı malzemesi olan alçıdan üretilmiş alçı levha yapı malzemeleri; kullanım kolaylığı sağlaması, çevre dostu olması, üretiminde az enerji harcanması gibi pek çok özelliğinden dolayı mimarlıkta çok tercih edilen yapı malzemeleri arasında yer almaktadır. Alçı levhanın gelişen teknoloji ile en başarılı yorumu silika aerojel katkılı yapı malzemeleridir. Bu bağlamda mimari yapılarda kullanılan silika aerojel katkılı alçı levha yapı malzemesinin fiziksel ve mekanik performanslarının irdelenmesi mimarlık ve malzeme biliminde güncel bir konudur.

Tez çalışmasının bu bölümünde alçının tanımı ve tarihçesi, alçının özellikleri, alçının üretimi, alçı levhanın tanımı ve tarihçesi, alçı levhanın özellikleri, alçı levha üretimi ve kullanım alanları irdelenecektir. Daha sonra yeni teknoloji ürünü olan silika arojellerin tanımı, silika arojellerin ortaya çıkışı, silika arojellerin özellikleri, silika arojellerin sentezinde kullanılan sol-jel yöntemi ve üretim basamakları, silika arojellerin kullanım alanları, silika arojellerin mimarlık alanında yeri, önemi ve kullanımı hakkında detaylı olarak bilgi verilecektir.

2.1. Malzemenin Mimarlıkta Yeri ve Önemi

Mimari yapılarda kullanılan malzeme, binaların tasarımından yapımına kadar her alanda en temel unsur olmuştur. Mimari yapılarda malzemelerin iyi tanınması için, teknolojik ve ekonomik gelişmeler doğrultusunda gelişim ve değişim gösteren mimari yapı ürünlerinin tasarıma ve uygulamaya katkısı iyi irdelenmelidir. Mimari ürünlerin tanınması, doğru alanda doğru malzemenin seçimi ve kullanılması büyük önem arz etmektedir. Bu nedenle mimarlık ve malzeme bilimi arasındaki bu sıkı ilişkiyi anlamak malzeme seçimlerinde doğru kararları vermek dikkat edilmesi gereken hususlar arasında

yer almaktadır. Mimari yapılarda kullanılan malzemenin özellikleri ve süreçleri binaları şekillendiren ve performanslarını etkileyen en temel unsurlar arasında yer almaktadır (Dal, 2022). Bu bağlamda 21 yy. da gelişen bilim ve teknoloji ile birlikte yapı malzemelerindeki çeşitlilikler her geçen gün artmakla birlikte buna paralel olarak mimari yapılarda da çeşitlilikler artış göstermektedir. Farklı malzemeler, farklı tasarım arayışlarının oluşmasına neden olmuştur. Endüstri dönemine kadar malzeme çeşitlilikleri ve biçimleri birbirine benzerken, bu dönemden sonra malzemeler farklılaşmaya başlamış yeni malzemelerin üretimi artmıştır. 21. yy. da ki teknolojik gelişmeler ile mimaride sınırların kalktığı ve mimari üslupların kabuk değiştirdiği gözlemlenmiştir. Mimarlıkta yapı malzemesi konusundaki araştırmalar doğrultusunda istenilen özellikte malzemelerin üretilebileceği, tasarımda estetiksel unsurun yanında birçok işlevi de yerine getirebilen yetenekte malzemelerin olabileceği, alışılmışın dışında yeni bir mimarlık anlayışını da beraberinde getirmektedir. Bu ilerlemeler birçok farklı disiplinin bir arada çalışmasına olanak sağlamış malzeme bilimini farklı bir boyuta taşımıştır (Çakmak, 2021). Malzeme biliminin rolü mimari tasarımcılar, yapı mühendisleri ve diğer yapı uzmanları tarafından belirlenen ihtiyaçlara göre tanımlanan sorunlara cevap vererek, bu hususlara yönelik yeni ve alternatif malzeme çözümleri aramaktır. Teknolojik gelişmelerin ışığında ilerlemeler sağlayan malzeme biliminde görev alan malzeme bilimcilerinin uzmanlıklarının artmasıyla birlikte bugün malzemeyi neredeyse tüm performans gereksinimlerine uyacak şekilde tasarlama yapabilmeye becerisine ulaştıkları görülmektedir (Bechthold & Weaver, 2017). Bu doğrultuda gelecekte de malzeme konusunda araştırmaların giderek hızlı bir şekilde artacağı ve yeni malzemelerin üretilebileceği öngörülmektedir.

Bakır (2006) malzemelerin gelişiminin iki aşamada gerçekleştiğinden bahsetmektedir. İlki var olan malzemenin geliştirilmesi, ikincisi ise yeni malzemenin üretimidir. Malzemenin bilinen özelliklerinin birinin veya daha fazlasının değiştirilmesi o malzemeyi yeni malzeme olarak nitelendirebilmemizi sağlamaktadır. Malzemenin geliştirilmesine verilecek en önemli örnek mimarlık alanında yaygın olarak kullanılan alçı malzemesidir. Alçı, başlarda tek başına kullanılırken daha sonrasında geliştirilerek alçı levha halini almış ve mimari yapılarda günümüze kadar geliştirilerek gelmiştir. Alçı levhanın yeni teknolojilerle geliştirilmesi birçok avantajından dolayı yapılarda çok kullanılan malzeme olmasını sağlamaktadır. İleri teknoloji ile üretilen toz malzemelerin

alçı levhanın yapısına dahil edilmesi istenilen özelliklerde yeni bir malzeme olarak üretilebilmesini mümkün kılmaktadır. Bu sayede malzemenin fiziksel, mekanik özellikleri olumlu yönde geliştirilerek, malzemeye farklı bir boyut kazandırılması geleneksel alçı levha malzemesinden farklı yenilikçi bir malzemenin üretilmesine olanak sağlamaktadır. Teknolojinin gelişmesi geleneksel malzemenin birçok değişime uğradığını buna paralel olarak geleneksel bazı malzemelere ilginin artması sonucunu ortaya koyduğunu ve bu durumun mimarlıkta yeni bir akımın ortaya çıkmasına neden olabileceği düşünülmektedir.

2.2. Alçı

İnsanlığın doğumundan bugüne kadar hayatlarının devamlılığını sağlamak adına yeme içmenin yanında barınma da en önemli ihtiyaç olmuştur. İkel barınma yöntemleri ile başlayan bu süreç günümüzde teknolojinin gelişmesi ile birçok yapı malzemesini daha kullanışlı ve verimli hale getirmiştir (Şansal ve Üce, 2019). Geçmişte ve günümüzde mimarlık alanında en çok kullanılan yapı malzemesinden biri de hiç kuskusuz alçıdır.

Alçı taşının 160-200 °C sıcaklıkta pişirilip öğütülmesiyle elde edilen malzemenin su ile karıştırıldıktan sonra yoğunlaşarak katılaşması sonucunda oluşan maddeye alçı denilmektedir. Alçıtaşı kimyasal bileşimi kalsiyum sülfat (CaSO_4) olan beyaz veya gri renkli doğal bir mineraldir. Kimyasal bileşiminde 2 molekül su bulunan alçı taşı türüne jips ($\text{CaSO}_4 + 2\text{H}_2\text{O}$) denilmektedir. Alçı taşı doğada 6 farklı şekillerde bulunmaktadır. Bunlar; anhidrit, jips, ipek jipsi, bassanit, albatr, ve selenittir. Bununla birlikte alçı üretiminde kullanılan anhidrit taşı doğada susuz kalsiyum sülfat (CaSO_4) adıyla bilinmektedir (Gürdal, 2010). Ayrıca ülkemizde üretilen yapı alçıların özellikleri ve deney yöntemleri TS EN 13279-1,2 standartlarında detaylı olarak verilmektedir (Güldal ve Acun, 2003).

Alçının günümüze kadar gelmesi ve en çok tercih edilen yapı malzemesi olmasındaki en büyük neden alçının diğer yapı malzemelerine oranla üretiminde daha az enerji gerektirmesi, beklenen dayanıma kısa sürede ulaşması, priz sonrasında büzülme ve kılcal çatlama yapmaması, işçiliğinin kolay olması ve pürüzsüz düz yüzeyler elde edilebilmesinin yanında mimarlık alanında birçok yerde kullanılabilir olması yapı malzemesi olarak alçıyı ön plana çıkarmaktadır (Turan ve Kılıçkaya, 2016).

2.2.1. Alçının Tarihçesi

Alçının bağlayıcı malzeme olarak ilk kullanımını en az 4000 yıl önceye Mısırlılara kadar dayanmaktadır. Mısır piramitleri ve mezarlarında duvar sıvası ve derz harcı olarak alçı malzemesinin kullanım örneklerine rastlanmıştır. 3000 yıl önce Yunanistan'da ve daha sonra Romalılar tarafından kullanılmıştır (Ngu, 2004). Sonraki yıllarda alçı malzemesi Asya uygarlıklarında ve orta doğuda harç ve dekoratif malzeme olarak, Orta çağ Avrupa'sında tuğla ve taş örgüsünde harç malzemesi olarak, Orta çağ sonu Anadolu ve İran yapılarında taş ve kerpiç mimarisinde kireç ile birlikte kullanılmıştır. İngiltere'nin 16. yy dönemine ait yapılarının döşemelerinden alınan örneklerin alçı malzemesine ait olduğu araştırmacı Lavoisier tarafından ilk olarak analiz edilmiş ve bu bilgi daha sonra rapor haline getirilmiştir. Karl Rabitz tarafından 1887'de ilk kez agregalı dökme alçı, yani alçı betonu duvarlar ve tavanlarda kullanmış daha sonra bu uygulama 20. yy başına kadar devam etmiştir. Alçı üzerine yapılan araştırmalar doğrultusunda 1919'da A.B.D. de yayınlanan bir çalışmada döküm alçının döşemelerde ve çatı kaplaması olarak kullanıldığı bilgisi verilmiştir. Bu uygulama günümüzde kullanılmaya devam eden uygulamalar arasında yer almaktadır. Bir başka araştırmada, Avustralya'da armatürlü hazır alçı paneller ile taşıyıcı dış duvarların inşa edildiği bilinmektedir (Güldal ve Acun, 2003).

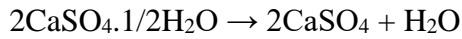
Alçının tarihte Selçuklular döneminde kullanılmaya başlandığı bilinmektedir. Yapılan araştırmalar sonucunda Konya/Akşehir'de alçı kullanılan eserlere rastlanılmıştır. Bu bilgi alçının uzun yıllar önce kullanıldığına dair kanıt oluşturmuştur. Bir başka çalışmada Erzurum'da 200 yıl önce yapılmış mimari yapılarda alçı sıva kullanıldığına dair bulgulara da rastlanılmıştır (Eriç, 1978).

Ülkemizde alçı ile ilgili uygulamalar 1970'li yıllarda başlamıştır. Amerikalı proje danışmanlarının turistik yapılara ait uygulamalarda lobi, balo salonu, toplantı salonunun duvarlarında ve tavanlarında tasarlanan gösterişli bezemelerin ve görkemli aydınlatmaların bulunduğu iç mekanlar da yangın güvenliği nedeniyle alçı yapı malzemesinin kullanımının zorunlu hale getirilmesiyle alçı yaygın hale gelmiştir (Güldal ve Acun, 2003).

2.2.2. Alçı Üretimi

Kimyasal bileşeni $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ olan alçı taşının kırıcılarla parçalanarak öğütücülerle toz haline getirildikten sonra döner fırın, kazan veya otoklavda yüksek basınç altında ve $180\text{-}200^\circ\text{C}$ sıcaklık aralığında kalsine edilerek bünyesindeki suyun ısı ile uzaklaştırılması sonucu elde edilmektedir. Kalsinasyon reaksiyonu endotermik bir ayrışma reaksiyonudur (Ngu, 2004).

Alçı taşında bulunan 2 molekül kimyasal suyun bünyesinden uzaklaştırılması 2 basamakta gerçekleştirilmektedir. Meydana gelen bu reaksiyona dehidratasyon reaksiyonu denilmektedir. İlk basamak sonucunda oluşan mamüle yarımhidrat (alçının hammaddesi), ikinci basamak sonucunda oluşan ürüne ise anhidrit denmektedir. Yarımhidrat ve anhidrit oluşması için gerçekleşen reaksiyon aşağıda sırasıyla verilmektedir.



Dehidratasyon sonucu oluşan yarımhidrat mamülün α ve β olmak üzere iki farklı çeşidi vardır. α yarımhidrat (iğne yapılı kristaller) ve β yarımhidrat alçı (pirinç tanelerine benzer kristaller) kimyasal yapı bakımından aynı formüle sahip fakat kristal yapı bakımından farklılık gösteren iki üründür. Bununla birlikte, α yarımhidratın mekanik özellikleri ve performansı (basınç, çekme, aşınma dayanımı) β yarımhidrata kıyasla çok daha gelişmiştir. Ayrıca, β yarımhidrat uzun katılma süresine, düşük yoğunluğa, yüksek hidratasyon ve yüzey enerjisine sahiptir. Su isteme özellikleri kıyaslandığında α yarımhidrat, β yarımhidrata göre çok daha az suya ihtiyaç duyduğu bilinmektedir (Koçak, 2010). Ayrıca α yarımhidrat kristal yapısının daha düzgün olması su ile çok daha iyi işleme özelliğine sahip olduğunu göstermektedir (Koçak, 2010).

Alçı üretim prosesinde alçı taşından çıkarılan suyun tekrar geri verilmesine katılma (priz) denir. Le Chatelier alçı konusunda ilk bilimsel araştırmaları yapan kişidir. Le Chatelier alçının katılmasını meydana gelen üç aşama ile açıklamaktadır:

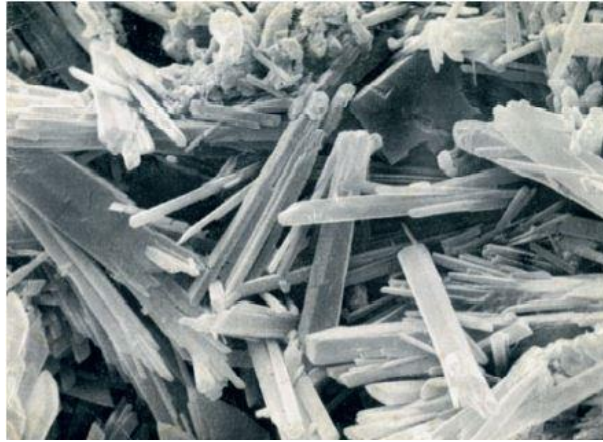
1. Hidratasyon (Kimyasal reaksiyon)
2. Kristalleşme (Fiziksel olay),

3. Katılma (Mekanik olay)

Alçı (yarım hidrat) su ile karışınca bünyesine tekrar su alır çözülmeye başlayarak katılır, meydana gelen bu reaksiyona hidratasyon denmektedir. Hidratasyonun kimyasal formülü aşağıda verilmektedir (Gürdal, 2010; Koçak, 2010).



Kalsiyum sülfat yani alçı taşının ve anhidritlerin düşük sıcaklıkta suda çözünme oranları yarım hidratlardan daha azdır. Bu durum kimya biliminde olan genel bir kuraldır. Düşük sıcaklıkta suda çözünme oranları diğerlerine göre fazla olan yarım hidratın suda çözünme oranları sıcaklık yükseldikçe azalmaya başlamaktadır. Öyle ki 90°C'den sonra alçı katılmaz yani priz olayı gerçekleşmez. Kalsiyum sülfatın yarım hidrat ürününün suda çözünmesi ile birlikte, suya Ca^{+2} ve SO_4^{-2} iyonlarını vermektedir. Daha sonra zaten hidratlaşma isteğinde olan bu iyonlar diğer ürünlere oranla (yarım hidrat ve çift hidrat) daha yüksek çözünme derecesi ile çözelti oluşturmaktadır. Prosesin devamında $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ çöker, bu olay yarım hidrat miktarı bitene kadar devam etmektedir. Çöken maddeler Şekil 1'de verilen kristallerdir. Alçının su ile karıştırılınca katılmaya başlamasındaki zamana priz başlangıcı denilmektedir. Katılan alçının fiziksel özellikleri bünyesindeki su/alçı oranı ile ilişkilendirilmektedir. %50 su/alçı oranından daha az su ile karıştırılırsa elde edilen alçı karışımının kıvamı koyu olur, %100'den daha fazla su ile karıştırılırsa karışım sulu olur ve katılma gerçekleşmez. Bu nedenle alçının katılma zamanı ve su/alçı oranları ideal malzemeyi elde etmek açısından büyük önem teşkil etmektedir (Gürdal, 1976; Gürdal, 2010).



Şekil 1. Çöken jips kristalleri

Kaynak: Gürdal (2010).

Doğada alçı taşı farklı kristal yapıda bulunmaktadır. Bu farklılık alçı üretimi esnasında alçı taşının farklı sıcaklıklarda ayrışması sonucu oluşmaktadır. Ayrıca alçı ürünün içerisindeki farklı maddelerin olması, üretim prosesinde ortam koşullarının etkisi, kızdırma şekli ve kızdırma süresi gibi birçok etkenin önemli olduğu bilinmektedir. Tablo 1’de verilen grafiğe göre alçı taşının farklı sıcaklıklarda ayrışmaya uğraması sonucu elde edilen farklı ürünler formülleri ile verilmektedir (Gürdal, 2010).

Tablo 1. Alçı taşının ayrışma sıcaklığı ile edilen ürünler

1. $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (120 °C-160 °C) → $\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$ (α ve β yarım hidrat alçı)
2. $\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$ (190° C-220° C) → $\text{CaSO}_4 \cdot \epsilon\text{H}_2\text{O}$ veya CaSO_4 III (Çözünür hegzagonal anhidrit)
3. $\text{CaSO}_4 \cdot \epsilon\text{H}_2\text{O}$ (250 °C-500 °C) → CaSO_4 II (Anhidrit II, hızlandırıcı ile sıva alçısı)
3.1. $\text{CaSO}_4 \cdot \epsilon\text{H}_2\text{O}$ (300 °C) → CaSO_4 II S (Az çözünür, priz yapmaz, hızlandırıcı ile priz yapar)
3.2. CaSO_4 II S (500 °°°) → CaSO_4 II U (Suda çözünmez, priz yapmaz, anhidrit II)
4. CaSO_4 II U (1000 °C) → CaSO_4 II
5. CaSO_4 I (1450 °C) → $\text{CaO} + \text{SO}_3$ (Ayrışma)

Kaynak: Gürdal (2010).

2.2.3. Alçının Özellikleri ve Kullanım Alanları

Geleneksel yapı malzemesi olan alçının başlıca özellikleri; hafiflik, ısı yalıtımı, yanmazlık, işleme ve onarım kolaylığı, yüzeye nefes aldırma, bakteri üretmemektir. Alçı malzemesi nem düzenleyici özelliğe sahiptir. Su buharının yapı elemanlarının dış yüzeyine temas etmesiyle soğur ve yoğunlaşır. Böylece yapı elemanlarının yüzeyinin ıslanmasına ve çiçeklenmesine sebep olur. Alçının gözenekli yapısı ortamda bulunan nemi ve kondenzasyon suyunu emerek iç mekanda bağıl nemin azalmasını sağlar ve yoğunlaşmayı engeller. Ayrıca alçı malzemesi iç mekanda nem dengesi azaldığında kendi içindeki nemi ortama verir ve ortamın nem yetersizliğinde nemli kalmasını sağlayarak iç mekan konfor koşullarını iyileştirilmesine yardımcı olmaktadır. Alçı malzemesinin gözenekli yapıya sahip olması diğer doğal yapı malzemelerine kıyasla daha iyi termal

yalıtım sağlamasına katkı sağlamaktadır. Yani malzemenin termal iletkenlik değeri daha düşüktür. Alçının termal iletkenlik değeri alçı hamurunun birim hacim ağırlığına (alçı/su) bağlı olarak farklılık göstermektedir. Alçı malzemenin bir diğer özelliği yangın dayanımına sahip olmasıdır. Alçının kimyasal yapısında bulunan su ile gözenekli yapısında yer alan nem sayesinde su yangın sırasında buharlaşmaktadır. Böylelikle buharlaşma süresinde alçının dış yüzeyindeki sıcaklık 140 °C üzerine çıkamaz. Alçının yangına dayanıklılık özelliği sayesinde tüm dünyada mimari yapılarda kullanımı yaygınlaşmıştır. Alçı malzemesinin boşluklu yapıya sahip olması kullanıldığı iç mekanda akustik konfor sağlamaktadır. Bu konuda yapılan araştırmalar incelendiğinde, alçı malzemesi kullanılarak tasarlanan bir duvara 700 Hz'lik bir ses gönderildiğinde, duvarın bu sesi %50'ye kadar yuttuğu ölçülmüştür. Yine bir başka araştırmada alçı malzemesin içine farklı lifli malzemeler takviye edilerek yapılan bir duvarda sesi %90 oranında kadar yuttuğu da tespit edilmiştir (Eriç, 1978).

Alçı malzemesi mimarlıkta geniş uygulama alanları bulması ile birçok farklı alanda da kullanılabilir. Alçı, doğru uygulamalar ile uygulandığında yüzyıllarca bozulmadan günümüze kadar gelebilen bir malzemedir. Ayrıca yapı malzemelerinden kerpiç esaslı malzemelere ve çimentoya kıyasla çok daha ekonomik olduğu bilinmektedir. Öte yandan alçı malzemesi doğadan kolayca çıkarılır, üretimi sırasında az enerji harcanır, insan sağlığı açısından zararlı maddeler içermez ve binalarda ısı kaybını azalmasını sağlayan etkiye sahiptir (Gürdal, 1976).

Alçının diğer yapı malzemelerine göre sahip olduğu üstün özellikler aşağıda verilmektedir:

- ✓ Alçı malzemesinin ve alçıdan elde edilmiş yapı malzemesinin bakımı, uygulaması kolay ve ucuzdur.
- ✓ Alçıdan üretilmiş hazır yapı elemanları (duvar ve tavan için) önceden hazırlanıp depo edilebilmektedir.
- ✓ Alçı malzemesinin üretiminde karmaşık teknoloji ve büyük yatırım gerektirmez.
- ✓ Alçı üretim standartlarına uygun malzemenin kolayca üretimi sağlanabilmektedir.
- ✓ Alçı malzemesi üretiminde olabildiğince az enerjiye ihtiyaç duyulur ve çevre kirliliği oluşturmaz.

- ✓ Alçı malzemesinin uygulaması kolaydır. Bu özellik sayesinde uygulama sırasında esneklik sağlar. Ayrıca uygulamada işçilik masrafı azdır. Şantiyeye kolayca taşınabilir ve taşıma sırasında meydana gelen herhangi bir malzemedeki tahribat kolayca giderilebilir.
- ✓ Alçı malzemeleri hafif malzemelerdir. Hafif malzemeler bina yükünün az olmasını sağlamaktadır. Malzemenin birim hacim ağırlığı kullanım alanına göre ayarlanabilmektedir. (Koçak, 2010).

Mimarlık alanında kullanılan alçı malzemeleri sıva alçısı, kartonpiyer alçısı, saten perdah alçısı, derz dolgu alçısı, yapıştırma alçısı ve makine sıva alçısı gibi toz alçı ürünleridir. Bunun yanında vitrifiye malzemelerinde, porselen ve kiremit yapımında kalıplarda kullanılmaktadır. Alçı malzemesi yapı sektöründe 2000’li yıllardan sonra 1 milyon ton alçı binalarda kullanılmaya başlanmıştır. Ancak ülkemizde konut ihtiyacının karşılanabilmesi için bu miktar yeterli olmamakta, çok daha fazlasına ihtiyaç duyulmaktadır. Alçı malzemesi yapı sektörünün dışında tıpta, dişçilikte, kimya sanayisinde, bira sanayisinde kullanılmaktadır (Geçim, 2017).

2.3. Alçı Levha

En basit tanımıyla iki tarafı karton kaplı katman arasında alçı bir iç dolgudan oluşmuş yapı malzemelerine alçı levha denilmektedir (Şekil 2). Bu kağıtlar alçı levhanın kullanım sırasında karşılaştığı kuvvetlere karşı yeterli gerilme mukavemeti kapasitesine sahip olmasına ve dolayısıyla direnmesine yardımcı olmaktadır. Alçı levhaların çekirdek bölgesine kullanım amacına göre ilave katkı malzemeleri eklenerek özelleştirilebilmektedir (Ngu, 2004). Alçı levhalar TS EN 520 + A1 standardına uygun olarak üretilmektedir.



Şekil 2. Çift tarafı karton kaplı alçı levha

Kaynak: Ngu (2004).

2.3.1. Alçı Levha Tarihçesi

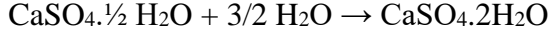
Alçı levhalar 1894 yılında ABD’de Augustine Sackett’in patent başvurusu yapmasıyla birlikte yapı malzemesi olarak ilk kez ortaya çıkmıştır. ABD’de kartonlu alçı levhalar, dayanıklı ve kullanımı kolay olması nedeniyle kısa sürede yayılmış ve 20. yy başlarında en yüksek kullanım seviyesine ulaşmıştır. Alçı levhalar, ilk kullanıldıklarında açık kenarlı olarak kullanılmış, bugünkü kapalı kenarlı hali 1910 yılında kullanılmaya başlanmıştır. Avrupa’da 1917 yılında İngiltere’de ilk alçı levha üretimi gerçekleştirilmiş, takiben 1938 yılında Letonya’ da kurulan fabrika ile alçı levha üretim çalışmaları devam etmiştir (Ryan, 1962).

I. Dünya Savaşı 1914-1918 yıllarında alçı levha yapı malzemelerin askerlerin kaldığı barakaların inşasında kullanılmıştır. Öte yandan 1939-1945 II. Dünya Savaşı yıllarında metal malzemesinin eksikliği ile birlikte alçı levha malzemelerinin kullanımı fazlaşmış o yıllarda kullanılan metal üzeri sıva duvarların yerine kolay kullanıma sahip olan alçı levha yapı malzemesi tercih edilmiştir. Tüm dünyada uzun zamandır kullanılmakta olan alçı levha yapı malzemesi ülkemizde ise ilk kez 1989 yılında Ankara’da kurulan Biltepe şirketi ile alçı levha üretimine başlanmıştır (Koçak, 2010). 1940’lı yıllarda özellikle iç mekan tasarımına olan talebin artmasıyla birlikte konut ve ticari ofis binalarında alçı levha uygulamalarının artması alçı levhaların kullanımında ve üretiminde büyüme göstermiştir. 1970’li yıllarda ABD’deki tüm binaların yaklaşık %90’ında alçı levha kullanmaya başlanmıştır (Ngu, 2004). İlerleyen zamanlarda nüfusun artışıyla birlikte konut talebinin artması alçı levha yapı malzemelerinin kullanım alanlarının yaygınlaşmasını sağlamıştır (Turan ve Kılıçkaya, 2016).

2.3.2. Alçı Levha Üretimi

Alçı levha üretiminde hammadde olarak alçı tozu kullanılmaktadır. Üretim prosesinin başlangıcında kuru alçı tozu, su ve diğer katkı malzemeleri mikser yardımıyla karıştırılarak sıvı alçı karışımı bulamaç haline getirilir. Daha sonra oluşturulan karışım iki karton arasına kalıp halinde dökülerek uygulanır. Elde edilen ürün merdaneden geçirilerek düz plaka haline getirilir ve ebatlama bölümünde istenilen boyutta kesilir. İçerisindeki fazla nemi çıkarmak için kurutma fırınında kurutulur. En son aşamada üretilen alçı levha ürünleri paketlenerek kullanılmak için depolarda bekletilir. Alçı

levhaların üretim sürecinde karışıma katkı maddelerinin eklenmesindeki amaç, alçı yoğunluğuna etki etmek ve karton ile alçının birbiri ile mekanik olarak bağlanması sağlamaktır (Koçak, 2010).



Yukarıda gösterilen reaksiyon alçı levhanın rehidrasyon işlemine aittir. Rehidrasyon reaksiyonu kalsinasyon reaksiyonunun tam tersi şekilde çalışmaktadır. Alçı üretiminde alçı taşında bulunan suyun fazlasının uzaklaştırılması için kalsinasyon işlemi uygulanır. Alçı levha üretim prosesinde su/alçı oranı teorikte 18.3/100 olmasına rağmen, uygulama kısmında bu oranlar kalıba girme kolaylığı açısından 60/100 ile 80/100 arası kullanıldığı bilinmektedir (Koçak, 2010).

2.3.3. Alçı Levha Özellikleri ve Kullanım Alanları

Alçı levhalar binaların iç ve dış duvar yüzeylerinde, tavan uygulamalarında, taşıyıcı olmayan bölme duvar uygulamalarında, giriş kaplama malzemesi olarak ve yapısal çelikler için (kolon-giriş) kullanılmaktadır. Mimari yapılarda kullanılan alçı levhalar kullanım alanlarına göre 6-18 mm olmak üzere farklı kalınlıklara sahip olmalarının yanı sıra istenilen ebatlarda (en ve uzunluk) üretimleri mümkündür. İç mekan tavan uygulamalarında 6 mm kalınlığında alçı levha yapı malzemeleri, hafifliği, uygulama kolaylığından ve uygulama süresinin kısa olmasından dolayı daha çok tercih edilmektedir. Daha kalın alçı levha malzemeleri ise iç duvar ve taşıyıcı olmayan bölme duvar uygulamalarında kullanılmaktadır. Son yıllarda mimarlık alanında yapılan uygulama örneklerinde dış cephe kaplaması olarak cam elyaf takviyeli alçı levhaların kullanıldığı bilinmektedir. Dış cephede, sıva altı ya da mantolama altı kaplama malzemesi olarak kullanıldığı gibi, duvar elemanı olarak da uygulanmaktadır. Bu uygulama yapıda küf oluşumunu engellemekte ve yalıtıma katkı sağlamaktadır (Turan ve Kılıçkaya, 2016). Ayrıca teknolojik gelişmeler ışığında malzeme biliminin gelişim göstermesi ile klasik alçı levha yapı malzemelerine kimyasal katkı maddeleri eklenerek su direnci ve yangın dayanımına sahip olan alçı levha üretimi gerçekleştirilmiştir (Koçak, 2010).

Yapılan araştırmalar, mimari yapılarda alçı levha yapı malzemesinin diğer ülkelere kıyasla çok daha az kullanıldığı tespit edilmiştir. Dünya alçı birliğinin açıkladığı

verilere göre gelişmiş ülkelerde alçı kullanımının kişi başına düşen değer yaklaşık 5-6 m² , Japonya gibi deprem riskinin çok olduğu ülkelerde bu değer 10 m² civarındayken, Türkiye' de ise bu değer 0.3 m² dolaylarındadır (Çelik vd., 2005).

Alçı levha uygulama yöntemleri kullanım alanlarına göre farklılık göstermektedir. Duvar yüzeylerine uygulanan alçı levhalar özel alçı karışımı ile yapıştırma yöntemiyle uygulanmaktadır. Bir başka alçı levha uygulama yöntemi, duvar yüzeyine 5X5, 10X10 cm gibi ölçülerde ahşap çiteler veya çelik saç profiller ile oluşturulan taşıyıcı iskelet üzerine alçı levhaların vidalanarak monte edilmesiyle yapılmaktadır. Alçı, malzemenin kullanım yerine göre farklı malzeme çeşitlerine sahiptir. Örneğin; tavan uygulamaları için tavan taşıyıcı profiller, duvar uygulamaları için duvar taşıyıcı profiller ve esnek alanlarda malzemenin kullanımı için yay şeklini alabilen esnek profiller kullanılmaktadır. Alçı levha yapı malzemelerinin uygulama kolaylığına sahip olması alçı levhanın en büyük avantajları arasında yer almaktadır. Malzemeler binalarda tasarlanan uygulamanın ölçülerine göre özel kesim yöntemleri ile ebatlanarak taşıyıcı iskelet üzerine makinalarla vidalanarak sabitlenmektedir. Vidalama sonrasında açıkta kalan ek yerleri cam yünü veya polyester liflerinden oluşan derz bandları ile kapatılarak güçlendirilmektedir. Bu işlemin ardından yüzey zımparalanarak pürüzsüz hale getirilir ve boya, duvar kağıdı veya yüzey kaplama malzemeleri ile kaplanarak kapatılır (Geçim, 2017).

Mimarlığın temelini oluşturulan yapı malzemeleri arasında en çok kullanılan alçı levha ürünlerinin sahip olduğu özellikler sırasıyla verilmektedir: (Url-1)

- ✓ Hafif ve esnek olması, deprem yüklerini azalttığı için yapıların depreme daha dayanıklı hale gelmesini sağlamaktadır.
- ✓ Alçı levha malzemeleri diğer duvar malzemelerine göre hafif olması nedeni ile iç mekanda oluşturulan bölme duvarların kalınlıkları düşürülerek az alan kaplamalarına yardımcı olur ve böylelikle iç mekanlarda alan kazancı elde edilir.
- ✓ Bünyesine ilave katkı maddesi eklenmesi malzemenin mekanik ve fiziksel özelliklerini geliştirerek, malzemenin performansını arttırıcı yönde etki oluşturmaktadır.
- ✓ Binalarda yangın dayanımı sağlamaktadır.
- ✓ Alçı levhalar ekonomiktir.

- ✓ Alçı levha malzemesinin üretimi ve kuruması sonrası boyutlarında bir değişiklik göstermez. Beton malzemesindeki gibi yüzeyinde rötre çatlakları oluşmaz, ahşap malzemesi gibi kuruduktan sonra boyut değiştirmez.
- ✓ Suyu dayanıklı çeşitleri ile su yalıtımı sağlaması malzemenin dayanımını arttırmakta, ortamdaki nemi dengelemekte ve sağlıklı bir iç mekan oluşturmaktadır.
- ✓ Yapılarda akustik konfor oluşturarak, ses yalıtımı sağlamaktadır.
- ✓ Yapılarda ısı yalıtım sağlamaktadır.
- ✓ Bakteri üretmeyen özelliğinden dolayı, insan sağlığına zarar vermeyen bir malzemedir.
- ✓ Uygulaması kolay ve pratiktir. İstendiği zaman demonte edilme özelliğine sahiptir. Böylece mekânlar hızlı bir şekilde genişletilebilir veya küçültülebilir. İşçilikten ve zamandan tasarruf sağlamaktadır.
- ✓ Alçı levha geri dönüşümü olan doğal bir malzemedir. Bu yönü ile atık malzemelerin doğaya, insana ve ekonomiye kazandırılması sağlanmaktadır. Böylelikle malzemenin karbon salınımını azaltarak çevreye zararı önlemektedir.
- ✓ Ülkemizdeki alçı kaynaklarının çok miktarda olması; yerel malzeme ve yerel iş gücü açısından oldukça önemlidir.
- ✓ Ülkemizdeki alçı kaynaklarının çok miktarda olması kolay bulunur hammadde ile pazara yakın üretim sağlamaktadır. Bu sayede nakliye giderlerinin azaltılması amaçlanır.

2.3.4. Alçı Levha Çeşitleri

Alçı levhalar sahip oldukları özelliklere göre farklı çeşitlere sahiptir (Çelik vd., 2005; Url-1).

Standart Alçı Levha

- ✓ İç yapısında lifli katkı maddesi içermemektedir.
- ✓ İç mekanda oda bölmelerinde, duvar giydirme ve asma tavan uygulamalarında, duvar yüzey kaplamaları olarak kullanılmaktadır.
- ✓ Islak mekanlar da kullanılmamaktadır.

Suya Dayanıklı Alçı Levha

- ✓ İç yapısında lifli madde içermektedir. Üretim sırasında su itici özellik kazandırmak için katkı maddesi ilave edilerek malzeme güçlendirilmiştir ve priz geciktirici madde ilave edilmiştir.
- ✓ Suya ve neme karşı yalıtım sağlamaktadır.
- ✓ Banyo, wc, mutfak gibi alanlarda taşıyıcı olmayan bölme duvar, giydirme duvar ve asma tavan yapımında kullanılmaktadır.

Yangına Dayanıklı Alçı Levha

- ✓ Üretim sırasında cam elyaf takviyesi ile yangın dayanım özelliği kazandırılmıştır.
- ✓ Konut, otel, okul, hastane, ticaret ve iş merkezlerinde taşıyıcı olmayan bölme duvar, giydirme duvar ve asma tavan yapımında kullanılmaktadır.

Küfe ve Suya Dayanıklı Alçı Levha

- ✓ İç yapısında lifli madde içermektedir. Üretim sırasında su itici özellik kazandırmak ve küfe karşı direnç sağlamak için katkı maddesi ilave edilerek malzeme güçlendirilmiştir ve priz geciktirici madde ilave edilmiştir.
- ✓ Nemin yoğun olduğu mekanlar da kullanılmaktadır.
- ✓ Bu alçı levhanın üzerlerine seramik ve fayans uygulaması yapılmaktadır.

Darbe, Su ve Yangına Dayanıklı Alçı Levha

- ✓ İç yapısında lifli madde içermektedir. Üretim sırasında su itici özellik kazandırmak ve cam elyaf takviyesi ile yangın dayanım özelliği kazandırılmıştır.
- ✓ Darbelere karşı yüzey sertliği artırılarak dayanım sağlamaktadır.
- ✓ Su ve nem yalıtımı sağlayarak sağlıklı bir iç mekan oluşturmaktadır.
- ✓ Akustik özelliği geliştirilmiştir. Ses yalıtımı sağlamaktadır.

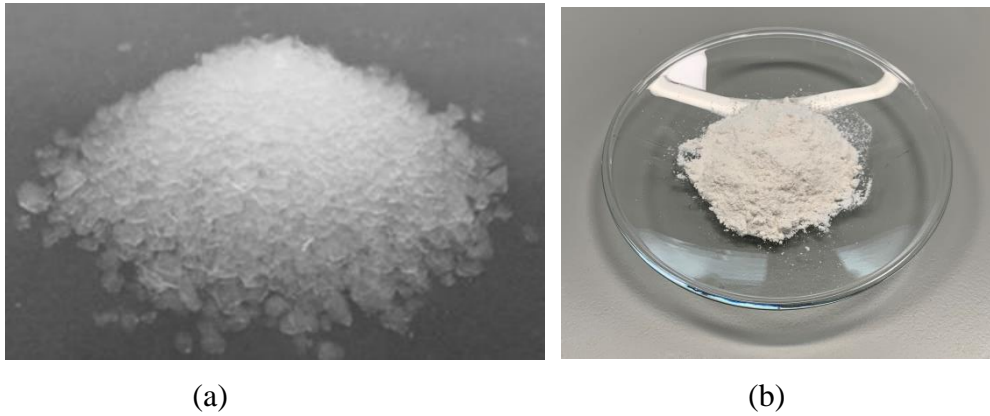
Dış Cephede Kullanılan Alçı Levha

- ✓ Suya ve neme karşı iç yapısı güçlendirilmiştir. Yüzeyi cam elyaf malzemesi ile kaplanmıştır.
- ✓ Binaların dış cephe kaplama uygulamalarında, saçak altlarında ve ıslak mekanlarda kullanılmaktadır.
- ✓ Dış cephe uygulamalarında yüzeylerine metal, ahşap, alüminyum gibi dış cephe kaplama malzemesi ile kaplanabilmektedir.
- ✓ Suya ve neme, yangına, küfe, bakteri oluşumuna dayanım sağlamaktadır.

2.4. Aerojeller

Aerojeller sahip oldukları mükemmel ve benzersiz fiziksel özelliklerinin yanı sıra tasarlanabilirlik gibi olağanüstü yetenekleri nedeniyle birçok alanda gün geçtikçe daha fazla dikkat çekmektedir. Bu özelliklerinden dolayı aerojeller, 1931'de keşfedilmelerinden bu yana bilim camiasında popüler bir malzeme olarak ortaya çıkmaktadır (Patil, 2020).

Aerojeller bugüne kadar bilinen dünyanın en hafif katı malzemeleri olarak tanımlanmaktadır. Yapılarında %95 ile %99.9 miktarında hava bulunduran aerojeller (Şekil 3) 0.001g/cm^3 değerinde oldukça düşük yoğunluğa sahip malzemelerdir (Leydecker, 2008). Aerojeller, jelden sıvı fazın tahribatsız bir şekilde çıkarılmasıyla gaz fazın sıvı fazın yerini alması sonucu, orijinal jel ile aynı şekilde ve hacimde katı gözenekli bir malzemenin kalması ile oluştuğu bilinmektedir (Lin vd., 2021).



Şekil 3. (a) Granül silika aerojel, (b) Toz silika aerojel

Kaynak: (a) Stahl (2012), (b) Arkan Kişisel Fotoğraf Arşivi (2021).

Aerojellerin ultra düşük yoğunluğu, yüksek yüzey alanı, yüksek gözenekliliği, yüksek adsorpsiyon özelliği, şeffaflığı ve düşük termal iletkenliği gibi benzersiz fiziksel özellikleri onları termal, optik, akustik, elektronik ve katalitik olmak üzere birçok alanda uygulanabilir olmalarını mümkün kılmaktadır. Bununla birlikte, bilinen tüm katı gözenekli malzemelerden farklı olarak arojeller, açık hücreli, oldukça küçük gözenek boyutlarına sahip, geniş spesifik yüzey alanı, en iyi termal ve optik iletim özelliği ile dikkat çekmektedir (Guray, 2010). Ayrıca, arojeller şimdiye kadar test edilen malzemeler arasında, bir katının sahip olabileceği en düşük termal iletkenliğe sahip olmasının yanı sıra düşük kırılma indeksine, ses hızına ve dielektrik sabitine sahip olduğu bilimsel araştırmalar ile kanıtlanmıştır (Fricke ve Tillotson, 1997).

Silika arojellerin birbirine bağlı gözenek ağı yoğunlukla mezogözeneklerden (2 ile 50 nm arasında gözenek boyutları) oluşur ve ortalama gözenek çapı 20 ile 40 nm arasındadır. Bununla birlikte, mikro (gözenek çapı 2 nm'den küçük) ve makro gözenekler (gözenek çapı 50 nm'den büyük) aralığında gözeneklere de sahip oldukları bilinmektedir (Dorcheh ve Abbasi, 2008; Aegerter, 2011). Karakterizasyon çalışmaları ile nihai malzemedeki baskın gözenek boyutları sol-jel yöntemi aracılığıyla çözelti kimyası ile özelleştirilebilmektedir. Örneğin, asit kataliz koşulları kullanıldığında mikro gözenekler önemli hale gelirken, amin grupları gibi bazik kısımlara sahip organik olarak modifiye edilmiş silika öncüllerinin eklenmesi, büyük makro gözeneklerin oluşmasına yol açmaktadır (Alie, vd., 2002; Mendes, vd., 2019). Birçok araştırmacı silika arojellerin sentezi sırasında kullanılan kimyasallarla silika arojellerde istenilen gözenek boyutunu elde edebilmelerinden dolayı ve birçok uygulama alanında kendine yer bulmasıyla son yıllarda silika arojellerin sentezi ve karakterizasyon çalışmaları ile ilgili araştırmalar hızlanmıştır (Saraç ve Toplan, 2016).

2.4.1. Aerojellerin Tarihçesi

Aerojel ilk kez 1930 yılında Kaliforniya'da Steven S. Kistler tarafından üretilmiştir. Pacific College'da katı bir jel oluşturmak için çalışmalar yapan Kistler; jelin içerisindeki suyu süperkritik yöntemle kurutup yerini havanın alması ile jelin çökmeden üretimini gerçekleştirmiştir. 1931 yılında Kistlerin yaptığı bu çalışma Nature dergisinde yayımlanarak literatüre geçmiştir (Buğdaycı, 2008).

Kistler, silika jelin sentezi için bilimsel çalışmaları geliştirerek devam ettirmiştir. Islak jeller daha önceleri buharlaştırılarak kurutulurken, yeni bir süperkritik kurutma tekniği ile süperkritik bir sıvıya dönüştürüldü ve böylelikle jelin içinden bu akışkanın uzaklaşmasını sağlayarak ilk başarılı aerojel üretimini gerçekleştirmeyi başarmıştır. Bu yöntem, bugün aerojel üretim prosesin de kullanılmaktadır (Pierre, 2011). Kistler bu yöntemle alüminyum, demir, kalay oksit, tungistik, nikel tartarat, selüloz, nitro selüloz, jelatin, yumurta akından da aerojel üretmiştir (Sıyın, 2016).

Steven Kistler üniversitedeki görevini sonlandırdıktan sonra 1940-1945 yılları arasında Monsanto adında bir şirkette çalışmaya başlayarak aerojel üretimine devam etmiş ve üretilen bu aerojeller kozmetik ve diş macunlarında katkı maddesi olarak kullanılmıştır. Kistler böylelikle ilk kez ürettiği aerojelleri ticarileştirmiştir (Saraç, 2018).

1945 ve 1970 yılları arasında aerojellerle ilgili araştırmalara ara verilmiştir. 1970'li yıllarda Fransız hükümetinin Claud Bernard Üniverstesini ile birlikte çalışmaları sonucu aerojellerle ilgili yeni bilgilere ulaşılmıştır. Bu çalışmalar doğrultusunda gözenekli malzemelerde oksijen ya da roket yakıtı depolamanın yolları araştırılmıştır. Teichner ve arkadaşları sol-jel yöntemini geliştirerek Kistler'in kullandığı sodyum silikat yerine TMOS'u (tetramethyorthosilicate) kullanmışlardır. Metanol çözeltisi içinde TMOS'u hidrolize ederek alkojel sentezlemişler ve bu alkojelleri süperkritik koşullarda kurularak yüksek özellikte aerojel elde etmişlerdir. Teichner ve arkadaşları sol-jel yöntemini geliştirmelerinin ardından aerojel teknolojisi ile ilgili gelişmeler hızla devam etmiştir.

1980 yıllarının başlarında bilim adamları silika aerojellerin Cherenkov ışımalarının üretimi için uygun ortam koşullarının oluşturulduğunu fark etmişlerdir. Bu deneyler için çok sayıda silika aerojel bloklarına ihtiyaç olduğu tespit edilmiştir. TMOS yöntemi ile yapılan iki adet dev detektörlerden birisi; Almanya'da parçacık hızlandırıcı merkezi DESY'deki TASSO detektörüdür. Bu detektör 1700 litre silika aerojel kullanılarak yapılmıştır. Diğer ise; Cern'de bulunan detektörlerden birisidir ve bu detektör ise 1000 litre aerojel kullanılarak yapılmıştır.

Öte yandan Lund grup aerojel üretecek ilk fabrikayı İsveç'te kurmuştur. Fabrika da 1984 yılında aerojel üretimi sırasında 3000 litrelik otoklavda sızıntının meydana gelmesi ile üretimin yapıldığı yer metanol buharı ile dolarak sonrasında büyük bir

patlama gerçekleşmiştir. Patlama sonrası fabrika özel bir şirket tarafından yeniden kurularak aerojel üretmeye devam etmiştir.

1980'lerin sonunda Livermore Ulusal Laboratuvarı'nda (LLNL) Larry Hrubesh ve arkadaşları 0.003 g/cm^3 yoğunluğunda dünyanın en hafif katısı olan silika aerojeli üretmeyi başarmışlardır. Üretilen bu aerojelin yoğunluğu havanın yoğunluğunun 3 katı kadarıdır. Ayrıca 1980'lerin sonunda aerojellerin mimari yapılarda kullanılmaya başlaması ile birlikte yapı sektöründe yeni yerini almıştır (Baetens vd., 2011) .

1983 yılında Berkeley'den Arlon Hunt ve araştırmacılar TMOS yerine TEOS kullanarak benzer kalitede aerojel sentezi gerçekleştirebileceklerini bulmuşlardır. Aynı çalışma grubu aerojel sentezi sırasında alkol yerine karbondioksit (CO_2) kullanılabilceğini keşfetmiştir. Sentez sırasında CO_2 'in kritik değere ulaşmasındaki basınç ve sıcaklık (31°C ve 1050 psi) değeri metanol (240°C ve 1600 psi) ile kıyaslandığında daha düşük olduğu görülmüştür. Buda daha güvenli koşullarda üretimin gerçekleşebileceğini göstermiştir. Bu gelişmeler doğrultusunda Almanya'daki BASF firması sodyum silikattan aerojel üretmeye başlamıştır. New Mexico Üniversitesinde araştırmacılar aerojelin üretim basamağında bulunan süperkritik kurutma basamağını çıkarıp bunun yerine aerojelin yüzeyini kimyasal olarak değıştirmeye ilgili denemeler yapmışlar ve böylelikle düşük maliyette aerojel üretmeyi başarmışlardır (Buğdaycı, 2008).

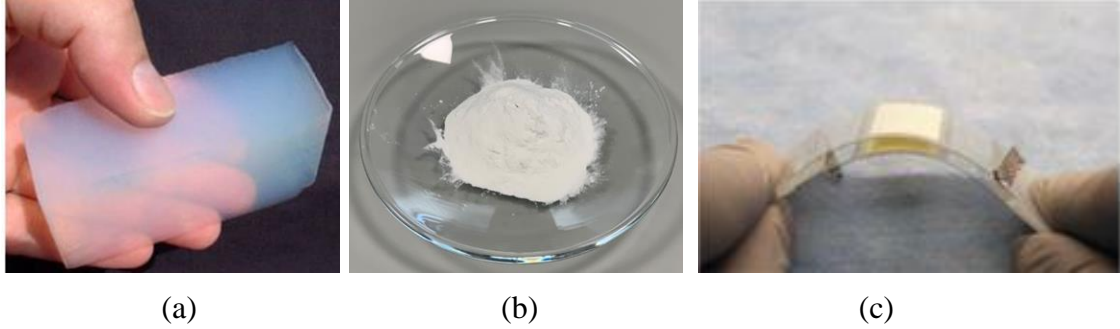
1985 yılında Almanya'nın Würzburg kentinde aerojeller ile ilgili ilk sempozyum gerçekleştirilerek 25 adet bildiri sunulmuştur. Daha sonraki yıllarda birçok ülkede aerojeller ile ilgili birçok sempozyumlar düzenlenmiştir. 1988 yılında Fransa'nın Montpellier kentinde bir sonraki sempozyum gerçekleştirilmiştir. Bu sempozyumu takiben 1991 yılında Würzburg'da, 1994'de Kaliforniya Berkeley'de, 1997 yılında 200 araştırmacı ile Montpellier'de, 2000 yılında New Mexico'da, 2003 yılında Washington'da düzenlenmiştir (Mermer, 2018).

1993 yılında NASA ve Aspen Systems aerojel ile ilgili yeni gelişmeler üzerine çalışmalar yapmışlardır. Bu gelişmeler doğrultusunda aerojel üretiminde kullanılan teknoloji Aspen Systems firmasına SBIR ödülünü almasını sağlamış ve 2001 yılında Aspen Aerojels şirketi kurulmuştur. İlerleyen yıllarda Cabots Aerojel markalaşarak Nanogel ismiyle seri üretime başlandığı bilinmektedir (Saraç, 2018). Ayrıca, 2001

yılında öncü olarak inorganik tuz ve jelleşme hızlandırıcı olarak epoksit kullanarak çeşitli oksit aerojelleri hazırlamak için çok yönlü bir yöntem geliştirilmiştir. 2004 yılında ters misel sentezi ile bir sol-jel işlemi ve süper kritik kurutma yoluyla kalkojenit aerogel sentezlenmiştir. Daha sonra 2006 yılında gradient aerojeller, kuyruklu yıldızdan ve yıldızlararası uzaydan ultra yüksek hızlı parçacıkları başarıyla yakalayarak dünyaya geri dönmüştür. Bundan sonra, peş peşe CNT aerogel, grafen aerogel, karbür aerogel ve tek elementli aerogel dahil olmak üzere bir dizi yeni aerogel oluşturulmuştur (Du vd., 2013).

2.4.2. Aerogel Çeşitleri

Du ve arkadaşlarına göre aerojelleri sınıflandırmak için kullanılan birçok yöntem vardır. Bu yöntemler Tablo 2’de detaylı bir şekilde toplamak mümkündür. Görünüşlerine göre aerojeller Şekil 4’de gösterildiği gibi monolitik, toz, film olarak 3 kategoriye ayrılmaktadır (Du vd., 2013).



Şekil 4. a) Monolitik aerogel, b)Toz aerogel, c) Aerogel film

Kaynak: a) Khamidi (2014), c) Arkan Kişisel Fotoğraf Arşivi (2021), d) Zheng (2018).

Hazırlama yöntemi göz önüne alındığında aerogel çeşitleri, aerogel, kserojel, kriyojel ve diğer aerogel ile ilgili malzemeler olmak üzere dört tipten oluşmaktadır. Farklı mikro yapı göz önüne alındığında aerojeller; mikro gözenekli aerogel, mezo gözenekli aerogel ve karışık gözenekli aerogel olarak sınıflandırılmaktadır. Bununla birlikte, aerogel malzeme bileşimlerine göre tek bileşenli aerojeller ve aerogel kompozitler olmak üzere iki kategoride incelenmektedir. Tek bileşenli aerojeller oksitten oluşan aerogel, organik aerogel, karbon aerogel, bakır aerogel, kalkojenit aerogel ve diğer tek bileşenli aerogel olmak üzere 6 grupta sınıflandırılmaktadır. Aerogel kompozitler ise çok bileşenli

kompozit, değişken aerogel ve mikro/nano aerogel kompozit olarak gruplandırılmaktadır (Du vd., 2013).

Tablo 2. Aerojellerin sınıflandırılması

Aerogellerin Sınıflandırılması	
Görünüşlerine Göre	1.Monolitik 2.Toz 3.Film
Hazırlama Yöntemlerine Göre	1.Aerogel 2.Kserogel 3.Kriyojel 4. Diğer aerogeller ilişkili malzemeler
Mikro Yapılarına Göre	1.Mikro Gözenekli (< 2 nm) 2.Mezo Gözenekli (2~50 nm) 3.Karışık Gözenekli
Malzeme Bileşimine Göre	1. Tek Bileşenli Aerogeller a. Oksitten Oluşan Aerogel (Silis olmayan silika) b. Organik Aerogel (Reçine ve selüloz bazlı) c. Karbon Aerogel (kömürleşmiş plastik ve grafen) d. Bakır Aerogel e. Kalkojenit Aerogel f. Diğer Tek Elementli Aerogel 2. Aerogel Kompozitler a. Çok Bileşenli Aerogel b. Değişken Aerogel c. Mikro/Nano Aerogel Kompozit (Toz, fiber, polimer)

Kaynak: Du vd. (2013).

2.4.2.1. Organik Aerogeller

Organik aerogeller 1930 yılında ilk olarak Kistler, daha sonra 1989 yılında Pekala ve arkadaşları tarafından çalışılmıştır (Hwang ve Hyun; 2004). Organik aerogellerin en yaygın kullanım alanına sahip çeşidi karbon aerogeller olarak bilinmektedir. Genel olarak organik aerogellerin sentezi üç basamakta gerçekleşmektedir. İlk olarak sol-jel

yöntemi ile polimerizasyon işlemi gerçekleştirilir. İkinci basamakta hazırlanan sulu çözeltinin solvent değişimi yapılır ve son basamakta süperkritik kurutma işlemi ile sentez gerçekleştirilir. Organik aerogel sentezinin temel öncüleri Resorsinol-formaldehit (RF) ve melamin-formaldehit(MF) maddeleridir. Sentez, resorsinol-formaldehit karışımının polimerizasyonu ve su içindeki seyreltilmesi ile olmaktadır. Sentez sırasında kullanılan katalizör sodyum karbonattır. Organik aerogeller inorganik aerojellere göre kırılma olmayan yapıya sahiplerdir, çapraz kovalent bağlar organik aerojelleri daha dayanıklı yapıda olmalarını sağlamaktadır (Mermer, 2018; Kesik, 2019; Yılmaz, 2013).

2.4.2.2. İnorganik Aerogeller

İnorganik aerogellerin birçok alanda kullanılabilir olması nedeniyle en yaygın çeşidi silika aerogellerdir. Silika aerogeller 1930 yılında ilk olarak Kistler tarafından keşfedilmelerine rağmen ancak son 20 yılda silika aerogeller üzerine yapılan çalışmalar yoğunlaşmıştır. İnorganik aerogeller sol-jel yöntemi ile metal alkoksitlerin polikondenzasyonundan sentezlenen maddelerdir. Silisyum oksit, alüminyum oksit, zirkonyum oksit, titanyum oksit ve tungsten oksit diğer inorganik aerogeller olarak bilinmektedir (Mermer, 2018; Kesik, 2019).

2.4.2.3. Silika Aerogeller

Silika aerogeller yeryüzünde çok bulunan silisyum elementi içeren silisyum kaynaklı hammaddelerden sentezlenmektedir. Silisyum kaynaklı hammaddelerden sentezlenmeleri onların üretimlerini daha kolay ve uygun maliyetli hale getirmekle birlikte, ticari olarak daha yaygın bir kullanım alanı bulmalarını sağlayarak endüstriyellemelerini hızlandırmaktadır. Ülkemizde silisyum kaynaklı hammaddelerin zenginliği göz önünde bulundurulduğunda ve teknolojinin getirdiği avantajlarla birlikte yenilikçi bir ürün olan silika aerogelin sentezlenebilirliği ve üretimi oldukça önem taşımaktadır. Bu kadar önemli malzemenin endüstriyel olarak başta mimari yapılarda ısı yalıtım malzemesi olmak üzere optik ve akustik konfor sağlayan ürün olarak, kimya alanında kimyasal sensörler, ilaç salınım sistemleri, ekstrakte maddesi, katalizör taşıyıcı ve adsorbent, elektronikte izolatör, sensör ve çerenkov detektörü, uzay ve havacılıkta

uzay toz parçacıkları emicisi ve çerenkov sayaçları, eczacılıkta ve tarımda taşıyıcı malzeme ayrıca dolgu malzemesi olarak, tekstilde termal koruyucu ve su geçirmeyen kıyafetler olmak üzere pek çok farklı alanda kullanımı mevcuttur (Aegerter vd., 2011).

Son yıllarda tüm aerojeller arasında silika aerojeller, düşük termal iletkenlik (0.001W/mK), yüksek gözeneklilik (%99), yüksek optik iletim (%99), yüksek özgül yüzey alanı (1000 m²/g), düşük dielektrik sabiti (1.0-2.0), düşük kırılma indeksi (1.05), düşük ses hızı (100 m/s) gibi birçok çeşitli eşsiz özelliklere sahip oldukları için giderek daha fazla ilgi görmektedir (Dorcheh ve Abbasi, 2008; Gurav, 2010). En önemlisi silika aerojellerin tüm bu özellikleri pratik uygulamaların ihtiyaçlarını karşılamak için işlevselleştirilebilmeleridir, yani üretim sürecinde gözeneklilik, yoğunluk, şekil, fonksiyonel gruplar, morfoloji gibi ürünlerle ilgili hemen hemen tüm değişkenler sol-jel yöntemi kullanılarak ayarlanabilmektedir (Medina vd., 2010). Ayrıca, aerojel yüzeyine bazı kimyasal gruplar eklenerek silika aerojellerin özelliklerini değiştirmek mümkün olmaktadır (Alnaief ve Smirnova, 2010).



Şekil 5. Monolitik Silika Aerojel

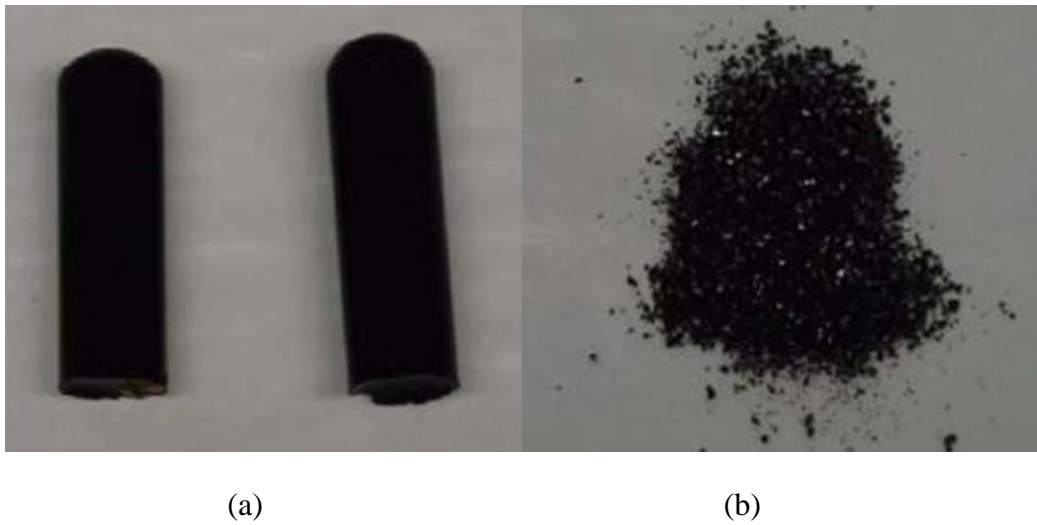
Kaynak: Url-2

Silika aerojeller birçok üstün özelliklere sahip olmalarının yanı sıra hazırlanma koşullarına göre kırılğan malzemeler olarak nitelendirilmektedir. Silika aerojel malzemenin kırılğan yapısı malzemeye bir takım kullanım sınırlılıkları getirmekle birlikte çoğu zaman malzemeyi tutmak bile zorlaşabilmektedir (Şekil 5). Malzemedeki bu sınırlılıkları bertaraf etmek, silika aerojel malzemesinin istenmeyen özelliklerini geliştirmek ve malzemenin uygulama alanlarını genişletmek için genellikle silika aerojel kompozit malzemeler üretilmektedir. Silika aerojel kompozitlerini hazırlamanın

amacı malzemenin mekanik özelliklerini iyileştirerek dayanımlarını arttırmaktır (Ülker, 2011).

2.4.2.4. Karbon Aerojeller

Karbon arojeller, düşük yoğunluğa, kontrol edilebilir gözenek yapısına, yüksek yüzey alanına, yüksek elektrik iletkenliğine ve farklı yüzey kimyasına sahip tipik gözenekli malzemelerdir. Karbon arojellerin farklı boyuttaki gözenek yapıları, hem mikro hem mezo gözenekleri adsorpsiyon kapasitesine önemli katkı sağlamaktadır (Wu vd., 2012). Karbon arojeller sol-jel teknolojisi ile toz ve monolitik formda üretilebilmektedir (Şekil 6). Sol-jel yönteminde kullanılan madde oranlarıyla, prodesteki uygulama süresinin azaltılmasıyla, farklı parametreler kullanılarak karbon arojel malzemelerinin özelliklerinin geliştirilebileceği bilinmektedir. Karbon arojellerin toksik olmayan ve çevre dostu malzemeler olması son zamanlarda tercih edilme sebepleri arasında yer almaktadır. Bu malzemeler özelliklerine ve niteliklerine göre birçok farklı alanlarda kullanılmaktadır. Karbon arojellerin yüksek geçirgenliğe sahip elektrotları, metal iyonları, bakteri ve bazı organik kirletici maddeleri ortadan kaldırmak için etkili olduğu bilinmektedir. Dolgu maddesinde, roketlerde, pencere camlarında, giysiler de, buzdolapları ve su ısıtıcılarında yalıtım amaçlı karbon arojeller kullanılmaktadır. Ayrıca; uzayda yüksek hızla dolaşan toz parçacıklarını yakalamak amacıyla karbon arojel panel kullanılmıştır (Balkabak, 2009).



Şekil 6. a) Silindirik monolitik karbon arojel, b) öğütülmüş toz karbon arojel

Kaynak: Balkabak (2009).

2.4.2.5. Alümina Aerojeller

Alümina arojeller, düşük yoğunluğa, yüksek gözenekliliğe, yüksek yüzey alanına ve muhteşem nano yapıya sahip malzemeler olmalarının yanı sıra kimyasal kararlılıkları, gelişmiş termal yalıtkanlıkları ve yüksek mukavemet özellikleri onları benzersiz malzemeler olarak ön plana çıkarmaktadır. Alümina arojeller toz ve monolitik olarak üretilmektedir (Şekil 7). Alümina arojellerin iç yapısındaki nano boyuttaki gözeneklerin birbirlerine bir ağ gibi bağlanması ve birçok etkili özellikleri, yüksek sıcaklıkta süper termal yalıtım, ısı depolama sistemleri, katalizör, katalizör destekleri, gaz filtreleri, akustik cihazlar, ışıldayan güneş sistemleri olmak üzere birçok farklı alanlarda kullanımı sağlanmaktadır (Zu, vd., 2011, Wu vd., 2010).

Alümina arojeller diğer arojel çeşitleri gibi sol-jel yöntemi ile sentezlenmektedir. Özellikle monolitik alümina arojellerin sentezlenmesi sırasındaki bazı jelleşmeye neden olan karmaşık reaksiyon basamakları, alüminyum alkoksitin yüksek reaktivitesi ve kurutulma aşamasındaki çatlamaya olan eğilim nedeni ile bazı zorlukların olduğu tespit edilmiştir. Alüminadan sentezlenen jelin yapısını birçok çeşitli değişkenler etkilemektedir. Alkoksit türü, alkoksitin suya oranı, hidroliz oranı, jelleşme esnasında çözeltinin pH'ı, kullanılan katalizörün türü, alümina arojellin yaşlandırma ve kurutma basamağındaki sıcaklık jelin yapısını etkilemektedir. Alüminyum alkoksitin hidroliz ve yoğunlaşma oranlarını tespit etmek için genellikle kompleks çözücü karışımları veya şelatlama maddelerinin eklendiği bilinmektedir. Bu yöntemle saf monolitik alümina arojellerin oluşumu gerçekleştirilmiş ve elde edilen monolitik alümina arojeller sağlam, mükemmel ısı yalıtım özelliği sergilediği tespit edilmiştir (Poco vd., 2001; Zu, vd. 2011, Öz vd., 2018). Alümina arojellerin özelliklerini sentezleme sırasında ilave edilen kimyasal ajanlar ile geliştirmek mümkündür. Wu vd., (2010) monolitik alümina arojellere trimethylmethoxysilane (TMMOS) ajanı ile yüzey modifikasyonu yaparak istenilen özellikte hidrofobik alümina arojel üretimi gerçekleştirmişlerdir (Wu vd., 2010). Alümina arojellerin hidrofilik yüzeyleri ve sentez sırasında kullanılan pahalı kimyasalların yüksek maliyetli üretime neden olmasından dolayı alümina arojellerin geniş ölçekte kullanılabilirliğini sınırlamıştır (Koçer, 2019).



Şekil 7. Monolitik alümina aerojel

Kaynak: Wu vd. (2010).

2.4.2.6. Diğer Aerojeller

Aerojeller üretildikleri farklı başlangıç malzemelerine göre çeşitlendirilmektedir. Kistler aerojeli keşfettikten sonra ilk olarak silika aerojelleri üretmiş ve daha sonra selüloz, jelatin, tungistik gibi farklı başlangıç malzemelerinden aerojel sentezi gerçekleştirmiştir. Bilim adamları aerojellerin popülaritesinin artmasıyla çeşitli başlangıç malzemelerden aerojel sentezlenebilirliğini araştırmaya başlamışlardır (Koçer, 2019). Bu araştırmalar ışığında; silika, karbon, alümina, biyolojik ve organik polimerlerden, metallere (bakır ve altın), metal oksit geçişlerinin çoğu (demir oksit), birkaç ana grup metal oksitler (kalay oksit), aktinit ve lantanit metal oksitlerden aerojel üretimi gerçekleştirildiği tespit edilmiştir (Yılmaz, 2013; Koçer, 2019). Ayrıca kalkojenit aerojeller, gradient aerojeller, karbon nanotüp aerojeller, grafen aerojeller, karbit aerojeller ve silikon aerojellerin de üretimi gerçekleştirildiği literatür de yer almaktadır. Ayrıca, son yıllarda, aerojellerin sınırlı yönlerini iyileştirilebilmek ve kabiliyetlerini arttırmak için kompozit aerojel üretim denemeleri yapıldığı bilinmektedir (Koçer, 2019).

2.5. Silika Aerojellin Özellikleri

Silika aerojeller, yüksek özgül yüzey alanı, yüksek gözeneklilik, düşük yoğunluk, düşük dielektrik sabiti, mükemmel ısı yalıtımı özelliğine sahip ayrıca iyi bir yangın direnci sunan gözenekli hafif malzemelerdir (Dorcheh ve Abbasi, 2008; Gurav vd., 2010;

Gomes, vd., 2018). Silika aerjel malzemelerin özelliklerine bağlı olarak kullanım alanları farklılaşmaktadır. Malzemenin organik ya da inorganik yapıda olması, farklı gözenek yapısına sahip olması, mekanik mukavemetine göre kolay deforme olup olmaması, saydam, yarı saydam veya opak olmasına göre farklı optik geçirgenlikte olması hangi amaçlar için kullanılacağını belirlemektedir. Tablo 3’de silika aerjellerin genel özellikleri ve değer aralıkları verilmektedir.

Tablo 3. Silika aerjelin özellikleri

Özellik	Değeri
Yoğunluk	0.003-0.35 g/m ³
Yüzey Alanı	600-1000 m ² /g
Gözeneklilik	% 80-99,8
Gözenek Çapı	20-150 nm
Parçacık büyüklüğü	1 mikron-1 cm aralığı
Isıl İletkenlik	0.017 – 0.021 W/mK
Isıl genleşme katsayısı	2.0 – 4.0 × 10 ⁻⁶
Aerjelde Sesin hızı	100 m/s
Dielektrik sabiti	1.0-2.0
Kırılma indeksi	1-1.05
Çalışma sıcaklığı	-180 & +1100 °C

Kaynak: Hrubesh (1998); Dorcheh ve Abbasi (2008).

2.5.1. Silika Aerjellerinin Yoğunluk Özellikleri

Silika aerjelin hacminin %85 ila %99.8’i hava dolu gözeneklerden oluşmaktadır. Bu nedenle aerjellerin yoğunluğu oldukça düşüktür. Silika aerjeller şimdiye kadar bilinen en hafif katı malzemeler olarak bilinmektedir (Kistler, 1931; Baetens vd., 2011; Hrubesh, 1998; Pierre ve Rigacci, 2011).

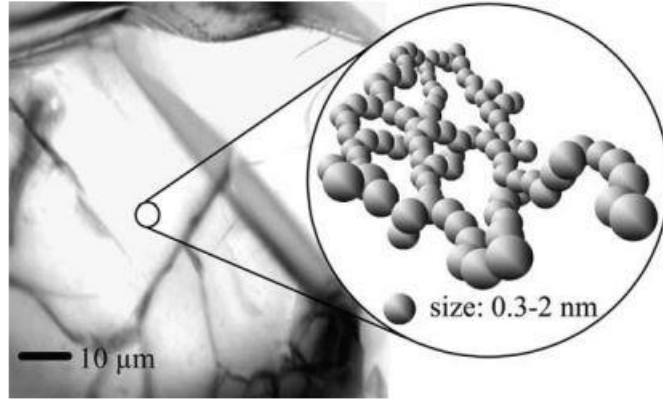
Silika aerojeleri yoğunluk olarak tanımlamak için yığın yoğunluğu (ρ_b) ve iskelet yoğunluğu (ρ_s) terimleri kullanılmaktadır. Yığın yoğunluğu aerjel kütlesinin, aerojelin hacmine oranıdır. İskelet yoğunluğu, katı madde parçalarının kütlesinin, parçalardaki katı madde hacimlerinin ve kapalı gözeneklerin toplamına oranıdır (Woignier ve Phalippou, 1987; Dorcheh ve Abbasi, 2008). Aerojellerin katı kısmının dokusu, ultra ince parçacıklardan oluşmaktadır (Dorcheh ve Abbasi, 2008). Açık gözenekli aerojeller de bu parçacıklardaki gözeneklerin iskelet yoğunluğu yığın yoğunluğuna oldukça yakın olduğu tahmin edilmektedir. Yoğunluk değeri aerojellerin sentezlendiği prosedüre bağlıdır. Yoğunluk değeri helyum piknometresi kullanılarak belirlenmektedir (Mermer, 2018).

Havanın yoğunluk değeri $1,2 \text{ kg/m}^3$ olduğu bilinmektedir. Yapılan çalışmalar, binalar için kullanılan aerojelin ortalama $70\div 150 \text{ kg/m}^3$ yoğunluğa sahip olduğunu göstermektedir. Bu değerleri karşılaştırdığımızda aerojellerin ne kadar hafif katı malzemeler olduğu hakkında fikir sahibi olmamızı sağlamaktadır (Baetens vd., 2010).

2.5.2. Silika Aerojellerin Gözeneklilik Özellikleri

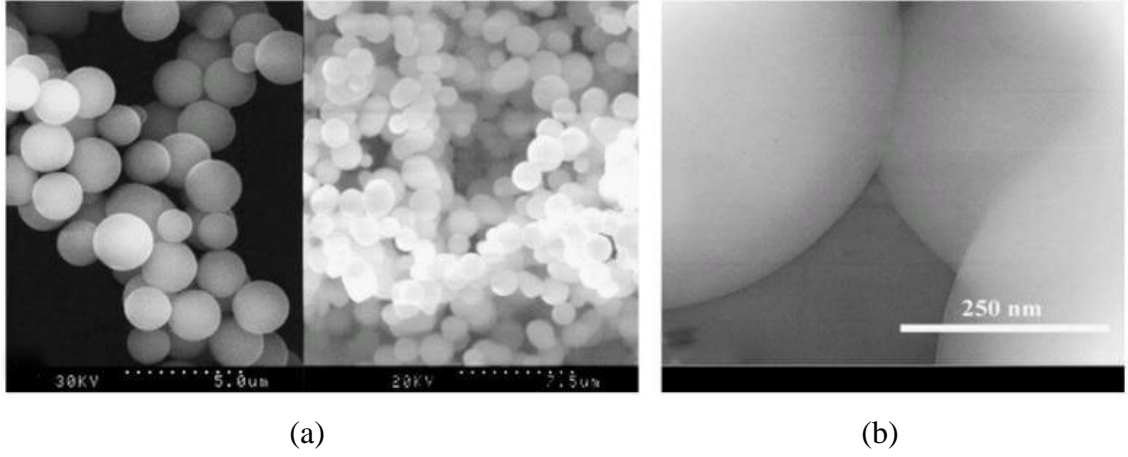
Silika aerojeller çapraz bağlı açık gözenekli bir yapıdadır. SiO_2 zincirlerinin iç yapısı, hava ile doludur. Bu nedenle, sıvılar malzeme içinden gözeneklerden gözeneklere akarak hareket etmektedir. Bu özellikler, silika aerojelleri mükemmel katalizör yapar ve katalizör destekleri olarak kabul edilmesini sağlar (Dorcheh ve Abbasi, 2008).

Gözenekli malzemeler için IUPAC sınıflandırmasına göre, çapı 2 nm ' den küçük gözenekler "mikro gözenekler", 2 ile 50 nm arasında çapa sahip olanlara "mezo gözenekler" ve çapı 50 nm ' den büyük olanlar "makro gözenekler" olarak adlandırılmaktadır. Silika aerojeller, her üç boyutta da gözeneklere sahiptir. Bununla birlikte, gözeneklerin çoğu mezo gözenek aralığındadır, nispeten az sayıda mikro gözenekler de vardır. Silika aerojellerin gözenek yapısı Şekil 8 ve Şekil 9'da gösterilmektedir (Dorcheh ve Abbasi, 2008).



Şekil 8. Silika aerogelin nano gözenekli SiO₂ ağ yapısı

Kaynak: Reim vd. (2005).



Şekil 9. Silika aerogellerin gözenek özellikleri a) SEM görüntüsü b)TEM görüntüsü

Kaynak: Dorcheh ve Abbasi (2008).

Silika aerogellerin gözenek hacmi, %99.9 oranındaki toplam hacminin %85'ini kapsamaktadır. Böylece silika aerogellerin yapısındaki yüksek gözeneklilik oranı ve gözeneklerin nanometrik boyutta olması, benzersiz fiziksel, termal, optik ve akustik özelliklere sahip olduğunu göstermektedir. Ayrıca silika aerogellerin yüksek gözenekli yapısı havadan daha düşük termal iletkenlik katsayısı değerine sahip olmalarını da sağlamaktadır. Bununla birlikte, silika aerogeller gözenekli olmaları sebebiyle düşük mekanik yapıda olmalarına neden olmaktadır (Baetens vd., 2010). Özellikle son yıllarda bu konuda malzemenin performansını artırıcı yönde farklı teknikler ve malzemeler kullanıldığı bilinmektedir. Örneğin; fiber matris ilavesi aerogellerin düşük yoğunluktan ve yüksek spesifik yüzey alanından ödün vermeden mekanik mukavemeti iyileştirme

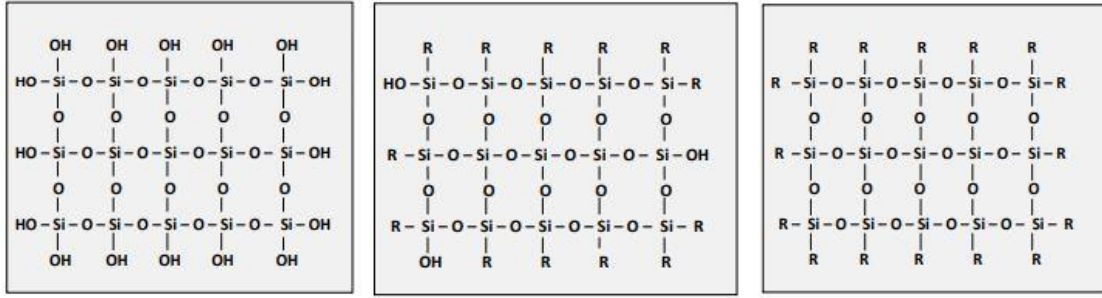
olanağına izin vermektedir. Ayrıca organik ve inorganik lifler, aerojellerin kırılgenlığını önlemek için kullanılan alternatif bir çözüm olarak bilinmektedir (Linhare, vd., 2019).

Silika aerojellerin gözenek özelliklerini ve yüzey alanını tespit etmek için Civalı Porozimetre (Mercury Intrusion Porosimetry-MIP), Isıl Porozimetre (Thermoporometry-TPM) ve Azot Adsorpsiyon/Desorpsiyon (Nitrogen Adsorption/Desorption-NAD) teknikleri kullanılmaktadır (Ülker, 2011). Tüm bu teknikler kapiler basınçların yüzeye uygulamasına dayanmaktadır (Scherer vd., 1995). Taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve geçirimli elektron mikroskobu (TEM), aerojellerin mikro yapısı (tanecik ve gözenek boyutları) hakkında bilgi sağlayabilmek için kullanılan diğer cihazlardır (Calisesi, 2017).

2.5.3. Silika Aerojellerin Hidrofobiklik Özellikleri

Silika aerojeller sentez sırasındaki koşullara bağılı olarak hidrofilik (su sevmeye) veya hidrofobik (su sevmeme) olabilirler. Su hidrofilik yüzeyleri kolayca ıslatabilirken, hidrofobik yüzeylerde boncuklanmaktadır (Anderson ve Carroll, 2011). Silika aerojelin yapısında bulunan suyun emiliminin sağlayan Si-OH grupları hidrofilikliğin ana kaynağıdır. Hidrofobik yüzeylerde ise silika hidrolize olmayan organik gruplarla bağlanarak, aerojelleri hidrofobik hale getirmektedir. Daha fazla sayıda hidrolize olmayan organik gruplar yüzeye bağlandığında, hidrofobikliğin daha büyük olmasını sağlamaktadır (Wagh ve Ingale, 2002).

Aerojel yapısında bulunan Si-OH grupları suyun adsorpsiyonunu teşvik etmektedirler. Si-OH grubunun çözücü ile reaksiyona girmesi sonucu hidrolitik olarak kararlı Si-R (R=CH₃) grupları ile değiştirilmesi suyun emilimini inhibe eder böylelikle nemden etkilenmeyen hidrofobik aerojeller oluşturulur (Wagh ve Ingale, 2002). Şekil 10'da hidrofilik, hidrofobik ve süperhidrofobik aerojellerin kimyasal yapılarının şematik gösterimi yer almaktadır.



(a)

(b)

(c)

**Şekil 10. Silika aerogelin kimyasal bağ yapılarının şematik gösterimi
(a) Hidrofilik, (b) Hidrofobik, (c) Süperhidrofobik**

Kaynak: Wagh vd. (2015).

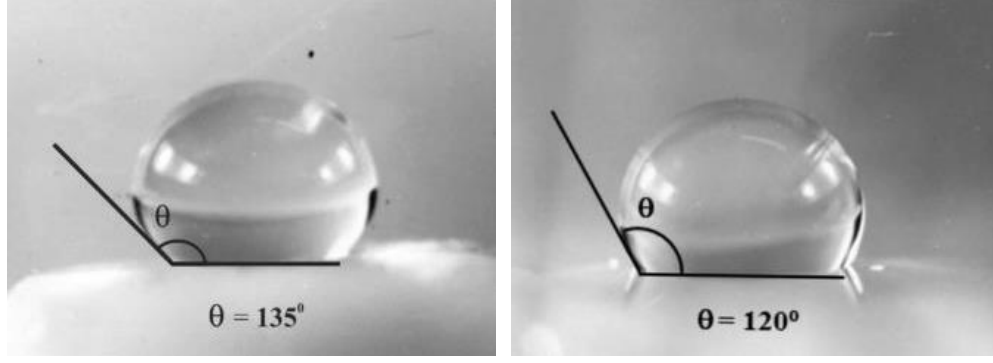
Hidrofobik silika aerogellerin sentezi 2 farklı şekilde sağlanabilmektedir. Birinci metod aerogelin jelleşme basamağında karışıma hidrofoblaştırıcı ajan ilave edilmesidir. İkinci metod ise ortam basıncında yapılan kurutma basamağından sonra silika aerojele yüzey modifikasyonu yapılarak hidrofoblaştırılması sağlanmaktadır (Dorcheh ve Abbasi, 2008; Cuce vd., 2014).

Silika aerogellerin hidrofilik veya hidrofobik karakterleri temas açısı gibi doğrudan teknikler kullanılarak tespit edilmektedir. Genellikle silika aerogel numunelerinde bulunan yapısal grupların varlığını göstermek ve bu grupların nispi sayısını ölçmek için Fourier döşümlü kızılötesi spektroskopisi (Fourier-Transform Infrared Spectroscopy-FTIR) ve Nükleer manyetik rezonans Spektroskopisi (Nuclear Magnetic Resonance Spectroscopy-NMR) kullanılarak spektroskopik çalışmalarla desteklenmektedir (El Rassy ve Pierre, 2005; Anderson ve Carroll, 2011).

Şekil 11’de silika aerogel üzerindeki su damlası görülmektedir. Silika aerogel üzerindeki su damlacığının temas açısı aşağıdaki formül ile hesaplanmaktadır.

$$\theta = \tan^{-1} (2h/w)$$

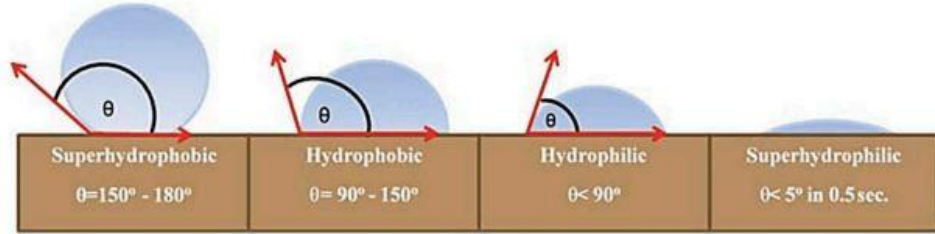
Burada h yüksekliği, w aerogel üzerine temas eden su damlacığının genişliğini temsil etmektedir (Rao vd., 2004).



Şekil 11. Silika Aerojeller üzerindeki su damlasının görüntüsü

Kaynak: Rao (2019).

Silika aerojelin hidrofilik, hidrofobik veya superhidrofobik özellikte olup olmadığını tespit etmek için, silika aerojelin bulunduğu yüzeye su damlatılır ve su ile yaptığı temas açısı ölçülür (Şekil 12). Temas açısı 90° 'den küçük olan yüzeyler hidrofiktir ve su yüzeyde yayılım gösterir. Temas açısı 90° ile 150° arasında olan yüzeyler hidrofobiktir, su yüzeyde damlacık halinde kalır, yayılım göstermez. Temas açısı 150° 'den büyük olan yüzeylerse süperhidrofobiktir, su yüzeyde tutanaz ve damlacık olarak akar (Ahmad vd., 2018).



Şekil 12. Su damlacığının hidrofilik, hidrofobik, superhidrofobik yüzeylerde temas açısının şeması

Kaynak: Alharbi vd. (2016).

Silika aerojeli hidrofobiklik derecesini değerlendirmek için silika aerojeli nemli bir ortama maruz bırakmak ve zamanla aerojel kütlesindeki artışını gözlemlemek kullanılan bir yöntem biçimidir. Buna bağlı olarak silika aerojeller hidrofilik ise adsorbe edilen su nedeniyle kütlesi önemli ölçüde artacaktır. Nemli hava silika aerojele difüze olurken, su molekülleri reaksiyona girmemiş Si-OH gruplarıyla güçlü bir şekilde etkileşime girecektir. Böylelikle, gerçekten hidrofobik bir silika aerojelin kütlesi, nemli havaya maruz kaldığında değişmeden kalması gözlemlenecektir. Bu çalışmalar, silika

aerojelleri kontrollü nemli bir ortama ($>96\%$ nem) yerleştirerek veya aerojellerin süre (1-6 ay) doğrudan su üzerinde yüzmesine izin vererek gerçekleştirilmektedir (Anderson ve Carroll, 2011). Rao ve Haranath (1999), Rao vd. (2003) araştırmalarında silika aerojelleri 3-6 ay boyunca doğrudan su üzerinde yüzdürerek su alma çalışmaları yapmışlardır. Sonuç olarak kütlede %2'den daha az bir artış oranının ölçülmesi aerojelin hidrofobik olduğunun bir göstergesi olarak kabul edilmiştir. Schwertferger vd. (1992), Hüsing vd. (1995) çalışmalarında, 40 gün boyunca 20 °C'de %96 nem ortamında hidrofilik ve hidrofobik aerojellerin davranışlarını izlemişlerdir. Hidrofilik aerojellerin, ilk beş gün içinde %10-60'lık kütle artışı sergiledikleri tespit edilmiştir.

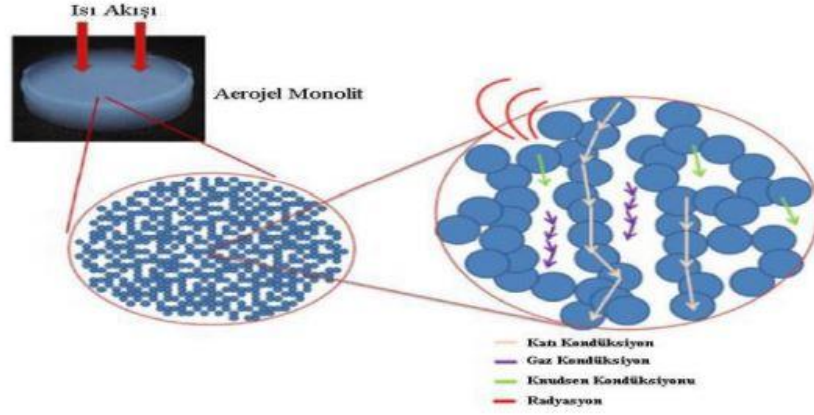
Öte yandan silika aerojellerdeki hidrofobiklik özelliği; aerojelin basınç mukavemetini ve sertliğini iyileştirdiği aynı zamanda nemli ve ıslak ortamlardan da silika aerojeli koruduğu gözlemlenmiştir (Jiang vd., 2004). Silika aerojellerin hidrofobikliği ayrıca organik çözücülerin adsorpsiyon kabiliyetini iyileştirir ve silika aerojellerin polimer ile kompozitlerde kullanımı kolaylaştırmaktadır (Shi vd., 2010). Superhidrofobiklik özelliği ise, silika aerojelin gözenekli yapılarının ve termal iletkenliklerinin korunması için önemli bir etken olduğu bilinmektedir.

2.5.4. Silika Aerojellerin Termal İletkenlik Özellikleri

Silika aerojelin yüksek gözeneklilik ve düşük yoğunluk özelliğinin dışında en etkileyici özelliği düşük termal iletkenliğe sahip olmasıdır (Gurav vd., 2010). Bu özelliği ile silika aerojel içerikli ürünlere gün geçtikçe ilgi artmış ve silika aerojel geniş kullanım alanları bulmuştur (Deconinck, 2014; Masera vd., 2017; Fantucci, 2018). Silika aerojeller çok küçük (1-10%) katı silika fraksiyonuna sahip oldukları için daha düşük katı iletkenlik gösterirler, dolayısıyla daha düşük ısı iletkenlik katsayısına sahiplerdir (Dorcheh ve Abbasi, 2008; Gurav vd., 2010). Kistler, silika aerojellerin termal iletkenliğinin hava ortamındaki basınçla ve ortam sıcaklığında 0.02W/mK değerinde olduğunu, hava ortamındaki basıncın boşaltılması ile termal iletkenliğin 0,01W/mK değerine kadar azaldığını ifade etmiştir (Kistler, 1932; Dorcheh ve Abbasi, 2008; Patel vd., 2009).

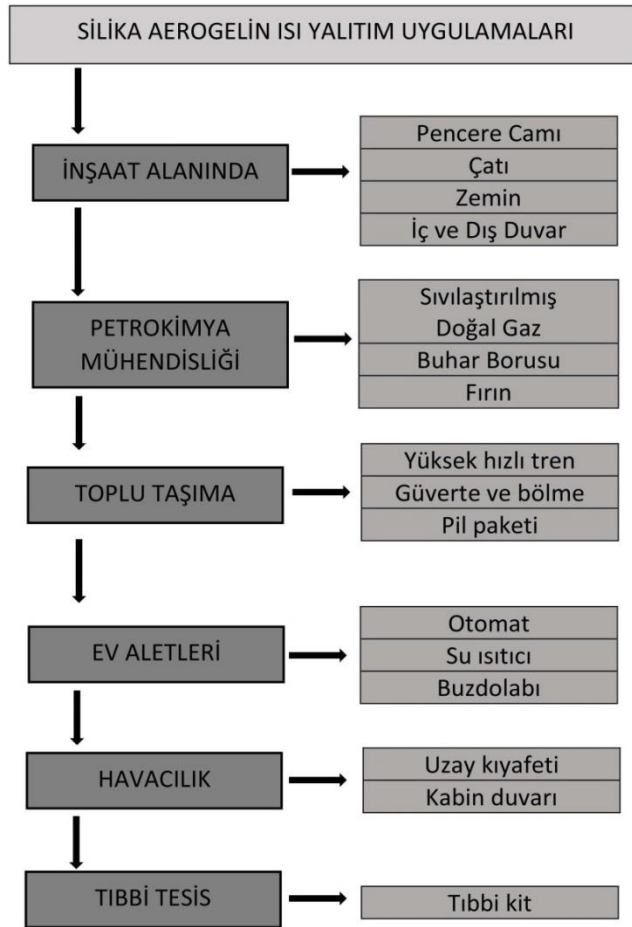
Termal enerjinin yalıtkan bir malzemenin geçişi üç mekanizma ile gerçekleşmektedir. Katı iskeletinden kaynaklı iletkenlik, gaz moleküllerindeki iletkenlik ve radyoaktif (kızılötesi) iletkenliktir. Bu üç bileşenin toplamı, bir malzemenin toplam termal

iletkenliğini vermektedir (Al-Ajlan, 2006; Patel vd., 2009). Şekil 13’de monolitik aerojel malzemenin ısı transfer mekanizması verilmiştir.



Şekil 13. Aerojel ısı transfer mekanizması

Kaynak: Kayır (2021).



Şekil 14. Silika arojelinin ısı yalıtım uygulamaları

Kaynak: Dorcheh ve Abbasi (2008).

Termal iletkenlik, mimari malzemenin termal yalıtım performansını ölçmek ve analiz etmek için önemli bir özelliktir. Ayrıca, yüzeylerdeki sıcaklık geçişinde oluşan hızın değeri olarak da bilinmektedir. Sıcaklık, mimari yapılarda ısı farkı bulunan alanlarda sıcaklığın yüksek olduğu taraftan düşük olduğu tarafa doğru geçme yönelimi göstermektedir. Bu geçişin en az düzeyde olması için mekanlarda kullanılan yapı malzemelerinin termal iletkenlik özelliği büyük öneme sahiptir (Gomes, vd., 2018).

Silika aerojellerin ultra ince, hafif ve gözenekli yapıya sahip olmaları kompozit malzemeye dahil edildiklerinde, malzemenin toplam yoğunluğu ile bina kabuğunun ağırlığında bir azalmaya neden olmaktadır. Ayrıca düşük termal iletkenliklerinden dolayı termal dirençte de bir artışa yol açtığı bilinmektedir (Dorcheh ve Abbasi, 2008).

Silika aerojeller, iyi termal performansa sahip beton yapılar yapmak için de kullanılmıştır. Silika aerjel ile güçlendirilmiş bir beton, silika aerjel granüllerinin yüksek mukavemetli bir çimento matrisine gömülmesiyle elde edilir. Böylelikle geleneksel betonun faydaları (basınç mukavemeti, kalıplanabilirlik) ile bir ısı yalıtım malzemesinin özellikleri birleştirilmiştir (Ratke, 2008; Buratti, 2016).

Buratti vd. (2014) çalışmalarında yenilikçi granül silika aerjel esaslı sıvalar geliştirmişlerdir. Ürettikleri granül silika aerjel sıvalarla termal iletkenlik katsayısının düşürülmesine yönelik uygulamalar ve termal performans değerlendirmesi yapmışlardır. Çalışma kapsamında granül silika aerjel malzemesi doğal sıva ile farklı oranlarda karıştırılmıştır. Hazırlanan karışım ile doğal kireç ve silika aerjel kullanımı sayesinde çok düşük ısı iletkenliğine sahip nitelikte oldukça gözenekli, hafif ve yalıtkan bir malzeme elde edilmiştir. Farklı silika aerjel yüzdeleri dikkate alınarak hazırlanan karışıma termal iletkenlik analizi yapılmıştır. Silika aerjel içermeyen doğal sıva, yaklaşık 0,50 W/mK ısı iletkenliğine sahipken, hacim olarak yaklaşık %90'lık granül silika aerjel takviyesi ilave edildiğinde sıva karışımının termal iletkenliği 0,050 W/m.K'ye düştüğü tespit edilmiştir. Bu değer, granül silika aerjel yüzdesini artırarak, yaklaşık 0,018-0,020 W/mK değerine kadar ulaşılacağı ön görülmüştür.

Masera vd. (2017) yenilikçi çözüm geliştirmek için yaptıkları EASEE araştırma projesi ile iç mekan da sıvaya alternatif olarak hafif aerjel bazlı duvar kağıdı uygulaması yapmışlardır. Kullanılan ürün silika aerjel emdirilmiş mat tekstil ve terbiye kumaşından üretilmiştir. Çalışmada, uygulanan yalıtım malzemesinin geleneksel

duvarcılıkla uyumlu olup olmadığını değerlendirmek için termal performans ile su buharı geçirgenliği analiz edilmiştir.

2.5.5. Silika Aerojellerin Mekanik Özellikleri

Silika arojeller yüksek gözenekliliğe sahip malzemelerdir. Bu özellik arojellerin düşük mekanik mukavemete sahip olmasına neden olmaktadır (Baetens vd., 2010). Gelişen teknoloji ile birlikte araştırmacılar, silika arojellerin mekanik özelliklerinin düşük olma dezavantajını gözeterek silika arojellere polimer desteği sağlamış, silika arojelleri fiber matris içine emdirmiş (Ülker, 2011) ve dokunmamış lifler (karbon, mineral veya cam lifler) kullanarak en aza indirmişlerdir (Berardi, 2017).

Sebdani vd. (2021) göre silika arojel endüstrisi mekanik dezavantajların üstesinden iki ana yolla gelmektedir. İlk yol olarak mekanik mukavemet kazandırmak için bir matrise dahil edilen yarı-bitmiş bir ürün olarak partiküllü silika arojel (toz veya granül) üretimi yapılmış, ikinci yol ise dokunmamış kumaşlara bir silika sol veya silika arojel karışımı emdirilmiştir. Böylelikle kullanım ve mekanik stabiliteyi geliştiren ince bir lif örtüsüne silika arojel dahil edilmesi mekanik mukavemeti arttırmıştır. Endüstriyel olarak daha güçlü yapıda silika arojelin hiçbiri şuanda üretimi mevcut değildir, ancak yeni kurulan şirketler aracılığıyla Aerogel Technologies (ABD) ve TIEM Fabrikası (Japonya) ticarileştirme çalışmaları artmaktadır (Sebdani vd., 2021).

Alçı veya betondan üretilen arojel bazlı alçı levhaların termal direnci arttırdığı yönde bazı araştırmalar yapılmıştır (Stahl, 2012; Berardi, 2017). Ayrıca silika arojel bazlı alçı levhaların, düşük yoğunluklu fiber panellerden daha az esnek yapıya sahip olduğu bilinmektedir. Bu dezavantaj nedeniyle silika arojelin mekanik özellikliğini geliştirilmek için silika arojel bazlı alçı levhalar takviye malzemeler ile güçlendirilmiştir (Westgate vd., 2018).

2.5.6. Silika Aerojellerin Optik Özellikleri

Silika arojeller, düşük yoğunluğa, düşük termal iletkenliğe ve mükemmel yangın ve akustik dirence sahip olmalarının yanı sıra etkili optik geçirgenlik özellikleri ile dikkat çekmektedir. İyi optik özellikleri nedeniyle silika arojeller 1980'lerden beri pencere sistemlerini üretmek için düşünülmüştür. Yapılan araştırmalar sonucunda pencerenin

camları arasındaki boşlukta bulunan silika aerogel yüksek ısı direnci ve ışık geçirgenliği sağladığı kanıtlanmıştır (Neugebauer, 2014).

Emmerling vd. (1994) silika aerogellerin optik özelliklerini etkili hale getiren faktörlerden birinin de sentezleme aşamasında kullanılan kimyasal malzemelerin içerikleri olduğunu belirtmiştir. Karakterizasyon çalışmaları sırasında yapılan analizler sonucunda aerogellerin sentez sırasında güçlü bazlarla katalize edilmesi yoğunluk değerini 200 kg/m^3 olmasını sağlayarak, optik geçirgenlik özelliğini iyileştirdiğini saptamıştır. Silika aerogel sentezinin başlangıç malzemesi olan sodyum silikat ile üretilen aerogeller de birtakım testler yapılmıştır. Bu testler sonucunda, 20 mm kalınlığındaki hazırlanan aerogel numunesi için yalnızca %50-60 civarında ışık geçirgenliği olduğu gözlemlenmiştir (Emmerling vd., 1994). Pajonk vd. (1997) Ayrıca sentez sırasında parametreleri değiştirilerek üretilen silika aerogelin şeffaf veya opak özellikte olabileceği de vurgulanmıştır (Pajonk vd., 1997).

Silika aerogel camlar, iki şeffaf cam levha arasındaki hava boşluğunun silika aerogel ile doldurulması sonucunda üretilmektedir. Bu durum biçim olarak geleneksel çift camlara da benzemektedir (Schneide, 2011). Monolitik ve granüler silika aerogeller olmak üzere iki tip aerogel mevcuttur. Monolitik silika aerogeller, granüler olanlardan daha yüksek güneş geçirgenliğine sahiptir; örneğin, 10 mm monolitik yarı saydam silika aerogel camları 0,8'e kadar güneş geçirgenliği gösterirken, granül silika aerogel camların maksimum güneş geçirgenliği 0,5 civarında olduğu belirtilmiştir (Berardi, 2015). Başka bir çalışmada Buratti ve Moretti (2012) cam sistemlerde silika aerogel kullanılabilirliğini araştırmışlar ve çeşitli aerogel cam sistemlerini termal ve aydınlatma performanslarına göre karşılaştırmışlardır. Çalışmanın sonuçlarına göre; monolit aerogel pencerelerin ısı kayıplarında %55 ve ışık geçirgenliğinde %25 azalma gösterirken, granül aerogel pencerelerin ısı kayıplarında %25 ve ışık geçirgenliğinde %66 azalma gösterdiğini görülmüştür (Buratti ve Moretti, 2012). Monolitik aerogel cam granül aerogel cama göre daha yüksek performans göstermektedir. Ancak monolitik aerogel camın kırılgen yapısı zayıf mekanik mukavemete sahip olmasına neden olmaktadır. Ayrıca yüksek üretim maliyetleri nedeniyle granül silika aerogelin daha düşük ışık geçirgenliğine sahip olmasına rağmen, cam sistemlerine sadece granül aerogel dahil edilmiştir (Gao vd., 2016).

Aerojel camlar tipik olarak yarı saydam, opak bir cam teknolojisine sahiptir ve engelsiz bir dış görünüm sağlamazlar. Geleneksel şeffaf cam pencerelerin aerojel camlarla değiştirilmesi, engelsiz bir dış görünümün kaybolmasına neden olarak kullanıcı konforunu etkiler. Bununla birlikte Şekil 15’de gösterildiği gibi aerojel camlar, görünür gün ışığını yaşam alanı içinde eşit bir şekilde yayılmasını sağlayarak, şeffaf camlarda görülen kamaşma gibi gün ışığı sorunlarını en aza indirmektedir. İç mekanlarda yüksek kaliteli dağınık ışık, kullanıcı konforu için önemlidir. Bu nedenle, silika aerojel camlar binalarda gün ışığı yönetimi için ilginç bir çözüm olarak dikkat çekmektedir (Gao vd., 2016).



Şekil 15. Karton ev modeli kullanılarak gün ışığı yönetimi ile (a) aynasal çift cam (b) dağınık aerojel cam arasında karşılaştırma

Kaynak: Gao vd. (2016).

Silika aerojel camların benzersiz özelliği, onları farklı amaçlar için çok işlevli bir yapı bileşeni haline getirmektedir. Örneğin, aerojel camlar bina kabuğunda pencere, duvar veya çatı olarak kullanılmaktadır. Bu bağlamda, aerojel camların ek bir özellikten ziyade binanın önemli bir parçası haline gelmesi için entegre bir tasarım süreci uygulanmalıdır. Şekil 16’daki yapıların cephe uygulamaları için aerojel ve geleneksel şeffaf pencereler bir arada kullanılmıştır. Buda pencerenin bazı bölümlerinde net bir dış görünüm sağlamak için dönüşümlü olarak kullanılmıştır (Berardi, 2015).



(a)

(b)

Şekil 16. Granül dolgulu aerojel pencerelerin geleneksel şeffaf pencerelerle değiştirildiği iki inşa proje örneği. (a) Detroit Sanat Okulu, (Michigan, ABD) (b) SUNY Stony Brook Üniversitesi Nobel Salonları (Newyork, ABD)

Kaynak: Berardi (2015).

2.5.7. Silika Aerojellerin Akustik Özellikleri

Ses dalgası bir malzemeye çarptığında, kısmen yansıtılır, iletilir ve emilir. Ses emici malzemeler genellikle düşük yoğunluklu ve gözeneklidir. Ayrıca sesin çoğunu emebilen orta düzeyde hava akımı direncine sahip olup sesin açık boşluklarına veya kanallarına girmesine izin vererek ses yansımalarını da önlemektedir (Ramamoorthy, 2018). Silika aerojeller hacimce yaklaşık %99.8'i hava dolu gözeneklerden oluşan, düşük yoğunluklu malzemelerdir. Silika aerojeller, iyi ısı yalıtım performansının yanı sıra kullanışlı akustik özellikleri ile de ön plana çıkmaktadır. Silika aerojellerin ses emilimi ve yalıtımı, büyük ölçüde malzeme hazırlama yöntemine, silika aerojel yoğunluğuna ve gözenek yapısına bağlıdır. Bir silika aerojeldeki ses zayıflaması, akustik dalgaların art arda gaz fazından katı faza yayıldığı için enerji kaybının fraksiyonuna dayanır. Bu da ses dalgalarının genliğini ve hızını azaltarak yavaşlamasına ve daha hızlı dağılmasına neden olur. Bu durum, silika aerojeli akustik yalıtım için en iyi malzeme haline getirmektedir (Merli vd., 2018). Sebdani vd. tarafından yapılan araştırmalar da silika aerojelin gözeneklerindeki sesin yayılma hızını gözeneksiz silika aerojel için yaklaşık 5.000 m/s olarak ölçmüş, gözenekli silika aerojel için ise bu değer 100 m/s olarak belirlenmiştir. (Sebdani vd., 2021). Ayrıca ortalama 80 µm partikül çapına sahip silika aerojellerin yayılma hızı 60 m/s'ye kadar indiği bilinmektedir (Lefebvre vd., 2016). Böylelikle silika aerojel için sesin hızını etkileyen ana parametrelerin yoğunluk,

esneklik, hava basıncı, sıcaklık ve gözenek boyutları olduğu belirlenmiştir (Handojo, 2018).

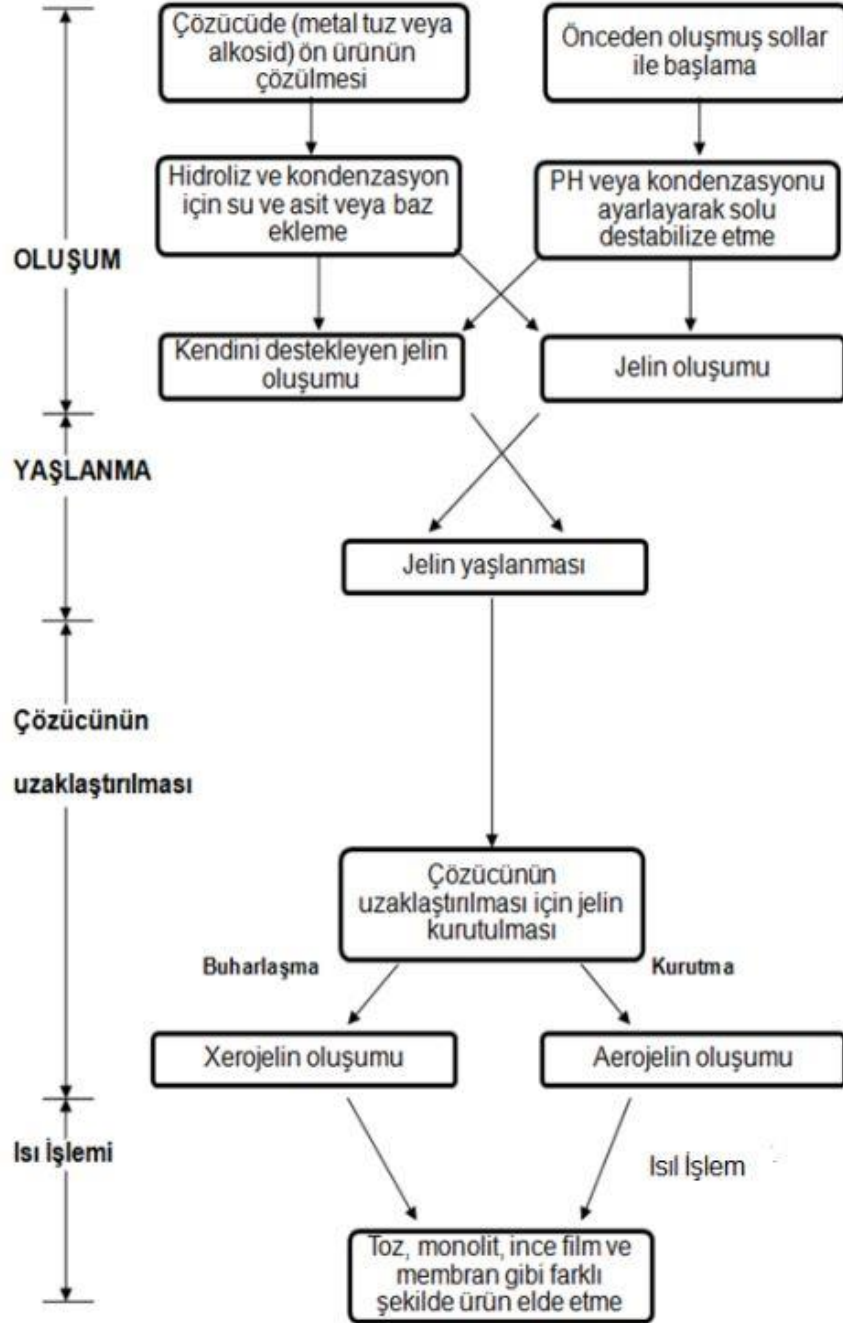
Taş yünü ve köpük gibi geleneksel ses emiciler, binalarda ses emilimi ve yalıtımı için kullanılmaktadır. Ancak endüstri ve toplum, avantajlı ses emme/yalıtma özelliklerine ve iyi ısı yalıtımına sahip alternatif, çevre dostu malzemeler aramaktadır (Chandradass vd., 2008). Silika aerojel bu özellikleri ile etkili akustik yalıtkan malzemeler olarak ön plana çıkmaktadır. Gronauer ve Fricke (1986) aerojeldeki düşük ses hızının hava-iskelet etkileşimlerinden mi yoksa düşük Young modüllerinden mi kaynaklandığını araştırdılar. Bu tür etkileşimlerin, işitsel aralıktaki ses dalga boylarına kıyasla lifli yapılardaki küçük geleneksel ses yutuculardan önemli olduğu bilinmektedir. Ses yayılımının gözenekli sistem içindeki hava yoluyla değil, iskelet yoluyla gerçekleştiği sonucuna vardılar. Bu nedenle düşük Young modülleri, havadan daha küçük ses hızlarının temel nedeni olduğunu tespit ettiler (Sebdani vd., 2021).

Schwertfeger vd. (2003) yapı kaynaklı veya darbe sesinin sönümlenmesi için silika aerojel-polimer kompozitlerin kullanımını patentlemişlerdir. Çalışmalarında, belli bir silika aerojel yüzdesi ile polivinilbütiral (PVB) veya dispersiyon tutkalı karıştırıldı, ardından 18 mm'lik bir tabaka kalınlığı ve hacimce %90 hidrofobik silika aerojel granül için darbe ses yalıtımı 24 dB'ye kadar iyileştiren ısı işlem uygulandı (Schwertfeger vd., 2003). Böylelikle, nispeten düşük kalınlıkta ses yalıtım malzemesi ile önemli bir akustik iyileştirme sağlamışlardır. Bu uygulama ile eski binaların mekanik gerilimlerini zemin kaplamasından ayırarak bina tadilatlarının önemli zorluklarını çözmek için etkili bir araç olduğu düşünülmüştür (Schmidt ve Schwertfeger, 1998).

Dong vd. (2009) değişken konsantrasyonlar da silika ve polidimetilsiloksan (PDMS) içeren kompozit aerojeller üretti ve bunların ses absorpsiyon katsayılarını bileşimin ve ortalama gözenek boyutunun bir fonksiyonu olarak değerlendirdiler. Bu çalışmada geliştirilen aerojellerin akustik davranışı, ticari olarak temin edilebilen birçok gözenekli akustik emiciden farklı olduğu görüldü. Bu aerojellerin davranışı, aerojelin elastik özellikleri tarafından kontrol edilen tabaka zarının davranışına benzediğini gözlemlediler (Dong vd., 2009).

2.6. Silika Aerojelin Sentezi

Bu bölümde aerojel çeşitlerinden biri olan silika arojelin sentezi hakkında bilgi verilecektir. Silika arojeller sol-jel yöntemi ile sentezlenmektedir. Şekil 17’de sol-jel yöntemi ile sentezlenen ürünlerin şematik gösterimi verilmektedir.



Şekil 17. Silika arojel sentezinde kullanılan sol-jel yöntemin basamaklarının şematik gösterimi

Kaynak: Güler (2012).

Sol-jel Yöntemi

Sol-jel yönteminin son yirmi yılda hızlı gelişimi, gözenekli malzemelerin sentezinde hızlı ilerlemelere neden olmuştur. Sol-jel yöntemi bir sistemin sıvı bir "sol" den katı bir "jel" fazına geçişini içermektedir (Gurav vd., 2010). Sol-jel prosesi; jel hazırlama, hidroliz, kondenzasyon, jelleşme, yaşlandırma ve kurutma basamaklarından oluşmaktadır. Jel hazırlama basamağında silis jel elde edilmektedir. Sol, silika kaynaklı bir çözelti ile hazırlanır ve katalizör ilavesi ile jelleşme meydana gelir. Sonrasında alkoksit su eklenmesi ile hidroliz basamağı gerçekleşir. Hidroliz ve kondenzasyon reaksiyonları solün akışkanlığa karşı direncini, jel yapısı oluşana kadar düşürür. Bir sonraki basamak jelin yaşlanmasıdır (Dorcheh ve Abbasi, 2008). Aslında, ıslak jelin yaşlanması, jelin gücünü artırarak mekanik olarak daha güçlü bir inorganik ağ oluşmasını sağlamaktadır (Lin vd., 2021). İlk aşamada hazırlanan jel, ana solüsyonunda yaşlandırılmaktadır. Uygulanan bu eskitme işlemi jeli güçlendirir, böylece kurutma adımı sırasındaki büzülme minimum seviyeye iner. En son basamak jelin kurutulmasıdır. Bu adımda jel kurutularak gözenek sıvısından arındırılmaktadır. Jel yapısının çökmesini önlemek için kurutma işlemi özel şartlar altında gerçekleştirilmek üzere yapılmaktadır. Silika aerojel üretiminin tüm yöntemleri genel olarak bu adımları içermektedir. Nihai ürün yapısını etkilemek için ek prosedürler de gerçekleştirilebilir (Dorcheh ve Abbasi, 2008). Tablo 4'te silika aerojel sentez basamaklarında etki eden parametreler verilmektedir. Aşağıdaki bölümlerde silika aerojel sentezinde kullanılan basamaklar ve etkili olan parametreler ayrıntılı bir şekilde incelenmektedir.

Sol-jel yönteminin basit, etkili, ekonomik bir işlem olması, aynı zamanda yüksek kalitede ve performans da malzeme üretimi sağlaması sahip olduğu avantajlarından bir kaçıdır (Gurav vd., 2010). Sol-jel prosesinin performans özellikleri birçok faktöre bağlı olarak değişmektedir. Bu faktörler; ön başlatıcının doğası ve konsantrasyonu, çözücünün türü ve ortamın asiditesi, çözücüdeki her türün konsantrasyonu, katkıların türü ve konsantrasyonu, karışımın yaşlanma zamanı, sıcaklık, uygulanan ısı işlemlerdir. Sol-jel matriksinin sahip olduğu kendine ait özellikleri birçok değişkenden etkilenmektedir. Yüzey alanı, gözeneklilik, polarite ve rijitlik, hidroliz ve kondenzasyon reaksiyonları, öncü seçimi, su-öncü mol oranı (R), çözücüler, sıcaklık, basınç, yaşlanma, kurutma ve kalsinasyon koşulları başlıca değişkenlerdir (Toygun vd., 2013).

Tablo 4. Sol-jel sürecinde çeşitli basamaklarda etkili olan parametreler

Basamak	Amaç	Önemli Parametreler
Kimyasal Çözelti	Solun Oluşumu	<ul style="list-style-type: none">✓ Ön ürün çeşidi✓ Çözelti çeşidi✓ pH✓ Su içeriği✓ Ön ürün konsantrasyonu✓ Sıcaklık
Yaşlanma	Jel özelliğinin değişikliklere uğramasına izin vermek	<ul style="list-style-type: none">✓ Süre✓ Sıcaklık✓ Sıvı gözeneginin Kompozisyonu✓ Yaşlanma oranı
Kurutma	Jelden çözücünün uzaklaşması	<ul style="list-style-type: none">✓ Kurutma yöntemi✓ Sıcaklık ve ısıtma hızı✓ Basınç ve basınç tutma oranı✓ Süre
Piroliz	Katının kimyasal/fiziksel özelliklerini değiştirme	<ul style="list-style-type: none">✓ Sıcaklık ve ısıtma zamanı✓ Süre✓ Gazlı ortam

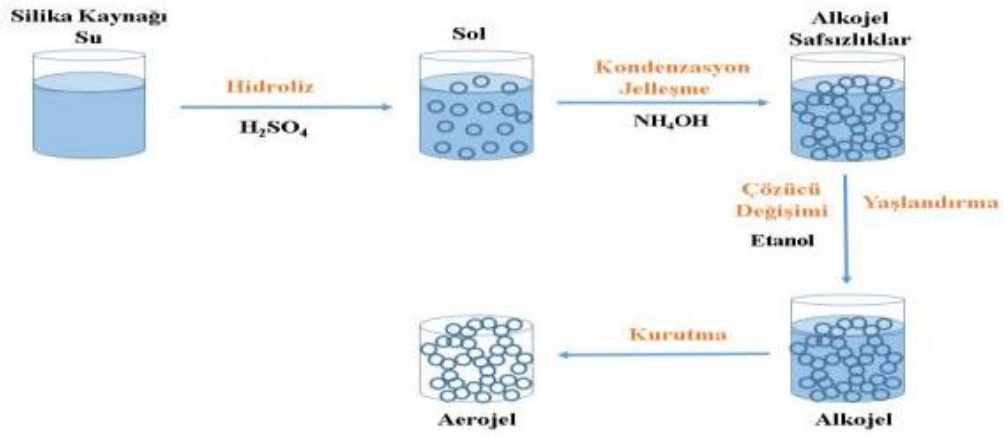
Kaynak: Güler (2012).

Sol-Jel Yöntemi Basamakları

1. Jel Hazırlama

Jel hazırlama basamağı birbirini izleyen hidroliz ve yoğunlaşma reaksiyonlarından oluşmaktadır. Bu işlemler jelin oluşumunu sağlamaktadır. Silika öncüleri sol-jel yönteminin başlangıç malzemelerinin homojen çözeltileridir. Sol-jel sentezi su ile karıştırılmış öncünün hidrolizi ile başlamaktadır. Hidroliz reaksiyonları katı bir ağa yol açan katalizör ilavesiyle hızlandırılmaktadır. Hidroliz için 3 prosedür önerilmektedir. Bunlar, asit katalizi, baz katalizi, iki aşamalı katalizdir (Ülker, 2011). Asit katalizi silika sollarında dolaşmış doğrusal veya rastgele dallanmış zincirlerin oluşturulduğu bir yapıdan

oluşurken, baz katalizi sol içinde tek biçimli parçacıklardan oluşan bir ağ yapıdadır. Asit katalizi HCl, H₂SO₄, HNO₃, HF, oksalik, formik ve asetik asitlerle yapılmaktadır. Sulu çözeltinin pH'ı düşük olduğunda jelleşme süreleri genellikle daha uzun olduğu yapılan çalışmalar sonucunda tespit edilmiştir. Bununla birlikte, baz katalizi ile sol içinde tek tip parçacıklardan oluşan bir ağ oluşturmak kolaydır ve ortaya çıkan gözenek hacmi oldukça büyüktür (Dorcheh ve Abbasi, 2008). Şekil 18'da iki sol- jel yöntemi ile iki aşamalı asit baz katalizörü içeren silika aerojel sentez basamakları verilmektedir (Kayır, 2021).



Şekil 18. Asit ve baz katalizörlü sol-jel yöntemi şeması

Kaynak: Kayır (2021).

Brinker vd., (1984) pH'ın jelleşme süresi üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Rao vd., (2005) hazırlanan çözeltinin silika sol'üne katalizör olarak HCl (asit) yerine NH₄OH (baz) eklenmesi yoğunlaşma reaksiyonlarının hızını artırabildiğini ve jelleşme süresini azaltabildiğini gözlemlemişlerdir. Hazırlanan sol'ün jelleşme sürelerini viskozite ölçümü ile tespit etmişlerdir. Genel olarak, tek aşamalı asit katalizli silika aerojel sentezi ile zayıf dallanmış ve mikro gözenekli yapılar oluşurken, baz katalizi veya iki aşamalı asit-baz işlemleri çapraz bağlanmayı artırarak mikro gözenekliliğin azalmasına ve silika jellerde daha geniş gözeneklerin daha geniş dağılımına yol açmaktadır (Rao vd., 2004; Rao ve Haranath, 1999; Rao ve Bhagat, 2004, Karayılan, 2014).

Silika aerojel sentezinde farklı başlangıç öncülerinin kullanılması malzemenin özelliklerinde farklılığa neden olmaktadır. Tetraetilortosilikat (TEOS), tetrametilortosilikat (TMOS) ve polietoksidisiloksan (PEDS) gibi farklı öncüler silika aerojel malzemesinin şeffaflığını, yekpareliğini, termal iletkenliğini ve gözenekliliğini

etkilemektedir (Şekil 19). Ayrıca reaktif olmayan alkil grubu silika aerojellerin esnekliğini artırarak (Karayılan, 2014) başlangıç öncülerinde bir veya birden fazla kullanılan reaktif olmayan hidrofobik grup silika aerojellerin hidrofobik yapıda olmasını sağlamaktadır (Rao vd., 2003; Rao vd., 2003, Karayılan, 2014).

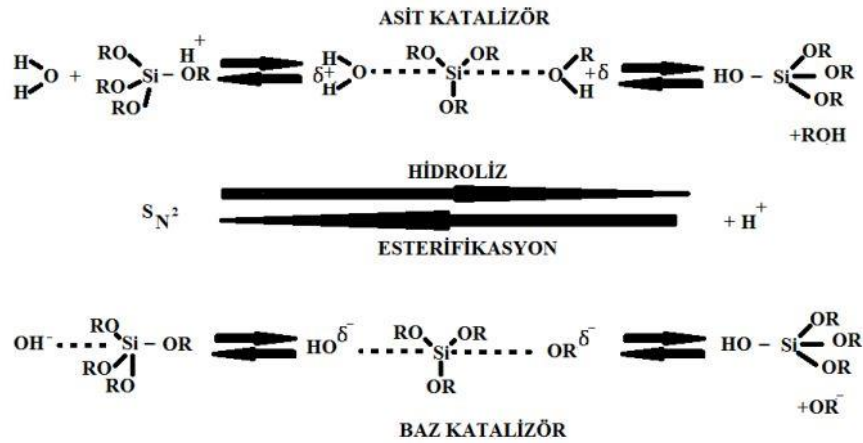


Şekil 19. TEOS ve TMOS silika öncüleri

Kaynak: Karayılan (2014).

2. Hidroliz

Hidroliz sol-jel yönteminin ilk aşamasıdır. Farklı başlangıç maddelerinden hazırlanan homojen çözeltiye alkoksit su eklenerek karıştırılması hidroliz işlemi başlatmaktadır. Hidrolizin ilk basamağında çözeltiye asit veya baz katalizörünün ilavesi, hidroliz prosesini hızlandırmaktadır (Toygun vd., 2013). Şekil 20’de silisyumun asit ve baz katalizörlerindeki hidroliz mekanizması verilmektedir (Mermer, 2018).

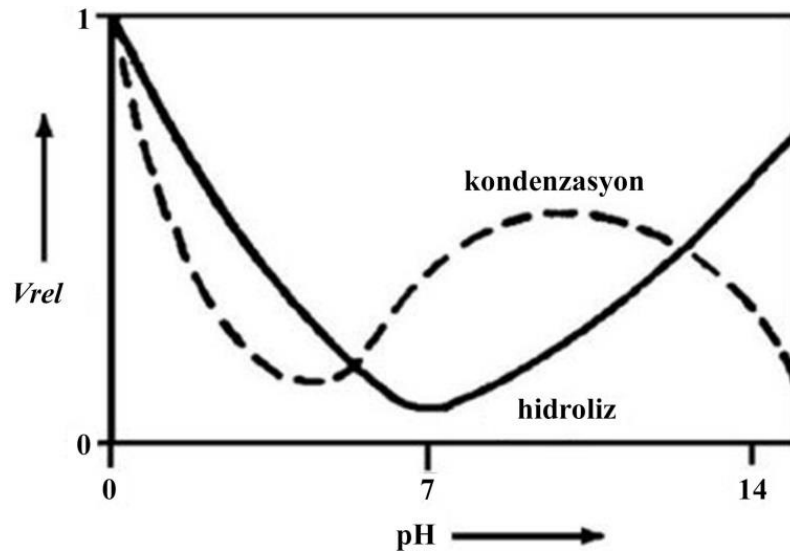


Şekil 20. Silisyumun asit ve baz katalizörlerindeki hidroliz mekanizması

Kaynak: Mermer (2018).

Hidroliz hızını; sıcaklık, su miktarı, çözücü seçimi, çözücünün derişimi, katalizör seçimi gibi faktörler etkilemektedir (Güler, 2012). Alkoksi grupları hidroksil gruplarından daha fazla elektron verme eğilimindedir. Bu nedenle reaksiyonda asit katalizörü kullanıldığında pozitif yüklü iyon geçişi ile daha fazla alkoksi gruplarının hidroksil grupları ile yer değiştirmesi anlamına gelmektedir. İyon geçişi reaksiyonun hızının azalmasına ve daha az kararlı hal almasına neden olmaktadır (Ülker, 2011). Reaksiyonda kullanılan baz katalizörü negatif yüklü iyon geçişi için daha fazla OH grubunun daha kararlı hal aldığı görülmüştür. Bu durum asit katalizörlüğindeki etkinin tam tersidir (Mermer, 2018).

Sol-jel prosesinde reaksiyona katalizör ilave edilmeyerek de hidroliz basamağı gerçekteşmektedir. Ancak katalizör kullanımı hidroliz reaksiyonunun daha hızlı ve tam olarak ilerlemesini sağlamaktadır. Bu nedenle çözeltilerin pH'ı, kullanılan katalistin yapısı ve konsantrasyonu hidroliz ve kondenzasyon işlemlerini etkilemektedir (Toygun vd., 2013). Şekil 21'de pH'ın hidroliz hızı arasındaki bağlantı gösterilmektedir. Düşük pH değerinde kondenzasyon ve hidroliz reaksiyonları hızlanarak devam etmektedir. Ancak hidroliz oranı, kondenzasyon reaksiyonlarından daha yüksektir. Nötr (7) pH değerinde hidroliz hızının minimum düzeyde olduğu görüldüğü anda kondenzasyon hızı kademeli olarak artmaya başlamaktadır (Ülker, 2011).

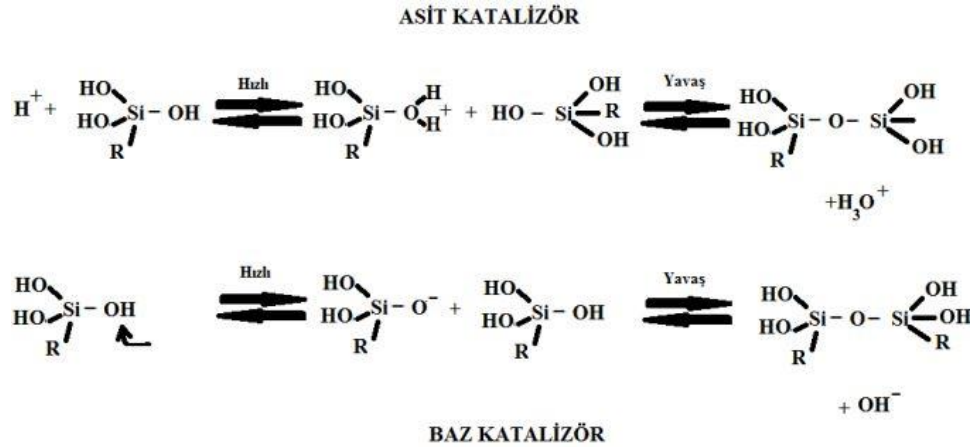


Şekil 21. Çözelti pH'ına göre yoğunlaşma ve hidroliz oranlarının değişimi

Kaynak: Dorcheh ve Abbasi (2008); Ülker (2011).

3. Kondenzasyon

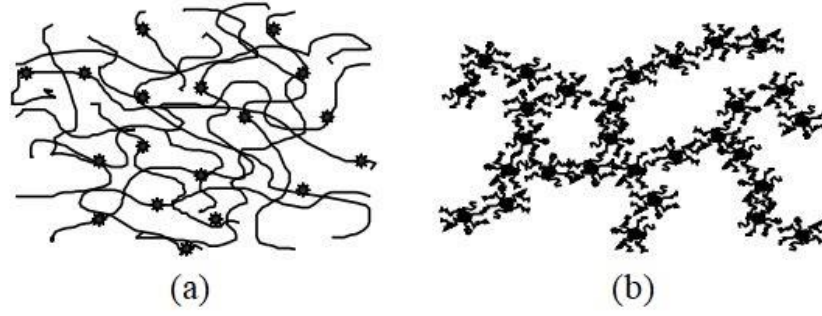
Kondenzasyon reaksiyonları hidroliz (su ortamında) ve alkoliz (alkol ortamında) olmak üzere 2 tipte sınıflandırılmaktadır. Kondenzasyon basamağı, kullanılan asit veya baz katalizörüne göre asidik ya da bazik olabilmektedir (Mermer, 2018). Şekil 22' de silisyumun asit ve baz katalizörlüğündeki kondenzasyon mekanizması verilmektedir.



Şekil 22. Silisyumun asit ve baz katalizörlüğündeki kondenzasyon mekanizması

Kaynak: Mermer (2018).

Kondenzasyon (yoğunlaşma) tepkimeleri hidroliz işlemi tamamen tamamlanmadan başlamaktadır. Kondenzasyon reaksiyon hızları güçlü bir pH bağımlılığına sahiptir. pH değeri sadece reaksiyon hızını etkilemez aynı zamanda oluşan ağın yapısını da etkilemektedir (Ülker, 2011). Asit katalizörlüğündeki reaksiyonlar açık ve lineer veya rastgele dallanmış hafif bağlarla bağlı ağ yapısı ile sonuçlanır ve ardından daha fazla hidroliz ve kondenzasyon reaksiyonları gerçekleşmektedir. Asit katalizörlüğünde ön başlatıcının hidroliz hızı kondenzasyon işleminden daha hızlı meydana gelmektedir. Baz katalizörlüğündeki reaksiyonlar ise birbirine kuvvetli bağlarla çapraz bağlı parçacıklar arasında daha büyük gözeneklere sahip bir jel oluşmaktadır. Baz katalizörü ile kondenzasyon hızının daha hızlı olmasının nedeni bazik katalizör kullanıldığında kondenzasyon kinetiğinin hidroliz kinetiğine göre daha hızlı olmasıdır (Kumar vd., 2008). Sonuç olarak baz katalizi ile oldukça yoğun parçacıklardan oluşan jel yapısı oluşmuştur. Şekil 23'de asit ve baz katalizörlüğündeki reaksiyonlar için jel yapısı gösterilmektedir (Ülker, 2011).

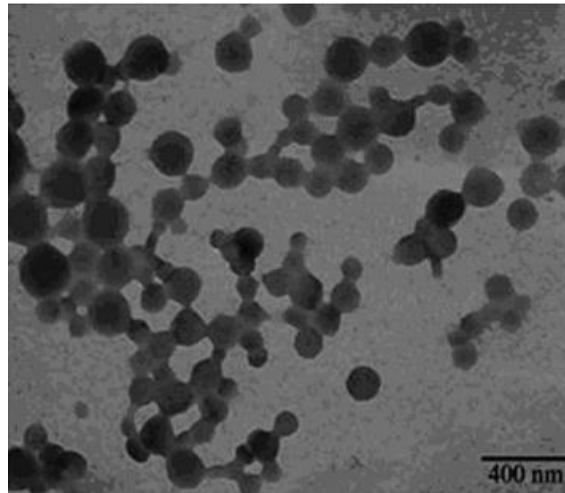


Şekil 23. a) Asit katalizli mekanizma ile oluşan jel yapısı b) baz katalizli mekanizma ile oluşan jel yapısı

Kaynak: Ülker (2011).

4. Jelleşme

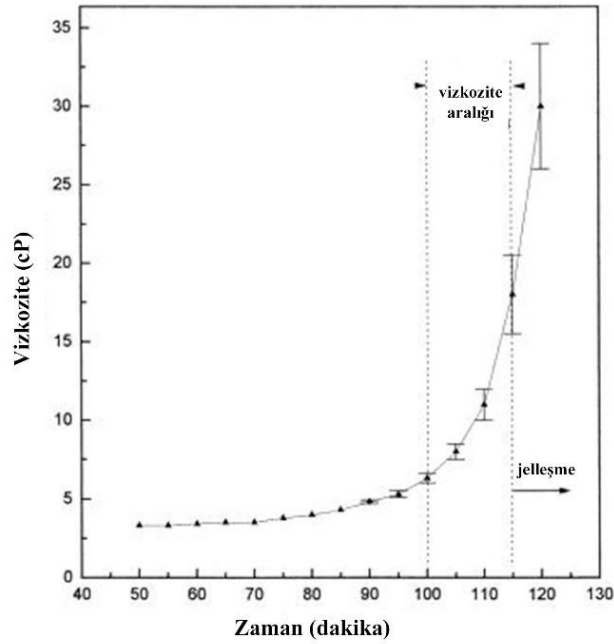
Jelleşme, bir çözeltinin akışkanlığını aniden kaybedip katılaşmaya başladığı an olarak tanımlanmaktadır. Silika partikülleri hidroliz ve kondenzasyon reaksiyonları sonucunda büyük yığın kümeleri oluşturur ve vizkoziteleri artar kümelerin birbiri ile bağlanmaları sonucunda jelleşme meydana gelir. Vizkozitesi artan başlangıç çözeltisi bulunduğu kabın hacmini kaplar ve kap devrildiğinde çözelti dökülmez. Oluşan jel ilk etapta birbirine bağlanmamış sol fazında kümeler halinde oluşur daha sonra zamanla ağ yapısı güçlenerek birbirine bağlantılı hale gelerek jel yoğunlaşarak kıvamı artar (Toygun vd., 2013). Şekil 24'te silika arojelinde jelleşme esnasındaki TEM görüntüsü verilmektedir (Dorcheh ve Abbasi, 2008).



Şekil 24. Silika solun jelleşme sırasındaki TEM görüntüsü

Kaynak: Dorcheh ve Abbasi (2008).

Jelleşme anında herhangi bir kimyasal reaksiyon gerçekleşmez ve tepkimelerin gerçekleşmesi ile enerji açığa çıkmaz sadece çözeltinin viskozitesinin de biranda artış meydana gelir (Mermer, 2018). Jelleşme noktası, çözeltideki tüm katının birbiri ile bağlantılı hal aldığı nokta olarak nitelendirilir. Jelleşme noktasını analitik olarak ölçmek oldukça zordur. Jelleşme sürecinin belirlenmesi için en kesin yöntem çözeltinin viskozitesinin zamana karşı ölçümüdür (Yildirim, 2009). Şekil 25’de viskozitenin zamana göre değişim grafiği verilmiştir. Grafikte jelleşme noktasının yakınında viskozitede ani bir artış gözlemlenmiştir (Yang vd., 1997).



Şekil 25. Zamana göre viskozite değişim grafiği

Kaynak: Yang vd. (1997).

Jelleşme basamağı hidroliz ve kondenzasyon reaksiyonlarının gerçekleşmesi sonucu oluştuğu için, bu basamaklarda ki tüm parametreler jelleşme basamağını da etkilemektedir. Aerojel sentezinde son ürünün şekli ve boyutunun jelleşme basamağında belirlenmesi, jelleşme prosesinin başarılı bir şekilde tamamlanması açısından kritik önem taşımaktadır. Aerojellerin düşük yoğunluklu ve yüksek gözenekli yapıya sahip olması jelleşme anındaki reaksiyonların parametreleri ile kontrol edilmektedir. Prosesin pH değerinin düşük olması jelleşme süresini artırır ve buna bağlı olarak aerojel taneciklerinin yoğunluk değeri de artış göstermektedir (Toygun vd., 2013).

5. Yaşlandırma

Yaşlandırma basamağı jelleşme basamağından sonra gelen fiziksel ve kimyasal değişimler sonucunda jelin yapısının oluşmasında önemli bir role sahiptir (Mermer, 2018). Yaşlandırma işlemi, bir jelin oluşumu ile jel içerisindeki çözücünün uzaklaştırılması arasındaki geçen zaman olarak tanımlanabilir (Güler, 2012). Bir başka ifadeyle yaşlandırma işlemi, silika jelle yeni monomerlerin ilavesi ile siloksanın çapraz bağ derecesinin artmasıdır (Yılmaz, 2013). Toygun vd. (2013) yaşlandırma işlemini, ıslak jelin uzun süre bekletilip içindeki kimyasal maddeler ile geçirdiği reaksiyonlarla daha kararlı yapıya dönüşmesi için geçen zaman olarak tanımlamışlardır.

Yaşlandırma basamağında değişim işlemi 4 başlıkta sınıflandırılabilir (Toygun vd., 2013). Bunlar;

1. Polimerleşme; yoğunlaşma işlemi ile oluşan ağ yapısının bağlanabilirlik özelliğinin kuvvetlenmesidir.
2. Sineriz; jelin büzülmesi esnasında bünyesindeki suyun uzaklaştırılarak atılması olup katı fazdan suyun ayrılmasıdır. Bu işlem van der Waals kuvvetleriyle gerçekleştiği düşünülmektedir.
3. Olgunlaşma (coarsening); eğriliğin farklı yarıçapları ile yüzeyleri arasındaki çözelti içerisindeki farklılıklardan oluşan ayrışma ve tekrar çöktürme işlemleridir. Bu işlem pH, konsantrasyon, sıcaklık ve çözücü tipinden etkilenmektedir.
4. Faz değişimi; mikro sineriz de sıvının birden çok faza ayrıldığı durumlar da görülmektedir (Toygun vd., 2013).

Jelleşme işlemi gerçekleştikten sonra ıslak jel uygun bir çözeltinin içerisinde bekletilerek yaşlandırılır. Yaşlandırma işleminde numune büzülür ve sertleşir. Büzülme mekanizması yüzey hidroksi ve alkoksi grupları arasında zayıf etkileşimli yeni bağların oluşmasından kaynaklanmaktadır. Büzülme ile ıslak jelin gözeneklerinden sıvı çıkışı gerçekleşir ve jeller kademeli olarak şeffaf, parçalanmış katı görünüm alarak değişim geçirir (Mermer, 2018). Bu da yaşlandırma işleminin kristalizasyonu sağlayan bir aşama olduğunu gösterir. Jel yapısı yaşlandırılmadığı sürece amorf formdadır (Toygun vd., 2013).

Yaşlandırma prosesinde çözücünün uzaklaştırılması ile aerogeller de küçük çöküntüler ve büzüşmeler meydana gelir. Bu durumu önlemek için düşük buhar basıncına sahip iyonik sıvılar gibi çözücüler kullanılması gerekmektedir (Yılmaz, 2013). Liu ve Yang (2008) süperhidrofobik şartlarda sol jel prosesini kullanarak silika aerogel sentezi gerçekleştikleri çalışmasında yaşlandırma basamağında belirgin bir çökme oluşumunu engellemek için jele H₂O/EtOH karışımı ilave etmişlerdir. H₂O/EtOH ilavesi ile oluşan aerogellerin mekanik özelliklerini iyileştirerek aynı zamanda mukavemet ve katılık değerlerinin artması ile jel bağlarının kuvvetlendiği gözlemlenmiştir.

Yaşlandırma basamağındaki parametreler ve süreç, kurutma basamağını da etkilemektedir. Yaşlandırma basamağında olgunlaşma evresinde jelin ara yüz alanı azalır orantılı olarak kurutma basamağında meydana gelen kapiler basınç azalır, güçlü ağ yapısı oluşur böylelikle kurutma işleminde oluşabilecek çatlamlar engellenir (Toygun vd., 2013).

Smitha vd. (2006) yaşlandırma işleminde kullanılan çözelti konsantrasyonu, yaşlandırma süresinin etkisi, gözeneklilik özelliklerinin tespiti için yaptıkları çalışmada; yığın yoğunluğunun azalması ile büzüşmenin doğrusal azaldığını buldular. Böylelikle yaşlanma çözeltisindeki TEOS'un konsantrasyonu artmasıyla birlikte yüzey alanı, gözenek boyutu, gözenek hacmi de artış gösterdiğini tespit edilmiştir.

Rao vd. (2004) jelin yaşlanma etkisini camdan üretilmiş aerogelin özellikleri üzerinde gerçekleştirdikleri çalışmalarında; jelin yaşlanma süresinin ve yoğunluğunun artışı ile birlikte büzülme yaşının artışına neden olduğu ve buna karşılık optik geçirgenliğin de arttığını gözlemlədiler. Düşük yoğunluklu, çatlaksız ve daha büyük boyutta şeffaf silika aerogelleri elde etmek için, jelin yaşlanma süresinin yeterince uzun olması gerektiği böylece modül ıslak jelin oranının arttırılması ile monolitik aerogellerin oluştuğunu tespit etmişlerdir.

6. Kurutma

Islak bir jelden katı hal iskeleti etrafındaki sıvının uzaklaştırılması işlemine kurutma denir (Huang, 2012). Kurutma basamağındaki amaç jel yapısının yığılmasına engel olarak jelin iskeletinin korunması ve büzülmenin en az seviyeye indirilmesini sağlayarak çözücünden jelin uzaklaştırılmasıdır (Güler, 2012).

Sol-jel yönteminin kritik aşamalarından biri jelin kurutma basamağıdır. Çünkü aerogel elde etmek için ıslak jel matrisinden sıvı çözücünün ayrılması jelin boyutunu azaltır ve kılcal kuvvetlerin gelişmesine yol açtığı için bazı istenmeyen durumlar meydana gelebilir (Dilsiz ve Akovalı, 2002). Modifiye edilmemiş ıslak jelin hassas nano yapısı ve küçük gözenekleri (50 nm'den küçük) sıvı-buhar ara yüzündeki yüzey gerilimi nedeniyle kurutma sırasında var olan büyük kılcal kuvvetlere ve basınca dayanamadığı için bir takım zorluklara maruz kalır. Kurutma işleminde meydana gelen bu kuvvet kapiler basınç olarak adlandırılır. Kapiler basınçtan dolayı ıslak jelde büzülme gerçekleşir (Anderson ve Carroll, 2011). Nano yapı mekanik dayanım açısından çok zayıftır ve gözenek duvarlarında biriken bu kuvvete dayanamaz (Karayılan, 2014). Gözeneklerin içindeki kapiler basınçtaki bu değişimler mekaniksel zarara yol açar ve nano yapının kırılmasına neden olur (Anderson ve Carroll, 2011). Kırılmaları önlemek için jelleşme, kurutma ve ısıtma hızı, solün katı madde içeriği ve bileşim geometrisi gibi birçok etken önemlidir. Ayrıca katalizör kullanımı da jellerdeki çatlakları önlemede etkili bir faktör olarak uygulanabilir (Toygun vd., 2013). Bununla birlikte gözeneklerdeki sıvıyı yüzeye zarar vermeden çıkarmak için benzersiz teknikler kullanılmaktadır. Bu teknikler; ortam basıncında kurutma, süper kritik kurutma ve dondurarak kurutmadır.

Ortam Basıncında Kurutma: Brinker 1990'da ticari silika aerogel üretimi için ortam basıncında kurutma yöntemini tanıtmıştır. Ortam basıncında kurutma, aerogellerin üretim maliyetini düşürebildiğinden bu yöntemin önemi salt bilimsel ilgi alanından pratik kullanım alanına dönüşmüştür (Gurav vd., 2010). Bu yöntem ile ıslak jeli kurutmak için ortam basıncının üzerine herhangi bir basınç işlemi yapılmaz. Proses, nano yapıyı etki eden kılcal kuvvetleri azaltarak güçlendirmek, nano yapının bu kuvvetlere dayanma kabiliyetini artırarak daha esnek hale getirmek için uzun solvent değişimi ile kimyasal işlem gerektirmektedir (Anderson ve Carroll, 2011).

Ortam basıncında kurutma işleminde sıvı ve buhar arasında ki yüzey gerilimi ile karşı karşıya kalırız. Kurutma sırasında gözenek sıvısına etki eden kılcal kuvvetler nedeniyle oluşan yüzey gerilimi, kurutma hızı ve gözenek sıvısının viskozitesiyle doğru orantılı, ıslak jelin geçirgenliğiyle de ters orantılıdır. Ortam basıncında kurutma yönteminde

birçok önemli parametreler jelin kurutulmasında önemli etkilere sahiptir. Bunlar; jelin mukavemeti, ıslak jelin gözenek boyutu ve kurutma esnasında kullanılan çözücülerdir. Islak jelin gözenek boyutu kurutma esnasında oluşan basınca karşı oluşturacağı direnç için önemli bir veridir. Gözenek boyutunun küçük (200 \AA ' dan küçük) olması kurutma esnasında sıvı geçişi nedeniyle oluşan kapiler kuvvetten dolayı çatlamalara sebep olabilirken, gözenek boyutunun büyük (200 \AA ' dan daha büyük) olması büzülmenin ve buna bağlı olarak çatlamanın daha az meydana gelmesine neden olacaktır. Jelleri kurutma sırasında kullanılan çözücülerin gözenek boyut dağılımına etki ettiği de bilinmektedir (Toygun vd., 2013).

Gurav vd. (2010) hidrofobik aerojelleri ortam basıncında kurutarak jelin yapısı ile ilgili yaptıkları araştırmada; proste ıslak jelin yüzeyi, hidroksil gruplarından H'nin değiştirilmesi ve ardından ortam basıncındaki kurutma ile hidrofobik fonksiyonel grupların kullanılmasıyla kimyasal olarak değiştirilir. Bitişik silika kümesi üzerindeki yüzey silanol grupları (Si-OH) kurutma sırasında jel ağının geri döndürülemez bir şekilde büzülmesiyle sonuçlanan yoğunlaşma reaksiyonlarına girer. Bu işlem, yüzey gerilimini önemli ölçüde azaltarak son derece düşük enerjili yüzeyler oluşturur. Bu nedenle, aerjel yüzeyinin hidrofobik hale getirilmesi için alkol yüzeylerini uygun modifiye edici maddelerle (TMCS, MTMS, HMDZ, DMCS, DMDC, TMES, HDTMS) modifiye etmek gerekir. Si-OH'den H'nin polar olmayan alkil veya aril gruplarıyla değiştirilmesi yoluyla jellerin yüzey modifikasyonu, ortam basıncıyla kurutma yöntemi oldukça önemli bir adımdır. Bu yöntem, silika kümelerinin yoğunlaşma reaksiyonlarını önleyerek buna bağlı olarak kurutma sırasında jelin büzülmesini engeller. Prakash vd. (1995) yaptıkları araştırmada heksan ile bir çözücü değişimi ve ardından TMCS ile bir yüzey modifikasyonu işlemi uygulayarak tersinir büzülme etkisini desteklemek için TEOS bazlı ıslak jelin yüzey kimyasını etkilediğini tespit ettiler. Bu yöntem, farklı modifikasyon ajanlarının kullanımını inceleyen bir dizi başka araştırmacı tarafından da uyarlanmıştır.

Süper Kritik Kurutma: Süperkritik ekstraksiyon tekniği ilk olarak 1930'larda Kistler tarafından geliştirilmiştir (Anderson ve Carroll, 2011). Geleneksel olarak aerojeller süperkritik kurutma yöntemleri kullanılarak sentezlenmişlerdir. Ancak kritik noktaya yaklaşmak için yüksek sıcaklık ve basınca ihtiyaç duyulduğundan bunun maliyet

verimliliği, proses sürekliliği ve güvenliği açısından belirli sınırlamalar oluşturduğu tespit edilmiştir (Gurav vd., 2010).

Sıvı jelin buharlaşması ile gözenek çevresinde basınç kuvvetleri oluşur ve gözenek büzülür. Yüzey gerilimi jel gövdesinin çökmesine neden olur ve yüzey geriliminin oluşmasını önlemek için jel otoklavda süperkritik olarak kurutulur. Otoklavdaki sıcaklık ve basınç kritik bir noktanın üzerine çıktığında sıvı, her molekülün serbestçe hareket edebildiği ve yüzey geriliminin kesildiği “süperkritik” bir sıvıya dönüşür. Daha sonra buhar, otoklavdaki basıncın atmosferik basınca ulaştığı ana kadar yavaş yavaş otoklavdan serbest bırakılır. Son olarak, otoklav kuru nitrojen ile yıkanır ve böylece yakalanan çözücü molekülleri ortamdaki uzaklaştırılır. Jellerin bu şekilde kurutulma yöntemine süperkritik kurutma denmektedir (Gurav vd., 2010). Öte yandan monolitik aerojel, süper kritik kurutma şartlarında üretilmektedir. Ayrıca süper kritik kurutma koşullarında üretilen aerojellerin hafif, düşük yoğunluklu malzemeler oldukları bilinmektedir (Toygun vd., 2013).

Dondurarak Kurutma: Dondurarak kurutma, genel olarak suyun veya diğer çözücünün donmuş bir şekilde ortamdaki uzaklaştırılma için kullanılan bir yöntemdir (Karayılan, 2014). Dondurarak kurutma malzemedeki gözenek sıvısının dondurulması ve ardından malzemedeki donmuş suyun doğrudan katı fazdan gaz fazına süblimleşmesi için çevre basıncının düşürülmesiyle çalışan bir prosesdir (Gurav, 2010; Huang, 2012). Dondurularak kurutulan aerojellerin geleneksel evaporasyonla kurutulmalara göre gözenek hacminin çok daha büyük olduğu literatürde yer almaktadır (Dilsiz ve Akovalı, 2002).

2.7. Silika Aerojelin Kullanım Alanları

Silika aerojeller; termal iletkenlik, düşük yoğunluk, yüksek gözeneklilik, akustik, optik, mekanik, elektrik gibi birçok üstün özelliklere sahip olmalarından dolayı geniş uygulama alanları bulmaktadır. Yapılan literatür çalışmaları yeni malzemelerin üretimi ile malzeme biliminin gelişimi üzerindeki etkisini gösteren çok çeşitli aerojel uygulamaları hakkında bilgi sunmaktadır. Aerojelin kullanıldığı tüm alanları belirtmek mümkün değildir, ancak malzeme bileşimindeki duruma göre çeşitli sektörlerde uygulama alanları bulunduğu işaret etmek hiç şüphesiz yerinde olmaktadır.

Silika aerojellerin eşsiz termal yalıtkanlık özellikleri bina yapım uygulamalarında kullanım alanı bulmaktadır. Bu özellik artan çevre bilinci ile bina sektöründe enerji tasarrufu sağlamayı amaçlamaktadır (Üstündağ ve Sola, 2022). Bu nedenle, mevcut literatür araştırmaları en umut verici süper yalıtım sistemlerinin parçası olan aerjel takviyeli alçı sıvalar (Buratti, 2014) ve aerjel takviyeli battaniyeler üzerine yoğunlaşmışlardır (Berardi, 2019). Ayrıca, çimento esaslı malzemelere farklı takviye oranlarında silika aerjel malzemesi ilave edilerek fiziksel ve mekanik özellikleri incelenmiştir.

Silika aerojeller etkili akustik performansları ile binalarda ses emilimi ve yalıtımı için kullanılan değerli akustik özelliğe sahip malzemelerdir. Silika arojeller ses hızını 100 m/s'ye düşürmektedir, bu özellikleri ile akustik bariyer olarak kullanılmaktadır (Ülker, 2011, Huang, 2012). Bununla birlikte silika aerojellerin cam sistemlerine eklenmesi ile malzemenin güçlü potansiyeli kanıtlanmıştır. Bu alanda yapılan çalışmalar, binalarda kullanılan standart pencerelere kıyasla aerjel takviyeli pencerelerin çok umut verici bir davranış sergilediğini göstermiştir (Szczeponiak, 2022).

Silika aerojellerin doğrudan kumaşa ince bir aerjel tabakası halinde gömülerek ilave edilmesi giysilere birçok özellik (sıcak-soğuk dayanıklılığı, yangın dayanıklılığı, su iticilik özelliği) kazandırmıştır. Marlborough, Massachusetts'ten Aspen Aerogels Inc., doğrudan kumaşa gömülü ince bir aerjel tabakası içeren ucuz ve esnek bir battaniye olan Spaceloft ürününü üretmişlerdir. Giysilerin sıcaklığa maruz kalması ısı direncini artırır böylelikle itfaiyecilerin yangına maruz kalan kıyafetleri için aerjel parçacık bağlayıcısı ile kaplanmış yünlü-aramid bir kumaş geliştirilerek giysinin alev almaması sağlanmaktadır. Silika aerojellerin tekstilde kullanılması ancak bu yüzyılda dikkat çekmeye başlamış ve ilk uygulama uzay araştırmaları için koruyucu giysiler elde etmede kullanılmıştır (Gurav vd., 2010; Shaid, vd., 2014). ABD Donanması, dalgıçlar için aerjel iç çamaşırlarını kullanarak pasif termal koruma sağladıklarını belirtmişlerdir (Nuckols vd., 2005). Ayrıca; Everest Dağı tırmanıcıları, malzeme ile kaplı uyku tulumlarının yanı sıra silika aerogel tabanlı kullandıkları bilinmektedir (Gurav vd., 2010). Silika aerojellerin hidrofobik özelliği sayesinde giyisilerde yağmur ve kara karşı koruma sağlandığı da gözlemlenmiştir (McNeil ve Gupta, 2022).

Silika aerojelin optik davranışı üzerine yapılan ilk çalışmalar kırılma indeksi, şeffaflık ve saçılma gibi temel malzeme özellikleri üzerine odaklanıldığını göstermektedir. Schultz ve Jensen (2008) silika aerojel karolarla (15 mm kalınlığında, 0,58-0,58 m² boyutunda) tahliye edilmiş bir monolitik cam sistemi üzerinde çalışma yapmışlardır. Silika aerojel karolar bir cam sistemine monte edildiğinde, aerojel levhanın termal iletkenliği 0,010 W/mK'nin altına düştüğü gözlemlenmiştir (Schultz ve Jensen, 2008). Ayrıca monolitik silika aerojeller, etkili özelliklerinden dolayı cherenkov detektörleri olarak da kullanılmıştır. (Ülker, 2011). Huang ve Niu (2015) , 6 mm kalınlığında iki tek şeffaf cam arasına silika aerojel tozu doldurarak sandviç tipi sistemden oluşan granül silika aerojel cam örneğini karakterize etmiştir. Camın termal iletkenlik katsayı değeri 0.13 W/mK olarak ölçüldüğü bildirilmiştir (Huang vd., 2015).

Silika aerojeller uzay uygulamalarında da kullanılan malzemelerdir. Stardust adlı bir NASA projesinde (Şekil 26), silika aerojel Wild 2 kuyruklu yıldızın birleşimini incelemek için toz parçacıklarını emmek üzere tasarlanmış bir toplayıcı için kullanılmıştır (Shaid, vd., 2014). Uygun elektriksel özelliklerinden dolayı silika aerojeller; IC'ler için dielektrikler, vakum elektrotları ara parçaları ve kapasitörler için aralayıcılar olarak da kullanılabilir (Ülker, 2011). Ayrıca silika aerojel düşük yoğunluk ve yüksek gözeneklilik özellikleri nedeniyle katalizör, sorbent ve sensör olarak kullanılmaktadır (Ayers ve Hunt, 1998). Tablo 5'de silika aerojellerin özelliklerine göre pek çok farklı alanda kullanım alanları konusunda genel bir özet verilmektedir.



(a)

(b)

Şekil 26. Aerojellerin (a) Stardust uydusunda (b) Bina camında kullanımı

Kaynak: Koçer (2019).

Tablo 5. Özelliklerine göre silika aerojel uygulamaları

Uygulama	Uygulama Örnekleri	Özellik
Termal İletkenlik	✓ Binaların ısı yalıtımı (dış cephe, döşeme, duvar, çatı, teras)	✓ En iyi yalıtım malzemesi
	✓ Boruların ve cihazların yalıtımı	✓ Yüksek ısı dayanımı
	✓ Uzay araçları ve otomobiller	✓ En hafif katı malzeme
	✓ İtfaiyeci termal koruyucu kıyafetler	✓ Şeffaf malzeme
	✓ Dağcılar için uyku tulumu ve koruyucu tabanlık	
	✓ Dalgıçlar için termal koruyucu iç kıyafeti	
	✓ Güneş cihazları, güneş havuzları	
	✓ Depolama ortamı	
Yoğunluk ve Gözeneklilik	✓ Katalizör	✓ En hafif sentetik katı malzeme
	✓ Sensör	✓ Yüksek gözeneklilik
	✓ Yakıt depolama	✓ Çoklu Bileşim
	✓ Gazlı Kirleticiler için iyon değiştirici filtreler	
	✓ ICF Pigment taşıyıcıları için hedefler	
	✓ Şablon ✓ Pigment taşıyıcılar	
Akustik	✓ Düşük frekanslı ultrasonik dönüştürücüler için akustik eşleştirme katmanları ses hızı ve empedansı	✓ Düşük ses iletimi
	✓ Mimari yapılar için ses emilimi/ yalıtımı (ses geçirmeyen odalar)	
	✓ Düşük ses hızı	
Optik	✓ Hafif optik malzemeler (silika cam, lazer camı, güneş pencereleri, ayna destekleri)	✓ Şeffaf
	✓ Güneş pilleri İçin Yansımaya Önleyici Katman	✓ Düşük kırılma indeksi
	✓ Işık kılavuzları	
	✓ Çerenkov detektörleri	
Mekanik	✓ Enerji adsorplama	✓ Elastik
	✓ Hiper hızlı parçacık tuzağı	✓ Hafiflik

Elektrik	<ul style="list-style-type: none"> ✓ IC'ler için Dielektrikler ✓ Vakum elektrotları için ara parçalar ✓ Mikrodalga elektroniği ✓ Elektriksel iletkenler ✓ Elektrotlar ✓ Yüksek gerilim izolatörü ✓ Sensör malzemesi ✓ Empedans ayarı ✓ Cerenkov detektörleri ✓ Termoelektrik ✓ Piezoelektrik malzemeler ✓ Kondansatörler 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ En düşük dielektrik sabiti ✓ Yüksek elektrik dayanımı ✓ Yüksek yüzey alanı ✓ Yüksek gözeneklilik
Filtrasyon, Ayırma ve Sorpsiyon	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Ayak sesi yalıtımı, ✓ Boyalar ve vernikler ✓ Fonksiyonel sıvılar için sıvı/gaz filtreleri ve emiciler 	
Uzay Uygulaması	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Çerenkov sayaçları ✓ Uzay toz parçacıkları emicisi 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Uzayda toz parçacıklar katılarla çarpıtığında aerojeller ile tutulur.
Kinetik Enerji Emici	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Isı yalıtkanları ✓ Tank bölmeleri ✓ Yıldız tozu etkisi ✓ Şok emilimi 	
Dolgu Maddeleri	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Boyalar, vernikler, elastomerler, termoplastikler, termosetler için dolgu maddeleri 	
Taşıyıcılar	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Mantarlar, bitkiler, pestisitler, ilaçlar için taşıyıcı malzemeler 	
Kataliz	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Biyokatalizörler ✓ Otomobil gazı ✓ Kirletici azaltıcılar 	

Tablo 5. Özelliklerine göre silika aerjel uygulamaları (devam)

Kaynak: Hrubesh (1998); Gurav vd. (2010); Szczepaniak vd. (2022);

Sebdani vd. (2021).

2.8. Silika Aerojelin Mimarlık Alanında Yeri ve Önemi

Son yıllarda yeni malzemelere artan ilgi ve enerji tasarrufunda kilit rol oynayan ürünlerin ısı yalıtımı konusunda gelişmiş çözümler sunması mimarlık alanında malzemenin önemini gündeme getirmiştir. Yapı sektöründe binalarda enerji tüketiminin hızla artması ile termal yalıtkanlık özelliği gelişmiş olan malzeme kullanımı ihtiyaç haline gelmiştir. Birçok yalıtım ürününün bir bileşeni olarak kullanılan silika aerojeller, malzemelere farklı katkı oranlarında dahil edilerek mimarlık uygulamalarında yer bulmaktadır. Yüksek termal performans gibi üstün özelliklere sahip silika aerojelli malzemeler aynı zamanda düşük kütle yoğunluğuna sahip gözenekli ürünlerdir. Bu malzemelerin birçok benzersiz özelliklerinin olmasının yanı sıra binalarda ısı ve ses yalıtımı amacıyla silika aerojeller mimarlık alanında yaygın olarak tercih edilmektedir (Calisesi, 2017). Bu çerçevede son yıllarda düşük termal iletkenliğe sahip silika aerojel katkılı sıvalar ve aerojel esaslı betonlar gündemden güne geliştirilerek üretilmekte ve binalarda enerji tasarrufu için ısı köprüleri üzerine silika aerojel güçlendirmesi yapılmaktadır (Buratti vd., 2014; Buratti vd., 2016; Cuce vd., 2014, Moretti, 2017).

Silika aerojel katkılı yalıtım malzemeleri üzerine yapılan araştırmalar, çevresel sürdürülebilirlik sorununu ele alarak bu soruna çözüm bulmayı amaçlamıştır. Dünyada son otuz yılda endüstriyel gelişmeler, kalkınma ve nüfus artışı nedeniyle enerji talebini arttırmıştır. Yenilenemeyen enerji kaynakların rezervlerinin sınırlı olmasına rağmen hala enerji piyasasına hakim olmaktadır. Yapı sektörünün toplam tüketilen enerjinin %42'sinden sorumlu olduğu bilinmektedir (Curto ve Cinieri, 2020). Tüm dünyada olduğu gibi Türkiye'de de mimari yapıların büyük bir kısmını konutlar oluşturmaktadır. Enerji tüketimi açısından değerlendirildiğinde konutlar enerjinin büyük bir kısmını kullanmaktadır. Konutlarda kullanılan enerjinin %85'i ısınmak için tüketilmektedir. Bununla birlikte Türkiye'deki konutların %70'inin ısı yalıtımının olmaması konutlarda enerji kullanımının artması nedeniyle konutlarda ısı yalıtımı ve enerji verimliliğinin sağlanması için mimari yapılarda yalıtım uygulamaları enerji tasarrufu açısından önemli bir hale gelmektedir (Arslan ve Aktaş, 2018). Kaynakların ve yaşamın sürdürülebilirliğinin sağlanması için sürdürülebilir enerji kullanımı, enerji ihtiyacının düşürülmesi ve enerji kullanımında verimliliğin artırılması gerekmektedir. Sürdürülebilirlik konusu yıllardır mimarlık alanının önemli bir parçası haline gelmiştir.

Bu nedenle yenilikçi ürünlerin üretimi için bilimsel çalışmaların artması yönünde teşvik edici yaklaşımlar sunulmaktadır (Pacheco Torgal vd., 2016).

Malzemeler için geliştirilen Yaşam Döngüsü Değerlendirilmesi (LCA) yöntemi, “beşikten mezara” kavramına dayanan tüm hammaddelerin çıkarılmasından nihai bertarafına kadar bir ürünün tüm yaşam döngüsünü dikkate alır (Muller vd., 2019). Yaşam Döngüsü Düşüncesi, binalarda yüksek performanslı yalıtım ürünleri kullanılması ile yalnızca yaşam boyu enerji verimliliği ve çevresel sürdürülebilirliği dikkate alan süreçlerden, tüm üretim zinciri boyunca daha geniş bir sürdürülebilirlik değerlendirmesine geçmek anlamına gelir (Agliata vd., 2020; Adamczyk ve Dylewski 2020). Dünya sınırlı kaynaklara sahip olduğundan, çevre sorunu “beşikten mezara” sürecinin artık sürdürülebilir olmadığını kanıtlamaktadır. Bu kavramın yerine bir sistem için önemsiz olabilecek şey başka bir sistem için hammaddedir, yani “beşikten beşiğe” kavramına dayanan yaklaşım ön plana çıkmaktadır (Curto ve Cinieri, 2020). Bu bağlamda malzemelerin geri dönüştürülerek doğal kaynakların giderek azalmasının önlenmesi ve atık malzemelerin çevre ve insan sağlığı için bir tehdit olmaktan çıkartılarak ekonomi için bir girdiye dönüştürülmesi sürdürülebilir bir çevre açısından büyük öneme sahiptir. İnsana ve çevreye zarar vermeyen malzeme üretimi çevreye verilen zararı en aza indirirken, malzemenin performansının ve kullanım ömrünü de arttırdığı bilinmektedir.

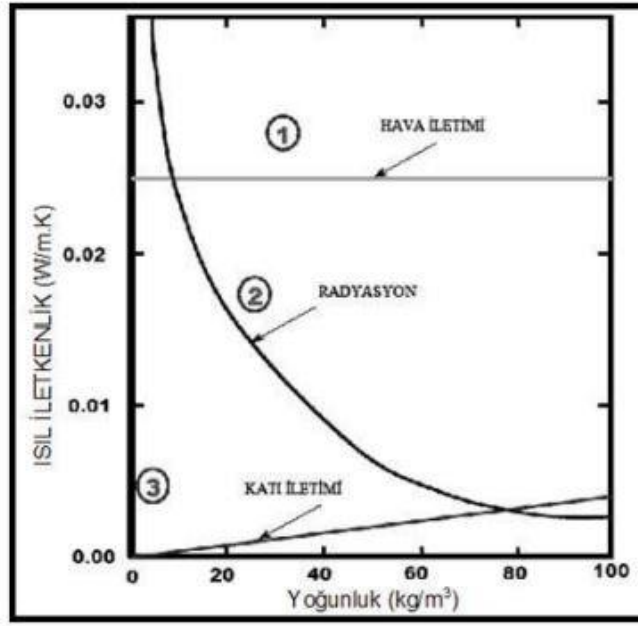
2.9. Silika Aerojelin Mimarlık Alanında Kullanımı

Günümüzde yapılarda ve endüstriyel uygulamalarda ısı transferi konusunda ultra yüksek performanslı yalıtım malzemelerinin gelişimi için yapılan araştırmalar sonuç vermiş daha etkin özelliklere sahip birçok yenilikçi yalıtım malzemeleri, konvansiyonel yalıtım malzemelere karşı alternatif çözümler üretmesi ile tercih edilir hale gelmiştir. Isı yalıtımı sağlayan malzemelerin temel amacı binalardaki yapı elemanlarının ısı iletim direncini artırmaktır (Bayrakçı vd., 2011).

Mimaride bina zarfları, iç ve dış duvarlar, kapılar, pencereler, tavan, çatı, döşeme ve cephe gibi farklı yapısal ve işlevsel bileşenlerden oluşmaktadır. Tüm bu parçaların enerji verimliliği üzerinde önemli bir rolü olduğundan, binadaki enerji performansını iyileştirebilmek adına farklı teknolojiler ile üretilen malzemeler önerilmiştir (Santos vd., 2014). İleri teknoloji kullanılarak üretilen ve mimari yapılarda ısı yalıtımı için alternatif

çözümler sunan, bina kabuğundaki kalınlığı arttırmadan mümkün olan en iyi ısı yalıtımını sağlamak (TS 825) amacıyla yüksek performanslı yeni malzemeler bina zarflarında ısı muhafazası için kullanılmıştır (Ng vd., 2015). Bununla birlikte, teknoloji ile yapı malzemelerinin ısı yalıtım performansının geliştirilmesinin yanı sıra, ses yalıtımı, su emme, yangın direnci, yük altındaki uygulamalar için dayanıklılık gibi birçok üstün özellikler sağlanabilmektedir. Silika aerojel içerikli malzemelerin teknoloji ile gelişen özellikleri, olağanüstü fiziksel ve kimyasal yapısından kaynaklı yüksek termal performansı geleneksel yalıtıma yenilikçi bir seçenek sunmaktadır. Yeni nesil silika aerojel içerikli malzemeler bu özellikleri ile mimarlık uygulamalarında hızla yer edinmektedir (Baetens, 2011).

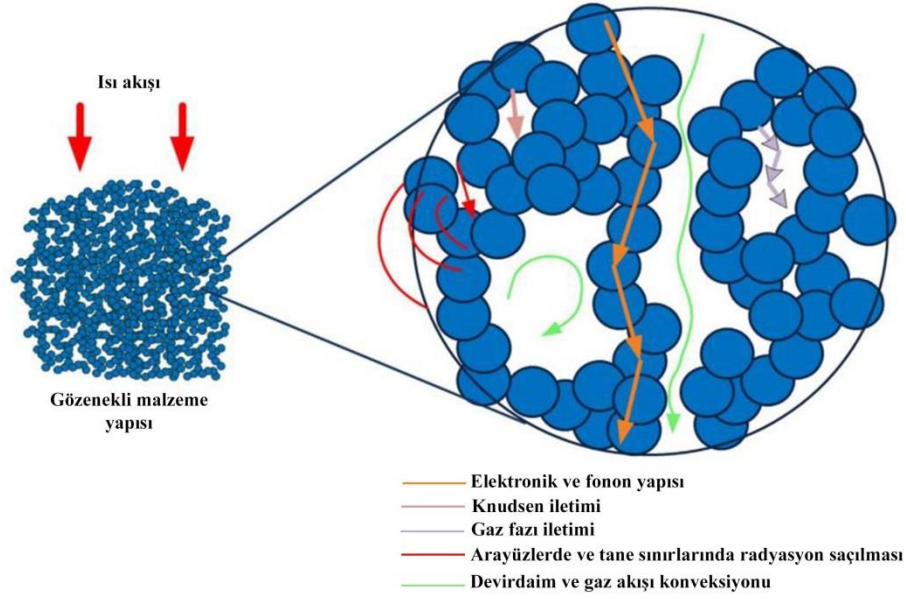
Mimari yapılarda ısı yalıtımı tavan, taban, iç ve dış duvarlarda, döşemelerde, dış cephede, pencerelerde, çatılarda kullanılmaktadır. Yapı bileşenlerinde kullanılan yalıtım malzemelerinin boşluklu yapısı düşük ısı iletkenliği ve buna bağlı olarak yüksek bir ısı direncinin yanı sıra düşük bir ısı geçirgenliğini de mümkün kılmaktadır. Isı muhafazası sağlayan yalıtım malzemelerinin hava boşlukları boyunca ısı transfer mekanizmasının iyi anlaşılması yapılarda enerji verimliliği ve ısı yalıtımı konusundaki gelişmeler açısından önem arz etmektedir. Kistler (1935) yılında geleneksel yalıtım malzemelerin ısı akışının 3 temel bileşeni olduğunu açıklamıştır. Şekil 27’de verilen grafikte de görüldüğü gibi bu bileşenleri hava iletimi, radyasyon ve katı iletimi olarak tanımlamaktadır. Radyasyonla ısı transferi ara yüzeylerden, tane sınırlarından saçılmadan kaynaklanır ve esas olarak gözenekli malzeme içindeki absorpsiyon ve reemisyondan etkilenir. Ayrıca radyasyon ve katı iletim, malzemenin sahip olduğu yoğunlukla ilişkili olduğu belirtilmiştir. Yalıtım malzemelerinin ısı iletimi, malzemedeki havanın yoğunluğundan daha düşük bir gazın yer değiştirmesi ile ısı iletkenliğinin azaldığı tespit edilmiştir. Bunun dışında, ısı iletkenliği sağlayan malzemelerin içindeki hava basıncının azalması ısı yalıtım kapasitesini artırıcı yönde etki etmektedir. Kistlere göre ısı muhafazası malzemenin mikro veya makro gözenekli oluşuyla bağlantılıdır ve gözenek boyutunun azalmasıyla birlikte ısı iletkenliği azalmaktadır (Bayrakçı vd., 2011).



Şekil 27. Geleneksel (elyaf ve köpük) yalıtımda ısı transfer mekanizmaları

Kaynak: Bayrakçı vd. (2011).

Gözenekli ortamdaki ısı transferini anlamak, ısı yalıtım malzemelerinin geliştirilmesi için çok önemlidir. Şekil 28' de gözenekli bir malzemede ısının transfer edilebildiği iletim, konveksiyon ve radyasyon mekanizmalarının şematik gösterimi verilmektedir. İletim durumunda, ısı transferi, katı matrisin fonon iletimi ile birlikte elektronik iletim ve gözeneklerdeki gaz moleküllerinin varlığı nedeniyle oluşan gaz fazı iletimi ile sağlanır. Gözenekli bir yalıtkan malzemenin termal iletkenliği, gözeneklilik ve aynı zamanda katı içeriği ile doğrudan ilişkili olduğu için yoğunluğa büyük ölçüde bağlıdır. Bununla birlikte, iletkenlik için her mekanizma, malzemenin yoğunluğa bağlılık sergiler. Katı içeriğindeki yoğunluğun artmasıyla birlikte katı termal iletkenliği artar. Öte yandan, artan yoğunluk, azalan gözenekliliğe bağlı olarak gaz halindeki iletkenliğin azalmasına neden olur (Ülker vd., 2014).



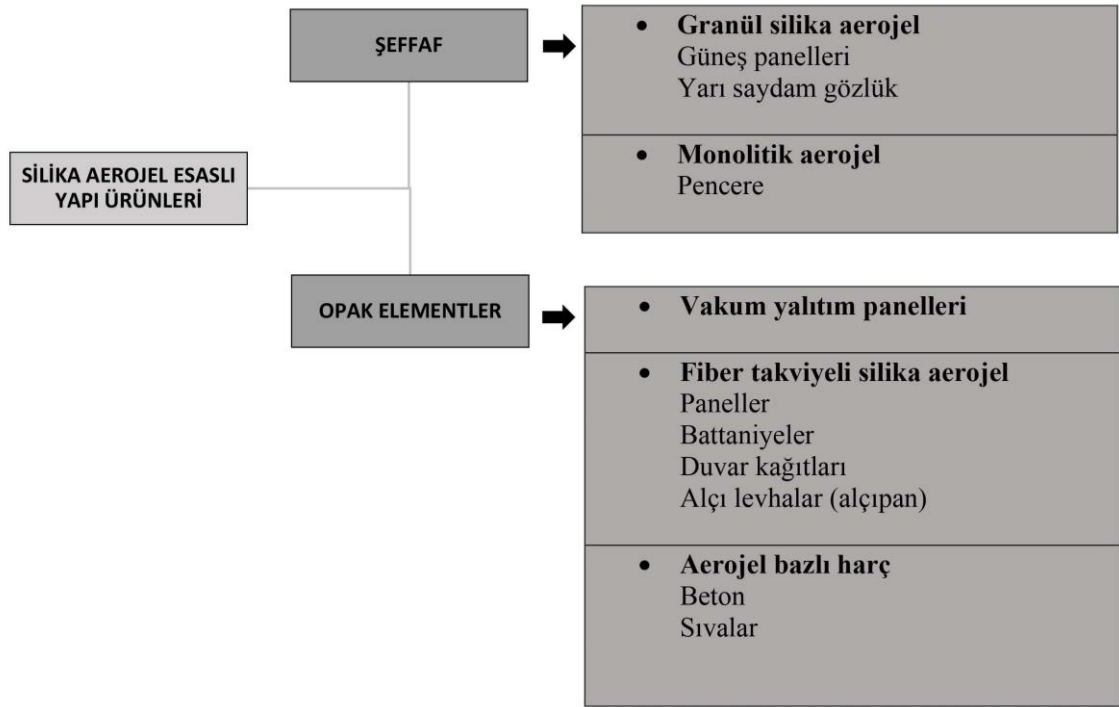
Şekil 28. Gözenekli yapı malzemesinde ısı transfer mekanizmaları

Kaynak: Ülker vd. (2014).

Silika aerojel takviyeli yalıtım malzemeleri geleneksel yalıtım malzemelere alternatif olarak ve geleneksel malzemelerden yaklaşık 7 kat daha fazla performans gösteren yenilikçi bir yalıtım malzemesidir. Bu malzemenin uygulaması ile binalarda termal konfor sağlanmış, daha fazla enerji korunmuş ve ısıtma maliyetini azaltılmıştır. Böylelikle bu malzemeler yapı sektöründe önemli bir yer edinmiştir (Gür, 2010; Baetensa, 2011). Silika aerojel yalıtım malzemelerinin termal iletkenlik kat sayısı malzemenin yalıtım özelliğini belirlemektedir. Termal iletkenlik katsayısı ne kadar düşükse ürünün yalıtım özelliği o kadar yüksektir (Bayrakçı vd., 2011). Isı yalıtımı sağlamak amacıyla bina yalıtımlarında kullanılan geleneksel malzemeler; mineral yün, genişletilmiş polistiren (EPS), ekstrüde polistiren (XPS), poliüretan (PUR), mantar, selüloz olarak sınıflandırılmaktadır (Huang, 2012). Geleneksel yalıtım malzemelerinin binalarda yalıtım amaçlı farklı alanlarda kullanım örnekleri bulunmaktadır. Fakat cephede mantolama amacıyla kullanılan malzemelerin uygulama kalınlığı, zemin alanı sınırlaması, taşıma hacmi sınırlaması, mimari kısıtlamalar, sağlık ve çevresel sorunlar ile ekonomik sebepler gibi pek çok dezavantajlardan dolayı kullanımı pek fazla arzu edilmemektedir (Al Zaidi, 2017). Daha etkin ısı yalıtım sistemlerinin geliştirilmesine yönelik çalışmalar, mevcut malzemelerin ısı yalıtım özelliklerinin iyileştirilmesinin yanı sıra ısı yalıtım özellikleri artırılmış yeni malzemelerin geliştirilmesini de sağlamaktadır

(Ülker vd., 2014). Yapılan çalışmalar sonucu silika arojellerin termal iletkenlikleri, termal yalıtım için kullanılan çeşitli geleneksel malzemelerin termal iletkenliklerinden önemli ölçüde daha düşük olduğu tespit edilmiştir (Ülker vd., 2014).

Silika arojel günümüzde çeşitli yalıtım çözümleri ve yapı ürünleri için bir bileşen olarak kullanılmaktadır. Şekil 29’da mimari yapı bileşenlerinde kullanılan silika arojelli yapı ürünlerinin sınıflandırılması verilmiştir. Bu sınıflandırmaya göre silika arojel esaslı yapı ürünleri şeffaf (saydam ve yarı saydam) ve opak elementler olmak üzere 2 grupta incelenmektedir.



Şekil 29. Silika arojel esaslı yapı ürünlerinin sınıflandırılması

Kaynak: Curto ve Cinieri (2020).

2.9.1. Mimari Yapılarda Yarı Saydam ve Saydam Silika Arojel Malzemeler ve Uygulamaları

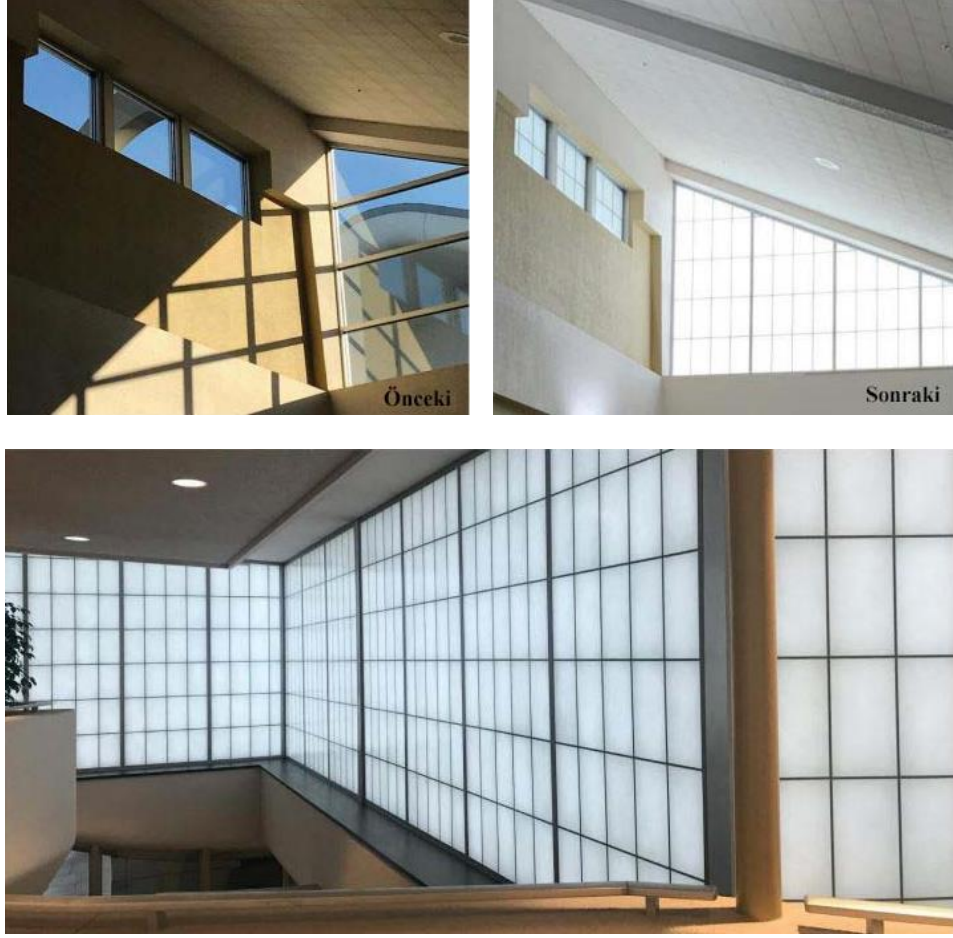
Silika arojel mimaride, düşük ısı iletkenliği, yüksek gün ışığı ve güneş enerjisi geçirgenliği özelliklerini birleştirdiği için saydam veya yarı saydam yalıtım malzemesi olarak binalarda kullanımı gerçekleştirilmektedir. Silika arojeller bu özellikleri ile ilk kez 1980 yılında yarı saydam pencere sistemleri gibi yapı bileşenlerinde kullanılmıştır (Berardi, 2015). Daha sonrasında gelişen teknoloji ile birlikte son 10 yıldır granül ve

monolitik aerojel bazlı pencerelerin ve yalıtım panellerin geliştirilmesi üzerine çalışmalar sürdürülmeye devam etmektedir (Baetensa vd., 2011). Yapılan bu çalışmalar neticesinde birçok mimari yapılarda silika aerojel takviyeli cam ve pencere sistemlerinde uygulama alanı bulmuştur.

Mimari Yapılarda Silika Aerojel Takviyeli Camlar ve Pencere Sistemleri Uygulamaları

Granül yarı saydam silika aerojel malzemeler, toz gibi dökülebildikleri için kullanımları monolitik aerojellere kıyasla çok daha kolaydır. Granül silika aerojeller, binalardaki pencere sistemlerine dahil edildiğinde iç mekanda gün ışığını yansıtmak ile birlikte termal yalıtım da sağlamaktadır. Bu da malzemenin iyi bir optik geçirgen özelliğe olduğunu gösterir. Bu özellik sayesinde binalara gün ışığı rahatlıkla girebilmektedir (Garnier, vd., 2015; Gao, vd., 2016). Yüksek optik kaliteli granül silika aerojellerin ilk ve en büyük endüstriyel tedarikçisi Cabot şirkettir. Bu şirketin geliştirdiği Lumira marka aerojel ürünleri mimari gün ışığı aydınlatma uygulamalarında kullanılmak üzere ışık iletimini optimize etmek için tasarlanmıştır. Monolitik silika aerojel camlar ile granül silika aerojel camların temel farkı granül silika aerojel malzemesinin optik olarak şeffaf görünümde kalmaması ve bu nedenle granül silika aerojelden oluşan cam malzemenin sanki süt bardağından bakılıyormuş gibi bir optik görüntü oluşturmasıdır. Düşük şeffaflıkla karakterize edilen granül silika aerojelden oluşan cam diğer camlara göre ışığı çok daha fazla dağıtır. Ayrıca standart bir pencereye kıyasla daha yumuşak bir ışık ve azaltılmış gölgelemeye sahiptir (Koebel vd., 2012).

Kalwall şirketinin yapmış olduğu uygulamada Washington'daki Spokane uluslararası havaalanında yolcu konforunu sağlamak amacıyla mevcut proje üzerinden yenileme gerçekleştirilmiştir (Şekil 30). Buradaki amaç dışarıdan manzaraya ihtiyaç duyulmayan cam pencereler için yarı saydam bir çözüm oluşturmaktır. Buna ek olarak, doğrudan güneş ışığına izin veren bir atriyum alanındaki cam pencerelerden geçen güneş ışınlarının parlamaya neden olması, yolcuların ve çalışanların bu durumdan rahatsız olması nedeniyle 70 mm kalınlığında Lumira aerojel içerikli yarı saydam sandviç paneller ile mevcut camlar değiştirilmiştir. Kalwall şirketinin Cabot Lumira aerojel ile üretilen sandviç panellerin yarı saydam yapısı, gün ışığını dağıtarak kamaşmayı önler ve böylelikle iç mekanda görsel konfor sağlanmış olur. Bu panellerin 0,05 Wm²K U (Isıl geçirgenlik katsayıları) değerine sahip oldukları tespit edilmiştir (Url-3).



Şekil 30. Spokane Uluslararası Havaalanı (Washington, ABD) için Zeck Butler Mimarlık tarafından yapılan, Kalwall şirketinin Cabot Lumira aerojel ile üretilen yarı saydam sandviç panel uygulaması.

Kaynak: Url-3

Kalwall şirketinin Cabot Lumira silika aerojel ile üretilen yarı saydam sandviç panelleri yüksek termal yalıtım sağlayan, iç mekan çevre kalitesini artırarak aydınlık iç mekan oluşturan, mimari yapıların karbon salınımını azaltarak çevreye en az zararı veren, enerji korunumu sağlayarak, termal, görsel ve akustik konfor koşulları oluşturarak sürdürülebilir mimarlığa katkı sağlayan yenilikçi malzemelerdir. Bu ürünler mimari yapıların duvar sistemlerinde, birleştirilmiş giydirme cephelerinde, cephelerde duvar yerine ayrıca pencere değişimlerinde kullanılmaktadır (Altın, 2014; Url-4). Tablo 6'da bu üstün özellikli silika aerojel içerikli panellerin uygulamalarına ait örnekler verilmektedir (Url-5).

Tablo 6. Kalwall aerojel içerikli sandviç panel uygulamalarına ait yapı örnekleri



Mercedes Benz Binası (Brussels, Belçika)

Jaspers-Eyers & Partners



Audi Showroom'u (Londra)

Wilkinson Eyre Mimarlık



Raleigh-Durham Uluslararası Hava Limanı (ABD)

Clark Nexsen Mimarlık



BMW Wolverhampton (Londra)

MDG Mimarlık

Kaynak: Url-5

Almanya’da yer alan Scobalit, yarı saydam gün ışığı uygulamaları için aerojel dolgu kompozit paneller üreten öncü bir şirkettir. Süper yalıtımlı Scobatherm ürünleri, Cabot aerojel granül dolgu cam elyaf takviyeli polyester reçine kompozit profilden oluşur. Bir binada günışığı aydınlatması için ilk kullanım örneklerinden biri Şekil 31’de gösterilen, V. ve A. Amsler mimarları tarafından tasarlanan ve 2003 yılında Zürih’ de inşa edilen Buchwiesen okulunun jimnastik ve beden eğitimi salonunun çatı konstrüksiyonudur (Koebel vd., 2012).



Şekil 31. Cabot aerojel granül dolgu Scobatherm cam elyafı kompozit panellerin şeffaf bir gün ışığı alan çatı konstrüksiyonu biçiminde kullanımının ilk örneği, Zürih'teki Buchwiesen okulunun jimnastik ve beden eğitimi salonundadır

Kaynak: Koebel vd. (2012)

Silika aerjellerin yarı saydam bir yalıtım malzemesi olarak kullanılan uygulamalarından biri de dış duvar yerine yarı saydam silika aerojel cam kullanımınıdır (Curto ve Cinieri, 2020). Bina uygulamalarında yarı saydam silika aerojel yalıtımlı pencerelere ait örnekler Şekil 32 ve Şekil 33’de verilmektedir. Bu örneklerin ilki Yale üniversitesi heykel binası galerisinde dış duvarda yarı saydam aerojel pencere kullanımınıdır. Bir diğer örnekte ise yeni binalarda günışığı amacıyla hem çatı hemde dış duvarda geniş alanlara uygulanabilen yarı saydam aerojel yalıtım malzemeleridir.



Şekil 32. Yale Üniversitesi Heykel binası ve galerisinde (New Haven, ABD) dış duvarda kullanılan yarı saydam arojel yalıtımı örneği

Kaynak: Baetens vd. (2011).



Şekil 33. Güneşli aydınlatması için yüksek performanslı bir ısı yalıtım çözümü olarak yarı saydam arojel yalıtımı örneği

Kaynak: Baetens vd. (2011).

Granül silika arojel bazlı cam uygulamalara ait bir diğer örnek Almanya'da ZAE Bayern'deki ortak Ar-Ge projesi ISOTEG'in geliştirdiği bir sistemdir. ISOTEG'in amacı, granül silika arojel bazlı yeni bir cam geliştirmek ve karakterize etmektir. Bu pencereler, 12 mm'lik kripton veya argon gazı ile doldurulmuş iki boşluğun ortasında 16 mm genişliğinde bir polimetilmetakrilatının (PMMA) içi granül silika arojel ile doldurulmuş çift cidarlı tabakadan oluşarak iki camın arasına monte edilmiştir. Bu çalışmada granül silika arojel partiküllerinin optik ve termal özellikleri incelenmiştir. Deneyleerde, silika arojel tozlarının ısı transferi üzerindeki etkilerini belirlemek için gaz basıncı, dış basınç yükü, sıcaklık, gaz dolumu gibi bazı parametreler değiştirilmiştir. Daha sonrasında, granül silika arojel takviyeli cam ile granül silika arojel takviyesiz cam arasında hesaplanan ısı iletkenlik değerleri karşılaştırılmalı olarak incelenmiştir. Tüm cam ünitesi için (camın kalınlığı 50 mm'den az) $0,4 \text{ W/m}^2\text{K}$ 'den daha düşük ısı transfer katsayıları ve %35'lik bir toplam güneş enerjisi geçirgenliği elde edilmiştir (Reim vd., 2005).

Avrupa Birliği'nin HILIT+ projesi kapsamında monolitik silika arojel bazlı pencere geliştirilmiştir. Monolitik silika arojellerin şeffaf yapısı granül arojellere göre pencere camı yapımı için daha uygun olduğu belirtilmiştir. Bu pencereye, 1 ile 10 mbar arasında bir basınç uygulanarak vakumlu cam teknolojisi ile geliştirilmiştir. 13,5 mm kalınlığında monolitik silika arojel, vakum teknolojisi ile birlikte üretilen cam için yaklaşık $0,66 \text{ W/m}^2\text{K}$ ısı geçirgenliği değeri ölçülmüştür (Baetens vd., 2011). Aspen Aerogels firması arojel pencere uygulamaları için güçlendirilmiş yekpare, yarı saydam arojel paneller geliştirmiştir. İki cam panel arasına sıkıştırılmış 2,5 cm kalınlığındaki yekpare arojel panelin U değeri $0,5 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$ den daha düşük seviyede ölçülmüştür. Monolitik arojel üretmedeki en büyük zorluk yüksek optik kalitede kusursuz ve çatlaksız tek parça paneller üretmektir. Çünkü yüksek optik kaliteli, geniş alanlı monolitik arojel paneller üretmek oldukça hassas üretim prosesi gerektirmektedir. Bununla birlikte monolitik silika arojellerin üretim maliyetlerinin yüksek olması ticarileşmeye yönelik girişimlerin şuan için yeterli seviyede olmadığı belirtilmiştir (Koebel vd., 2012; Ülker vd., 2014).

Alman şirketi Okalux arojel dolgulu Okagel adında bir pencere geliştirmiştir. Granül silika arojelin çift camdaki boşluğu doldurmasıyla opak nitelikte ve oldukça yalıtıcı bir pencere elemanı oluşturmuştur. Ürün $0,3 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$ U termal geçirgenlik değerine

sahiptir. Şirketin Okagel pencere elemanlarını kullandığı en meşhur bina örneklerinden biri Antarktika'daki İngiliz Haley VI. Araştırma İstasyonudur. Okagel pencere sistemlerinin kullanıldığı bir başka yapı ise Almanya Mühlheim' deki Tengelmann İklim Pazarı binasıdır (Url-6).

Çatı konstrüksiyonları için bir başka malzeme çözümü ise saydam, yalıtımlı ve doğal aydınlatma sağlayabilen kumaş çatı elemanlarının kullanılmasıdır. Kuzey Amerika'da faaliyet gösteren Birdair şirketi çatı kaplama çözümlerinin yapımında öncüdür. Bu şirket tarafından üretilen Tensotherm marka aerojel içerikli çatı kaplama malzemesi; üstün yalıtım performansına sahip, hafif, gerilebilir kumaş malzemesinden üretilmektedir. Tekstil bazlı çatı kaplama malzemesi yansımaz güneş ışığının geçmesine izin vererek aydınlık bir iç mekan ve enerji tasarrufu sağlamaktadır. Silika aerojel içerikli çatı kaplama malzemesinin endüstriyel yapılar, etkinlik salonları, kongre merkezleri, oteller ve spor komplekslerini kapsayan birçok farklı alanda uygulamaları mevcuttur. Tensotherm marka aerojel içerikli çatı kaplama malzemesinin kullanıldığı bazı projeler: Katar Doha'daki Khalifa uluslararası stadyumu, ABD Atlanta'da bulunan Mercedes Benz stadyumu, ABD Newyork Arthur Ashe stadyumu, ABD Newyork USTA Tribun stadyumu, Çin'de QingKou Spor Merkezi, Brezilya Ulusal stadyumu, Arjantin La Plata stadyumu, ABD'deki Radford Üniversitesi'nin Dedmon Atletizm Merkezi, Kuveyt Ulusal stadyumu ve Almanya Hamburg HSH Nordbank Arena'dır. Bu projelerde kullanılan şeffaf aerojel içerikli tekstil çatı kaplama malzemesinin, yüksek maliyetlere rağmen hafif olması, basit kurulması, uzun ömürlü olması, optik iletim, su buharı geçirgenliği ve termal yalıtım sağlaması bu malzemeleri tercih edilebilir hale getirmektedir (Url-7).

2.9.2. Mimari Yapılarda Opak Silika Aerojel Yalıtım Malzemeleri ve Uygulamaları

Opak silika aerojel bazlı yalıtım malzemeleri, aerojel ile güçlendirilen levhalar, paneller, battaniyeler, duvar kağıtları, boyalar, sıvalar ve betonları içermektedir (Curto ve Cinieri, 2020).

Mimari Yapılarda Silika Aerojel Takviyeli Alçı ve Beton Sıvaları ve Uygulamaları

Silika aerojel esaslı ısı yalıtım sıvaları ile ilgili çok sınırlı sayıda çalışma bulunmaktadır. Barbero vd. (2014) Avrupa pazarındaki ısı yalıtım sıvaları ile ilgili genel bir araştırma

yapmışlardır. Bu konu ile ilgili nano boyutlu gözeneklere sahip silika arojel katkı malzemelerden oluşan ısı yalıtım sıvaları için yenilikçi çözümler araştırmışlardır. Bu doğrultuda birçok alternatif yöntemler ile malzemenin gelişmesine önemli katkı sağlayabileceklerini düşünmüşlerdir. Bu çerçevede alınan en önemli karar, malzeme için gerekli kalınlığı azaltarak malzemeyi daha yüksek termal performans seviyesine ulaştırmaktır. Başarılı yaklaşımları ile birlikte silika arojel bazlı sıvaların günümüz inşaat endüstrisinde bilinen teknikler kullanılarak hem yeni hem de mevcut binaların restorasyonunda kullanılabiliceğini konusunu belirtmişlerdir. Araştırmacılara göre, ısı yalıtım sıvaları kavisli, eğrisel alanlarda ve organik formlarda uygulanma avantajına sahiptir. Esnektiler, bu özellik onları herhangi bir mimari ve tasarım çözümü için uygun kılar. Ayrıca cephelerde kolay uygulanabilmeleri mevcut binaların iyileştirilmeleri için tercih edilmelerini sağlar. Bir grup araştırmacı, bugün piyasada bulunan yalıtım sıvasını arojel sıva ile karşılaştırdıklarında, silika arojel içerikli sıvanın termal iletkenliğinin önemli ölçüde düştüğünü analizler sonucunda kanıtlamışlardır. Araştırmaların sonuçları, özellikle hem laboratuvar hem de saha testlerine dayanan deneyler açısından oldukça umut vericidir.

Yalıtım amaçlı kullanılan silika arojel esaslı alçı sıva karışımları iç ve dış duvarlar olmak üzere birçok uygulamalarda kullanılmaktadır. Mimari yapıların yeni tadilat dönemlerinde kullanılabilen silika arojel bazlı yüksek performanslı yalıtım sıvası geliştirilerek kısa sürede ticari hale getirilmiştir. Yeni arojel içerikli malzemeler tarihi yapı malzemeleri ile benzer özellikler gösterdiği için tarihi yapıların iç ve dış duvar yüzeylerinde kullanılmanın uygun olduğu tespit edilmiştir. Silika arojel esaslı alçı sıva yenilikçi yapısı ve muhteşem termal iletkenliği ile tarihi binaların görünüşlerini değiştirmeden enerji tasarrufu sağlamak için müdahalesiz bir yöntem sunmaktadır. Şekil 34'te silika arojel takviyeli sıvaların yerinde uygulaması gösterilmektedir. Uygulama karmaşık tuğla duvar geometrisi üzerine doğrudan püskürtme yöntemi ile daha kolay uygulanmaktadır. Ayrıca, silika arojel tozlarının hidrofobik yapısı malzemenin bünyesindeki suyu iterek su emilimini önlemeye yardımcı olmaktadır. Silika arojel bazlı sıva, geleneksel sıvalardan önemli ölçüde daha fazla nefes alabilmektedir ve nemin oluşumunu engellediği için yüzeyi ıslanmamaktadır (Buratti vd., 2014).



Şekil 34. Silika aerojel takviyeli sıvaların yerinde uygulaması

Kaynak: Buratti vd. (2014).

Buratti vd. (2014) tarafından yapılan bir diğer araştırmada, hidrofobik granül silika aerojelden oluşan yenilikçi yalıtım kaplamalarının termal ve akustik karakterizasyonunu araştırmışlardır. Farklı katkı oranlarında hidrofobik granül aerojel ile (hacimce yaklaşık %0, %80-90, %91-95, %96-99) doğal sıva manuel olarak karıştırılmıştır. Hazırlanan numunelerin termal iletkenlik katsayısı ölçülmüştür. Tablo 7’de Buratti ve arkadaşlarının yaptıkları çalışmanın laboratuvar test sonuçları verilmektedir. Sonuçlara göre; silika aerojel miktarı arttıkça termal iletkenlik değerinde azalma gerçekleşir ve hazırlanan sıvanın yoğunluğu düşer. Yani silika aerojelin miktarı arttıkça malzeme iyi bir termal yalıtkan hale geldiği tespit edilmiştir. Hacimce %96-99’lık hidrofobik granül aerojel içeren alçı deney numunesinin aerojel katkısız deney numunesine doğal sıvaya göre termal iletkenlik değerinde yaklaşık %97 oranında azalma gerçekleştiğini belirtmişlerdir. Sonuç olarak aerojel katkılı sıvaların termal özellikleri geleneksel malzemelere göre çok daha üstün özelliklere sahip olduğunu ifade etmişlerdir. Böylece silika aerojel bazlı harç karışımları gibi düşük termal iletkenliğe sahip verimli yalıtım malzemelerinin kullanılması binalardan kaynaklanan ısı kayıplarını azaltmakla birlikte aynı zamanda bina ömrü boyunca iklimlendirme ve ısıtma için enerji ve maliyet tasarrufu sağladığı kanıtlanmıştır. Tilleca pasta markasıyla silika aerojel bazlı sıva Agosti Nanotherm ve Arte & Mestieri tarafından geliştirilen ve ticarileştirilen bu ürün tarihi yapılarda restorasyon malzemesi olarak kullanıldığı tespit edilmiştir.

Tablo 7. Buratti ve arkadaşlarının laboratuvar testlerinde kullanılan farklı katkı oranlarında arojel içeren sıvaların ısı iletkenlik katsayıları

Tanım	Granül Aorejel (% hacim)	Termal İletkenlik (W/mK)
Doğal kireç sıva	-	0,50
Hidratlı kireç sıva + aorejel	80-90	0.050-0.045
Hidratlı kireç sıva + aorejel	91-95	0.021-0.019
Hidratlı kireç sıva + aorejel	96-99	0.016-0.014

Kaynak: Buratti vd. (2014).

İbrahim vd. (2015), silika arojel içerikli yalıtım sıvalarının dış cephe ısı yalıtım uygulamalarında kullanarak malzemenin geliştirilmesi için incelemeler yürütmüşlerdir. Silika arojel bazlı sıvalar hem yeni binaların cephe uygulamalarında hem de tarihi binaların geleneksel yığma cephelerinde uygulandığında yüksek yalıtım performansına sahip olduğunu tespit etmişlerdir. Ayrıca, silika arojel içerikli yalıtım malzemelerinin kolay uygulanabilir olduğunu ve uygulamada bilinen teknikler ile mevcut binaların termal güçlendirilmesinde kullanıldığını ortaya koymuşlardır. Malzemenin kullanım amacı, dış duvarların higrotermal performansını incelemek ve bu sıvalı ve sıvasız binaların enerji performansını belirlemektir. Sonuç olarak, silika arojel içerikli yalıtım malzemelerinin duvar ısı kayıplarını ve dolayısıyla evin enerji tüketimini önemli ölçüde azalttığı belirlenmiştir. Ayrıca, duvarların dış yüzeyine silika arojel bazlı sıva eklenmesinin nem risklerini önemli ölçüde azalttığını veya ortadan kaldırdığını göstermektedir. Böylelikle, arojelin hidrofobik doğası nedeniyle, silika arojel bazlı sıvalar su emilimini azaltmakta ve malzemenin hem hacimsel bileşiminin hem de termal davranışının sabit tutulmasını sağlamaktadır.

Stahl vd. (2012) hidrofobik granül silika arojelden (% 60–90 hacimce) oluşan bir sıva üzerinde çalışma gerçekleştirmişlerdir. Hazırlanan bu malzemenin ilk kullanım alanı tarihi açıdan hassas binaların güçlendirilmesine yöneliktir. Hazırlanan bu sıva karışımı, çimento ve minarel içermeyen bir bağlayıcıdan ve bazı katı maddelerden oluşmaktadır. Çünkü çimento malzemesi tarihi duvarların hem fiziksel hem de kimyasal yapısıyla uyumlu olmadığı için kullanılmamıştır. Çimento malzemesi tarihi yapılarda kullanıldığında duvarın geçirimsizliği artar, nemin uzaklaşması engellenir ve

çiçeklenme gibi istenmeyen durumlarla karşılaşılır. Bu karışımın hem elle hem de sıva makineleri ile duvarlara uygulanabilirliği mümkündür. Ancak sıva makinası ile üretilen numunelerin termal iletkenlik değeri elle üretilen sıvaya göre daha fazla artış gösterdiği belirtilmiştir. Bunun nedeninin makine ile üretimde su girişinin daha fazla olmasından kaynaklandığı bildirilmektedir. Malzemenin termal iletkenliğinin sıcak plaka cihazında yaklaşık 0,025 W/mK olarak ölçülmüştür. Termal iletkenlik değeri üretim sırasında sıvama makinasında karşılaşılan basınçla değişir. Su silika aerojel yapısına yüksek basınç nedeniyle kısmen zarar verir. Silika aerojel granülünün nano gözeneklerine giren su, hapsolür ve böylelikle malzemenin kuruması çok uzun zaman alır. Özetle, araştırmacılar tarafından üretilen bu malzeme su buharına karşı düşük direnç göstermesine rağmen kış ve yaz aylarında binalarda bulunan nem birikiminin azalttığı vurgulanmıştır. Şekil 35’de 1m²’lik alana uygulanan silika aerojel bazlı sıva uygulamalarının görseli verilmiştir.



Şekil 35. Test duvarına tek uygulamada uygulanan 1 m²’lik, kalınlığı az olan silika aerojel bazlı sıva uygulaması

Kaynak: Stahl vd. (2012).

Nosratti vd. (2017) yaptıkları çalışmada çeşitli araştırmalara dayanarak, termal performansın etkilendiği faktörlere dikkat çekmiş ve malzemedeki bozulmanın farklı yaşlanma faktörlerine ve numune bileşimine bağlı olduğunu bulmuşlardır. Alçı bazlı tüm numuneler için en büyük etki, termal iletkenliğin önemli ölçüde artmasıyla sonuçlanan aşırı donma ve çözülme döngüleri altında 15 yıllık eşdeğer bir süreden sonra gözlenmiştir. Genel olarak, aerojel ile güçlendirilmiş sıvalar, termal dirençlerini levhalar ve battaniyelerden daha hızlı kaybettiğini analizler sonucu belirlemişlerdir. Bu davranış,

aerojel esaslı sıvaların gözenekli yapısında zamanla meydana gelen bazı fiziksel değişikliklerden kaynaklandığını öne sürmüşlerdir. Yaşlanma öncesi ve sonrası analiz edilen numunelerin SEM görüntüleri, aerojel ile güçlendirilmiş sıvanın fiziksel yapısının değişimlerini göstermektedir. Ancak yaşlanma kaynaklı fiziksel değişiklikleri analiz etmek için daha fazla araştırma yapılması gerektiği tespit etmişlerdir. Genel olarak, aerojel ile güçlendirilmiş malzemelerin eskimeye dayalı termal dirençlerinin bozulmasına rağmen, bunların termal iletkenliklerinin eskime süreçlerinden sonra bile hala yaşlanmayan geleneksel yalıtım malzemelerinininkinden önemli ölçüde daha düşük kaldığını belirtmişlerdir.

İsviçre Federal Malzeme Bilimi ve Teknolojisi Enstitüsü, Empa'da Fixit grubu ile birlikte granül silika aerojel içerikli yalıtım sıvaları geliştirmiştir (Şekil 36). Sıva, hacim olarak %80'den fazla silika aerojel granül içerir ve geleneksel endüstriyel makine bazlı projeksiyon sistemleriyle duvarlara püskürtülerek uygulanmaktadır. Silika aerojel içerikli malzemenin duvara püskürtme yöntemi ile uygulamasından sonra termal iletkenlik değeri ölçülmüş bu değerin 0,025 W/mK'nin altında olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca, duvar püskürtme testi sonrası elde edilen numuneler ölçüldüğünde, ortam koşulları altında 0,08-0,09 W/mK civarında termal iletkenlik değeri ölçülmüştür. Bununla birlikte ölçülen değerler standart yalıtım sıva malzemelerinin ısı yalıtım performansının iki katından fazla olduğunu göstermektedir (Koebel vd., 2012).



Şekil 36. Empa ve Fixit tarafından geliştirilen yüksek performanslı silika aerojel yalıtım sıva malzemesinin enine kesiti

Kaynak: Koebel vd. (2012).

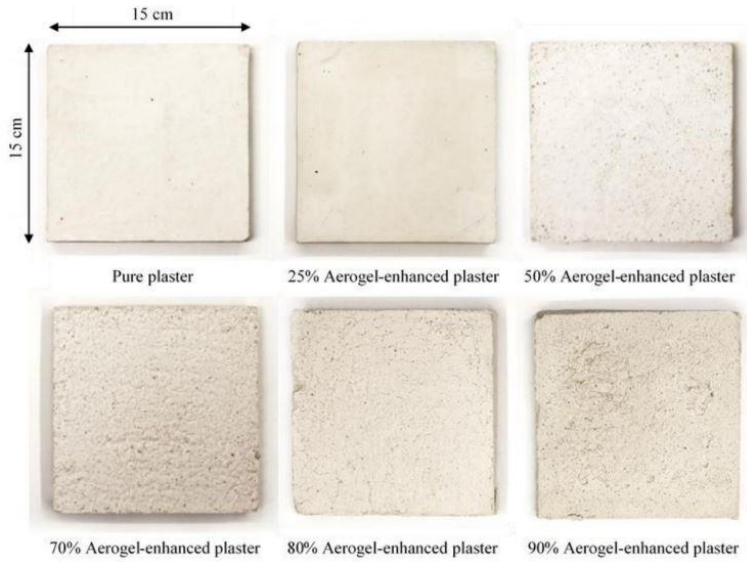
Parexlanko ve MINES ParisTech/AR-MINES/CEP'in silika arojel takviyeli sıvaları üreten Fransız firmalardır. Amaçları, hidrofobik granüler silika arojelleri geleneksel yöntemlere mümkün olduğunca yakın yöntemler (örneğin, çimento bazlı harçlar, geleneksel teknikler) kullanarak harici uygulama için iyi bir termo-mekanik uzlaşma elde etmektir. Isıl iletkenlik değerleri 0,050 W/mK'ne yakın (sıcak korumalı levha yöntemiyle ölçüldüğü üzere) ve eğilme dayanımı 0,5 MPa'dan büyük olan bazı harçlar üretilmişlerdir. Daha sonra firma bu malzemenin üretimini endüstriyel hale getirmeyi amaçlamıştır. Sonrasında deneysel uygulama için Fransız FUI projesi seçilmiş ve eski mevcut binalarda gerçekleştirilmesi planlanmıştır (Koebel vd., 2012). Nanotech Aspen tarafından yapılan bir başka araştırmada, polipropilen, cam elyaf ve alçıpan levha ile birleştirilmiş silika arojel teknolojisine dayalı yalıtım amaçlı levhalar geliştirilmiştir (Curto ve Cinieri, 2020).

Son yıllarda granül silika arojellerin farklı yapı malzemeleri ile birleştirilerek termal yalıtım amacıyla kullanımı, geleneksel malzemelere kıyasla yüksek termal performans sergilemesi bu malzemeleri odak noktası haline getirmiştir. Bu malzemeler sadece sıva ve harç ürünlerinde değil aynı zamanda kum, çimento gibi birçok yapı malzemesiyle karıştırılarak ultra hafif alçı levha ve beton üretilebileceğini kanıtlamıştır. Granül silika arojel içerikli çimento malzemesi hafif özellikte olması ile depreme karşı daha dayanıklı yapı oluşması sağlanmaktadır. Bir başka çalışmada silika arojel esaslı opak alçı levhalar ve paneller geliştirilmiştir. Düşük termal iletkenliğe sahip bu ürünlerle duvar kalınlığını arttırmadan bina kabuğunu yalıtım mümkün olmuştur. Silika arojel içerikli malzemeler doğa dostudur. Bu nedenle karbon salınımının önemli oranda azalmasına etki etmektedir. Ayrıca malzemenin hidrofobik özelliğinden dolayı mimarı yapılara su yalıtımı sağladığı da bilinmektedir (Curto ve Cineri, 2020; Alparslan, 2021).

Mermer ve Pişkin (2019) yaptıkları çalışmada kumdan ultrason destekli sol-jel yöntemi ile silika arojel sentezi gerçekleştirerek silika arojeli termal yalıtım özelliği olan sıva üretiminde kullanmışlardır. Bu amaçla, ekonomik özellikte olan kumdan ortam basıncında hidrofobik özellikte silika arojel üretimi gerçekleştirmişlerdir. Hazırlanan yalıtım sıva numunelerde termal iletkenlik ölçümü analizi yapılmıştır. Farklı silika arojel takviye oranlarında (%0, %1, %5, %10) üretilen alçı karışımlarının ölçülen termal iletkenlik değerleri incelendiğinde %10 oranında silika arojel içeren alçı sıva numunesinin arojel içermeyen sıvaya göre %26,05 değerinde daha etkin yalıtım

özelliğine sahip olduğunu belirtmişlerdir. Bu ürün binaların iç ve dış duvar uygulamalarında termal performans artırıcı yalıtım malzemesi olarak kullanımının gerçekleşebileceğini bilgilendirmişlerdir.

Nosrati ve Berardi (2018), çalışmalarında hidrofobik granül silika aerojel ile güçlendirilmiş yalıtım sıvaları geliştirmişlerdir. Cabot şirketinden temin edilen hidrofobik silika aerojel ile alçı tozu karıştırılarak oluşan sıva 150x150x200 mm boyutlarında kalıplara dökülerek deney numuneleri laboratuvar ortamında oluşturulmuştur. Şekil 37’de farklı hidrofobik silika aerojel takviye oranlarında (hacimce %0, %25, %50, %70, %80, %90) üretilen alçı levha numunelerinin termal iletkenlik analizi sonucundaki değerleri incelendiğinde, silika aerojel takviyesiz deney numunesinin 0,140 W/mK termal iletkenliğe sahip olduğu, en yüksek takviye oranına sahip deney numunesinin ise 0,027 W/mK termal iletkenlik değeri gösterdiği tespit edilmiştir. Analiz sonucuna göre silika aerojel miktarının artması ile termal iletkenlik değerinin azaldığı ölçülmüştür. Sonuç olarak silika aerojel içeren alçı sıva numunesinin silika aerojel içermeyen alçı sıvaya göre %82,2 değerinde daha etkin termal yalıtım sağladı sonucuna ulaşılmıştır.



Şekil 37. Hidrofobik silika aerojel ile güçlendirilmiş sıva örnekleri

Kaynak: Nosrati ve Berardi (2018).

Berardi ve Nosrati (2018), silika aerojel katkı oranlarını hacimce %0, %25, %50, %70, %80, %90 olacak şekilde planlamışlardır. Farklı silika aerojel takviye oranlarında hazırladıkları alçı levha numunelerine laboratuvar koşullarında hızlandırılmış yaşlanma

işlemi uygulandığında, silika aerojel ile güçlendirilmiş yalıtım malzemelerinin termal performansı üzerindeki etkilerini incelemiştirlerdir. Hazırlanan numunelerin hızlandırılmış yaşlandırma öncesi ve sonrasında termal iletkenlik katsayıları ölçülmüştür. Yaşlandırma işleminden öncesi ölçülen termal iletkenlik sonuçlarına göre; aerojel miktarı arttıkça termal iletkenlik değerinde azalma gerçekleşmiştir. Hacimce %90 aerojel içeren alçı levha numunesinin aerojel içermeyen alçı levha numunesine göre termal iletkenlik değerinde yaklaşık %80.68 değerinde azalma gerçekleşmiştir. Bu değer aerojel oranı fazla olan numunenin daha etkin yalıtım özelliğine sahip olduğunu göstermektedir. Daha sonra deney numunelerinin yaşlandırma sonrasında (20 yıl) termal iletkenlik değerleri analiz edilmiştir. Sonuçlara göre, normal koşullardaki aerojel takviye oranı arttıkça termal iletkenlik kat sayısında azalmanın olduğu ve yaşlandırma sonrasında aynı aerojel katkı oranlarında termal iletkenlik katsayılarının ilk değerlere göre yalnızca %10'nun altında bir artış olduğu belirtilmiştir. Son olarak, bu çalışmada malzemenin yaşlandırılmasına bağlı bir miktar bozulmaya rağmen aerojel ile güçlendirilmiş malzemelerin yaşlanmadan sonra termal iletkenliğinin, yaşlanmayan geleneksel yalıtım malzemelerinkinden önemli ölçüde daha düşük kaldığını göstermektedir.

Achard vd. (2011) mineral ve organik bağlayıcıları içeren hidrofobik silika aerojel içerikli yalıtım sıvası geliştirdi ve patentini aldılar. Hidrofobik aerojel içerikli yalıtım sıvasının yoğunluğu 156 kg/m^3 , termal iletkenlik katsayısı 0.0268 W/mK değerinde belirlenmiştir. Achard ve arkadaşları tarafından geliştirilen sıva, yapının duvar yüzeyine püskürtülerek uygulanmaktadır.

Bostancı (2021) silika aerojel katkılı hibrit silis dumanı harç karışımlarının mekanik, termal iletkenlik, por yapısı ve mikro yapı özelliklerinin değerlendirilmesi üzerine araştırma yapmıştır. Bu amaçla düşük miktarda silika aerojel takviye oranları (çimento ağırlığınca %0, %0.25 ve %0.5) ile çimento harç karışımları elde etmiş, harç karışımlarının alkali aktivasyonu için düşük oranda sodyum karbonat (Na_2CO_3) ilave etmiştir. Elde edilen harç karışımlarının 2, 7 ve 28 günlük kür sürelerinden sonra deneyler gerçekleştirilmiştir. Deney sonuçlarına göre harç karışımlarına ilave edilen silika aerojel sayesinde deney numunelerinin termal iletkenlik değeri silika aerojel miktarı arttıkça azaldığını vurgulamıştır. Silika aerojel katkısız deney numunesinin termal iletkenlik değeri, %0.25 silika aerojel katkılı deney numunesinin termal

iletkenlik değerine göre %28 düzeyinde geliştiğini bildirmiştir. Diğer taraftan %25 silika arojel takviyeli deney numunelerinin basınç dayanım özelliği maksimum %2.4'lk düşüş gösterdiğini test etmiştir. Eğilme dayanımı sonuçları incelendiğinde, basınç dayanım sonuçları ile uyumlu sonulandırđını ifade etmiştir. Ayrıca, deney numunelerinde artan silika arojel miktarının ve aktivatör dozajının eğilme ve basınç dayanımlarını az miktarda da olsa geliştirdiğini belirtmiştir.

stndağ ve Sola (2022) silika arojelin ve silis dumanının imento esaslı harçların termal iletkenlik ve mekanik özelliklerinin üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Bu amaçla düşük katkı miktarlarında silika arojel (imento ağırlığınca %0, %0.25 ve %0.5) takviye oranlarını belirlemişlerdir. Harç numuneleri hazırlanırken silika arojel ile birlikte imento, silis dumanı, standart kum kullanılmıştır. Karıştırma işlemi tamamlandıktan sonra imento harcı numuneleri için 40mmX40mmX160mm boyutlarında standart kalıpta deney numuneleri üretilmiştir. Hazırlanan harç numuneleri 16 hafta süreyle suda krleme, ıslatma-kurutma etkisi ve MgSO₄ etkisine tabi tutulmuştur. Deney sonuçlarına göre %0.25'lik bir arojel içeriğinde silika dumanı ilaveli su krleme numunesinden %31.2'lik en yüksek ısıl iletkenlik azalması elde edilmiştir. Maksimum basınç ve eğilme dayanımları sırasıyla %0.50 arojel içeriğinde 74,5 MPa ve arojel içeriği olmayan 11,3 MPa'da silis dumanı ilaveli numunelerden ıslatma-kurutma krleme ile belirlenmiştir. Bununla birlikte, en düşük ısıl iletkenlik katsayısı, MgSO₄ etkisi altında krleme işlemini tamamlayan %0,25 silis dumanı içeren arojel içeriğindeki numuneden 1.458 W/mK olarak llmştir ve en yüksek basınç dayanımı artışı %24,6 olmuştur.

Mimari Yapılarda Silika Arojel Takviyeli Lehva, Panel, Battaniyeler ve Uygulamaları

Silika arojeller yalıtım uygulamaları için istenilen termal özelliklere sahiptir. Ancak silika arojel malzemelerinin bazı özelliklerini geliştirmek, malzemenin zayıf yanlarını (kırılđanlık gibi) gidermek amacıyla silika arojelleri aynı özelliklerini koruyarak farklı fiziksel formlarda hazırlamak ve bunları güçlendirmek için ikinci bir bileşen eklemek veya her ikisini birden yaparak istenen termal performansa sahip daha güçlü malzemeler elde etmek için etkili yöntemler dşnlmştir. Bu bağlamda silika arojel içeren levha, panel ve battaniyeler geliştirilerek mimari uygulamalarda yenilikçi malzemelerle yenilikçi çözümler elde edilmiştir.

En büyük silika aerojel malzemesi üreticilerinden biri olan Aspen Aerogel'in Spaceloft adıyla ürettikleri yalıtım battaniyesi inşaat endüstrisinde giderek daha yaygın bir kullanım alanı bulmaktadır. Silika aerojel battaniyenin uygulaması için İsviçre federal enerji ofisi (BFE) tarafından desteklenen örnek bir proje gerçekleştirilmiştir. Proje kapsamın da Zürih'te 20. yüzyılın başlarından kalma çok aileli bir şehir evi seçilmiş ve evin orijinal stilini ve biçimini değiştirmeden koruyarak cephesine Aspen Spaceloft battaniye yalıtımı uygulaması yapılmıştır. İlk etap da dış cephedeki orijinal duvarın kaplaması çıkarıldı ve iki adet 10 mm kalınlığında Spaceloft battaniyesi yapıştırıldı. Daha sonra 30 mm kalınlığında standart yalıtım sıvası uygulandı. Uygulama sonrasında güçlendirilmiş duvarın termal yalıtım değeri orijinal termal yalıtım değerinden üçte birinden az olduğu tespit edilmiştir. Şekil 38 ve Şekil 39'da Spaceloft battaniyelerinin binanın dış cephesinde gerçekleşen montajına ait görüntüler verilmektedir. Aspen tarafından üretilen Spaceloft battaniyenin taşıma, kesme ve uygulama sırasında toz yayması işçilerin koruyucu güvenlik kıyafetleri giymelerini gerektirmektedir (Koebel vd., 2012).



(a)

(b)

Şekil 38. İsviçre, Zürih'te 20. yüzyılın başlarından kalma çok aileli bir şehir evinin tadilatı. (a)Yenilemeden önceki dış görünüm (b)yenilemeden sonraki dış görünüm

Kaynak: Koebel vd. (2012).



Şekil 39. Spaceloft battaniyeleri ile dış cephe duvar yalıtımı montaj uygulaması

Kaynak: Koebel vd. (2012).

Aspen Aerojelin geliştirdiği bir diğer ürün ısı yalıtımı için esnek bir arojel fiber kompozit örtüdür. Çok düşük bir termal iletkenliğe sahip olan bu ürün aynı zamanda oldukça iyi bir yük taşıma yeteneğine sahiptir (Şekil 40).



Şekil 40. Aspen arojel'in geliştirdiği arojelfiber kompozit örtü

Kaynak: Ryu (2000).

Silika arojel içerikli malzemelere ait örneklerden biri STO "in Aevero" ürünüdür. Bu ürün kompozit levhadır ancak polimerik bağlayıcılarla birleşerek silika granül arojelden üretilmektedir. Uygulama açısından bakıldığında malzemenin montajının kolay olması bina tadilatını hızlı bir şekilde sonuçlandırmakta ve yapı endüstrisinde

büyük avantaj sağlamaktadır. Silika arojel içerikli battaniyelere ait bir başka örnek ‘AEROCALCE’ yapı ürünüdür. Şekil 41’de evin dış cephe uygulamasına ait bir örnek verilmektedir. Bu malzeme ile evin bodrum katı yalıtımının güçlendirilmesi yapılmıştır (Koebel vd., 2012).



(a)

(b)

(c)

Şekil 41. Aerocalce arojel battaniye yalıtım sistemi ile binanın yalıtımının güçlendirilmesine ait örnekler. (a) binanın önden ve yandan görünümü (b) Aerocalce sisteminin katmanlı yapısının enine kesiti (c) zemindeki duvar ve pencere detayları

Kaynak: Koebel vd. (2012)

“AMA Arojel” şirketinin üretmiş olduğu Aerogips alçı paneli yüksek yoğunluklu alçı kaplı levha ile birleştirilmiş silika arojel bazlı termal ve akustik performans sağlayan bir yapı ürünüdür (Şekil 42). Bu ürün en az alanda maksimum termal yalıtım sağlayarak binaların enerji korunumunda etkin rol oynamaktadır. Termal yalıtım sağlayan aerogips yalıtım levhası yatay ve dikey yüzeylerde, duvarlar, zeminler, tavanlarda, hafif duvarların kullanıldığı tüm yapılarda ve taşıyıcı olmayan yeni duvarların tasarlanmasında kullanılmaktadır. Mevcut bina, konut ve ticari uygulamaların iç müdahalelerinde, iç mekan yenilemelerinde ve tarihi binaların restorasyon süreçlerinde alçı levhalar kullanılmaktadır. Yapı malzemesi 0.015 W/mK’ye eşit bir termal iletkenlik katsayısına sahiptir. Ayrıca, su itici yapısı ile su geçirmez özelliğe sahiptir (Url-8).



Şekil 42. Aerogips alçı panelini iç duvarda termal yalıtım uygulaması

Kaynak: Url-9

Silika aerojel takviyeli malzemelerin ısı yalıtım özelliğinden yararlanmak için Avrupa Birliği tarafından finanse edilen çeşitli projeler devam etmektedir. Bu projelerin ilki olan AEROCOINS projesinin amacı selüloz bazlı nano liflerin silika aerogellerle güçlendirilmesiyle oluşan süper termal yalıtım sağlayan ve bunun yanında mekanik mukavemete sahip levhalar üretmektir.

Mimari Yapılarda Silika Aerojel Takviyeli Boyalar, Duvar Kağıtları ve Uygulamaları

Silika aerojel ile geliştirilmiş boyalar, duvar kağıtları ve duvar kaplamaları binaların iç ve dış duvar yüzeylerinde termal yalıtım amaçlı uygulama örnekleri mevcuttur. “AMA Aerojel” firmasının gelişmiş teknolojiyi kullanarak ürettiği ‘Thermogel Paint’ ürünü, enerjinin duvara yayılmasını engelleyerek termal köprülerin oluşumunu en az seviyeye indirebilen ısı yansıtıcı boyalar olarak üretilmiştir. Yüzeylerde termal köprüleri azalttığı için duvarda yoğuşma ve nem oluşumunu engeller nefes alan yüzeyler oluşturur. Böylelikle küf oluşum riskini en az seviyeye indirerek önler. Bu ürün uygulandığı yüzeyde yalıtım bariyeri etkisi yaratır ve hem iç hem de dış sıcaklığı düşürerek enerji tasarrufu sağlar. Standart boyalara kıyasla silika aerojel içerikli boyaların ısı transferine olan direnci en az 4 kat daha yüksektir. Bu malzeme yazın ısınan havanın binanın içine iletilmesini önlemekle kışın iç mekanda ki ısının dışarıya iletimini engelleyerek binanın içinde daha uzun kalmasını sağlar (Şekil 43). Thermogel boyanın kullanım alanı

oldukça geniştir. Bu üstün özellikli boya plastik ve cam yüzeylerde, iç ve dış duvarlarda, prefabrik beton elemanlarda ve çatılarda uygulanmaktadır (Url-10).



Şekil 43. Ama Aerojel firmasının ürettiği Thermogel Paint ürününün uygulaması

Kaynak: Url-11

Nguyen vd. (2020) sentezledikleri hidrofobik silika aerojel tozunun düşük katkı oranlarında (%3-7) su bazlı akrilik boyaya ilave ederek elde ettikleri ısı yalıtım boyasının termal yalıtım performansını incelemişlerdir. Yapılan deneyler sonucunda ağırlıkça %6 oranında hidrofobik silika aerojel takviyesiyle elde edilen yenilikçi boyanın termal performansının önemli oranda iyileştirdiğini tespit etmişlerdir.

Konut bina stoğunun güçlendirilmesi, önümüzdeki yıllarda Avrupa inşaat sektörü için büyük önem teşkil etmektedir. AB'nin Enerji Yol Haritası tarafından belirlenen 2050 karbondan arındırma hedeflerine ulaşmak için Avrupa Komisyonunun finanse ettiği EASEE araştırma projesi binaların termal güçlendirmesine yönelik bütüncül bir yaklaşım geliştirerek bu konuyu ele almışlardır. Bu proje kapsamında Masera vd. (2017) mevcut konut binalarının iç mekan enerji uyarlaması için süper yalıtımlı silika aerojel bazlı tekstil duvar kağıdının geliştirilmesine yönelik çalışmalar başlatmışlardır. Geliştirilen tekstil duvar kağıdının mevcut yapıların iç duvarlarına uygulayarak yalıtım katmanının oluşmasını hedeflemişlerdir. Silika aerojel içerikli tekstil duvar kağıdı yüksek termal performans göstermesi (daha soğuk iklimlerde $0.2 \text{ W/m}^2\text{K}$ U değerine ulaşması) ve su buharı geçirgenliğini sağlaması için laboratuvar ölçeğinde karakterize çalışmaları yapılmış ve test edilmiştir. Tekstil duvar kâğıdının kumaş terbiye sisteminin kolay temizlenebilir olması ve kurulum kolaylığı ile rahat germe ve sökme imkanı

sağlayacak şekilde tasarlamışlardır. Aynı zamanda taşıma ve depolama kolaylığı sağlayan malzemelerdir. Milano’da bir bina duvar kâğıdını uygulamak için çalışma alanı seçildi. Daha sonra binanın iç duvarı silika aerojel bazlı tekstil duvar kâğıdıyla güçlendirildi. Bu uygulamanın yapılmasındaki amaç, tekstil duvar kâğıdının gerçek bir mekanda uygulanabilirliğini test etmektir. Montaj sırasında dikkat edilmesi gereken hususların belirlenerek gerçekçi bir durumda ortaya çıkabilecek olası problemlerin test edilmesi için uygulama simülasyonu gerçekleştirilmiş ve bir takım standartların belirlenmesi için oldukça faydalı olduğunu belirtilmiştir (Şekil 44).



Şekil 44. Aerojel bazlı tekstil duvar kâğıdının uygulanması

Kaynak: Maseraa vd. (2017).

Industrial Nanotech Incorporated şirketi, silika aerojel parçacıklarının boyalara katılmasıyla yeni bir boya türü geliştirdi. Şirket araştırmacıları, Nansulate olarak adlandırılan bu patentli malzemenin önemli bir ısı yalıtım performansı sağlayabileceğini iddia etmektedir. Bu malzeme oldukça gözenekli partiküllerden oluşmaktadır. Silika aerojel içerikli bu malzeme ince bir tabaka halinde ısı transferini sınırlandırmaktadır. Bu ürün su bazlı boyalara karıştırılarak iç ve dış duvar uygulamalarında kullanılabilir. Ayrıca, çatı katlarında, tam açıklık gerektirmeyen pencerelerde, plastik veya ahşap panjurlarda, sıcak su ısıtıcılarında yalıtım amaçlı kullanılabildiği literatürde de yer almaktadır. Silika aerojel içerikli yalıtım amaçlı kullanılan malzemeler minimum yalıtım kalınlığı ile geleneksel malzemelere göre yaklaşık 2-5 kat çok daha iyi yalıtım performansı sergilediği tespit edilmiştir. Araştırmacılar tarafından ortaya

sunulan HIPIN (High Performance Insulation Based on Nanostructured Encapsulation of Air) projesinin amacı, yalıtım malzemelerine ilave edildiğinde esnek, dayanıklı, sağlam özelliklere sahip silika aerojelleri geliştirmektir. Ayrıca, daha sağlam silika aerojellerin geliştirilmesinin aerjel üretim maliyetini düşürmesi beklenmektedir. Proje kapsamında geliştirilen ürünler; sıvalara, boyalara ve hatta kalın kaplamalara entegre edilebilen ve uygulanabilen nitelikte olması hedeflenmektedir (Ülker vd., 2014).

2.10. Bölüm Sonucu

Çalışmanın kavramsal altyapısının ortaya konulduğu bu bölümde alçı ve alçı levha malzemesinin tanımlanması, alçı levha malzemesinin kullanım alanları, silika aerojelin tanımlanması, silika aerojelin özellikleri, sentezlenmesi, kullanım alanları, silika aerojelin mimarlık alanında yeri, önemi ve silika aerjel malzemesinin mimarlık alanında uygulamaları açıklanmıştır.

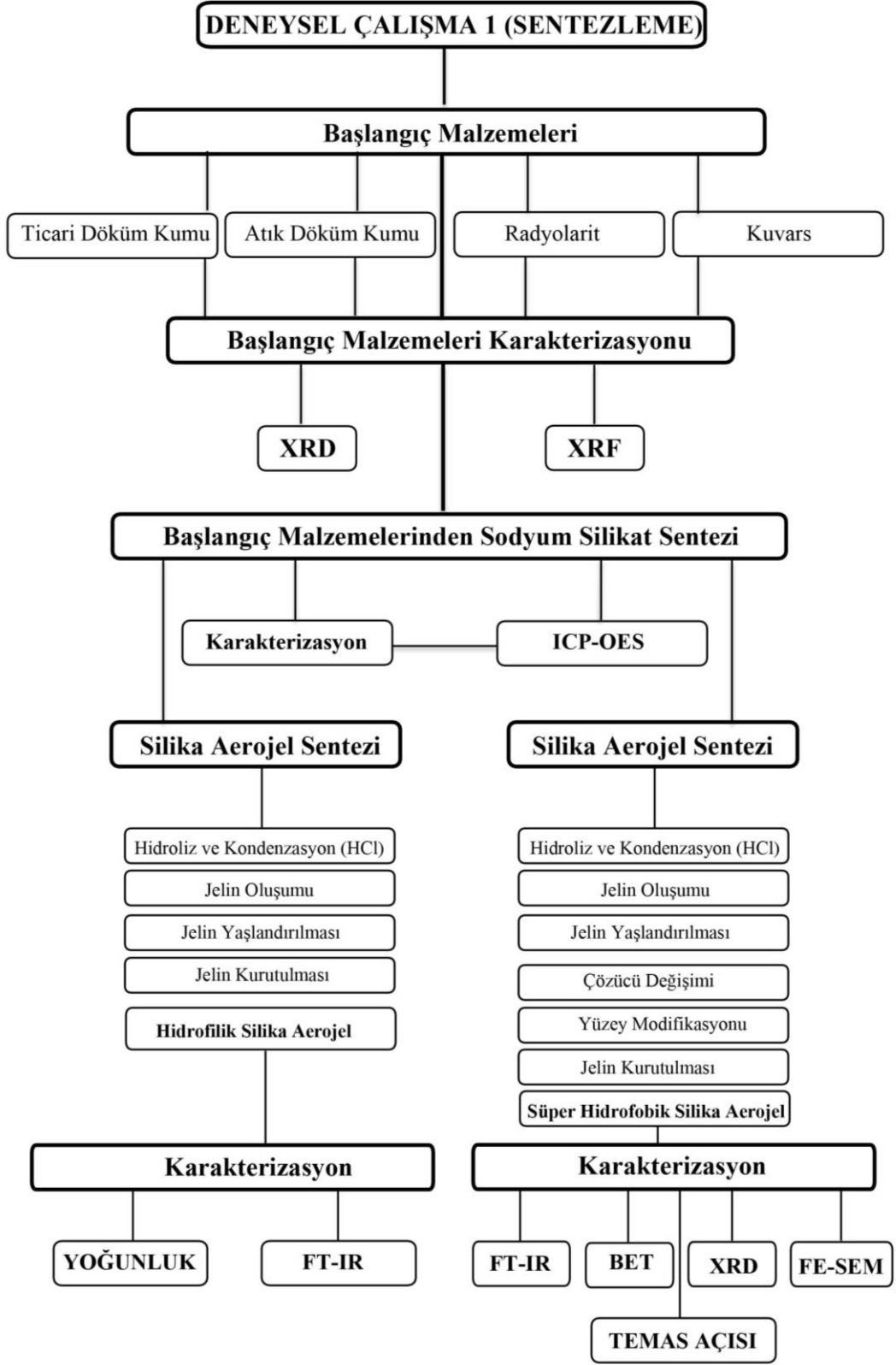
Silika aerjel malzemelerinin yüksek termal performans gibi üstün özelliklere sahip olmaları, takviye edildikleri geleneksel yapı malzemelerinin termal iletkenlik özelliklerini iyileştirerek mimari yapılarda ısı muhafazası ve enerji verimliliğini ortaya koymuştur. Ayrıca enerji, performans, çevre, sürdürülebilirlik gibi birçok özellik, teknoloji ile geliştirilen bu yenilikçi malzemeye istenilen özelliklerin dahil edilebilmesi ile malzemenin verimlilik düzeyinin artması sağlanmıştır. Bir sonraki bölümde, çalışmanın yöntemi, deneysel çalışmalar, silika aerjel malzemelerinin sol-jel yöntemi ile sentezlenmesi ve yüzey modifikasyonu, alçı levha deney numunelerinin üretilmesi, sentezlenen silika aerjel malzemelerinin karakterizasyon çalışmaları, mimarlık uygulamaları kapsamında üretilen silika aerjel katkılı alçı levha deney numunelerinin mekanik mukavemet testlerinin ve fiziksel özellik testlerinin yapılmasına yönelik çalışmalara yer verilecektir.

3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

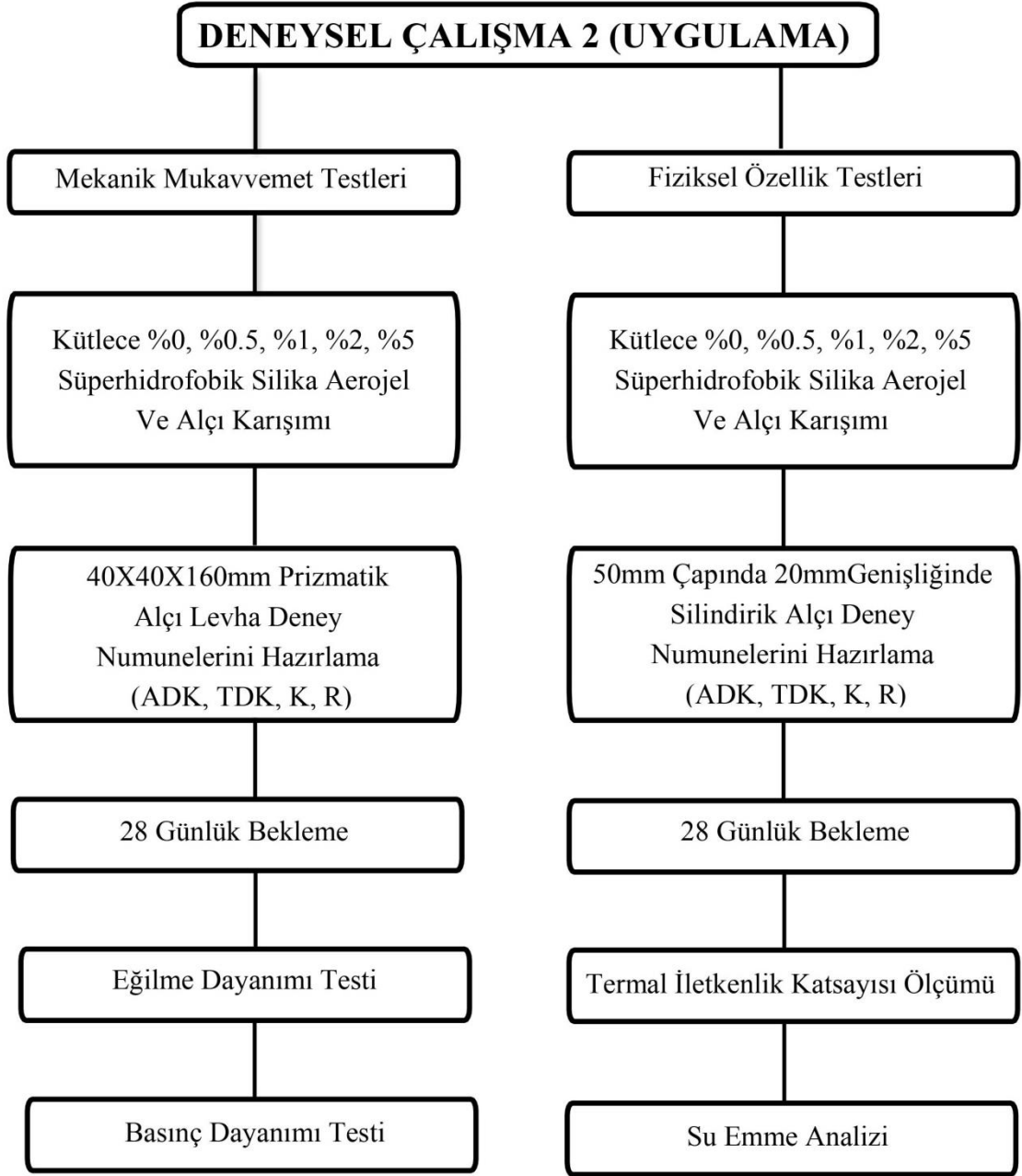
Bu çalışma 2 aşamadan gerçekleştirilmiştir. İlk aşamada çalışmada; sol-jel yöntemi kullanılarak silika aerojel sentezi gerçekleştirilmiştir. Sentezleme çalışmalarının devamında silika aerojel katkılı alçı levha üretimi ile mimari yapı elemanı uygulamaları kapsamında deney numunelerinin üretim aşaması yapılmıştır. Bu amaç için gerçekleştirilen deneysel çalışmalar dört aşamadan oluşmaktadır. Öncelikle farklı silika kaynaklarından sodyum silikat çözeltisi elde edilmiş, hemen akabinde farklı silika kaynaklarından sol-jel yöntemi ile hidrofilik aerojel sentezi gerçekleştirilmiş ve optimum parametrelerle yüzey modifikasyonu yapılarak süperhidrofobik silika aerojel üretimi sağlanmıştır. Sentezi sağlanan nihai toz numuneleri ile silika aerojel katkılı alçı levha üretimi yapılmıştır. Bu çalışmaların son kısmında ise elde edilen silika aerojel ürünün karakterizasyonu ve alçı levha numunelerinin mekanik ve fiziksel özelliklerinin tespiti şeklinde deneysel çalışmalar yürütülmüştür.

Farklı başlangıç kaynaklarından sodyum silikat çözeltisi elde edildikten sonra, asit katalizörü kullanarak (HCl) 5 farklı pH aralığında sol-jel yöntemi ile öncelikle hidrofilik silika aerojel sentezi gerçekleştirilmiştir. Farklı pH parametreleri uygulanarak sentezlenen silika aerojellere yoğunluk, FT-IR, BET çalışmaları ile birlikte seçilen parametrelerin sentezlenen aerojeller üzerindeki etkisi incelenmiştir. Tespit edilen optimum pH parametresi ile sentezlenen silika aerojeller trimetilklorosilan (TMCS) kullanılarak yüzey modifikasyonu işlemi gerçekleştirilmiş böylelikle ürüne süperhidrofobiklik kazandırılmıştır. Yapılan deneysel çalışmalar, Şekil 43'de verilen akış şemasında gösterilmiştir.

Çalışmanın ikinci aşamasında mimari uygulamalar kapsamında alçı levhaların performansını geliştirmek amaçlı süperhidrofobik silika aerojel katkılı alçı levha numuneleri üretilmiştir. Nihai toz numunelerin sentezinden sonra %0, %0.5, %1, %2, %5 olmak üzere 5 farklı katkı oranlarında süperhidrofobik silika aerojel takviyeli alçı levha numuneleri üretimi yapılmış sonrasında malzemenin mekanik ve fiziksel özellikleri incelenmiştir. Yapılan deneysel çalışmalar, Şekil 45 ve Şekil 46'da verilen akış şemasında gösterilmiştir.



Şekil 45. Deneysel çalışma 1 (sentezleme) akış şeması



Şekil 46. Deneysel çalışma 2 (uygulama) akış şeması

3.1. Malzemeler

3.1.1. Hammaddeler

Deneysel çalışmalarda silika kaynağı olarak Konya ve çevresinden 4 farklı kaynak kullanılmıştır.

1. Seydişehir Eti Alüminyum tesislerinin dökümhanesinde kullanılan Konya MRT Döküm'den alınan ticari döküm kumu,
2. Konya Seydişehir Cengiz Holding'e bağlı Eti Alüminyum Tesislerinin dökümhanesinden sağlanan atık döküm kumu
3. Konya'nın Beyşehir ilçesinden temin edilen silisyum içerikli radyolarit taşı,
4. Konya'nın Güneysınırı ilçesindeki silisyum içerikli kuvars taşı,

Konya'nın Güneysınırı ve Beyşehir ilçesindeki silisyum içerikli kuvars taşı ve radyolarit numuneleri deneysel çalışmalarda öncesinde kırıcıda küçük boyutlu parçalar haline getirilmiştir ve ardından 50 µm boyutunda öğütülmüştür. Döküm kumu ve atık döküm kumu diğer silika kaynaklarına göre daha küçük boyutta olduğu için numuneler sadece 50 µm boyutunda öğütülmüştür. Herhangi bir kurutma işlemi gerçekleştirilmeden XRD ve XRF cihazları kullanılarak karakterizasyon işlemleri gerçekleştirilmiştir.

3.1.2. Kimyasal Malzemeler

Sol-jel yöntemi ile silika aerojel sentezinde kullanılan kimyasal malzemeler etanol, saf su, hidroklorik asit, sodyum hidroksit, n-hekzan, TEOS, TMCS'dir. Deneysel çalışmalarda kullanılan kimyasal malzemeler Tablo 8'de verilmiştir.

Tablo 8. Kimyasal Malzemeler

Kimyasal Malzeme Adı	Kimyasal Formül	Kullanım Amacı	Temin Edilen Yer	Safılık Derecesi
Hidroklorik Asit	HCl	Silika Aerojel üretim reaksiyonunda asit katalizörü olarak	MERCK	37
Sodyum Hidroksit	NaOH	Silisyumun ekstraksiyonu reaksiyonunda	Labor Teknik	99
Trimetilklorosilan (TMCS)	C ₃ H ₉ ClSi	Hidrofoblaştırma ajanı olarak	Sigma Aldrich	≥99
Tetraetilortosilikat (TEOS)	SiC ₈ H ₂₀ O ₄	Yüzey modifikasyonunda	MERCK	99
Etanol	C ₂ H ₅ OH	Silika aerojel üretiminde yaşlandırma basamağında	Kimetsan Etanol	96
Hekzan	C ₆ H ₁₄	Silika aerojel üretiminde yaşlandırma basamağında, yüzey modifikasyonu işlemleri sırasında ve yıkama aşamasında	MERCK	

3.2. Deneysel Yöntem

Çalışmanın deneysel yönteminde, tezin amaçları ve önemi doğrultusunda, literatür araştırmalarına bağlı olarak oluşturulan kurgu anlatılmıştır. Bu kapsamda deneysel çalışmalar 4 aşamadan oluşmuştur. Bu aşamalar aşağıda sırasıyla verilmiştir.

1. Başlangıç malzemeler temin edilmiş ve karakterizasyonu gerçekleştirilmiştir,
2. Silika aerojel sentezi yapılmıştır,
3. Sentezlenen süperhidrofobik silika aerojelin karakterizasyonu yapılmıştır,
4. Mimari yapı uygulamaları kapsamında silika aerojel takviyeli alçı levha deney numunlerinin üretilmiş, fiziksel ve mekanik özellikleri incelenmiştir.

1. Aşama: 4 farklı başlangıç malzemelerinin temini ve karakterizasyon çalışmaları doğrultusunda, ticari döküm kumu (TDK), atık döküm kumu (ADK), kuvars (K), radyolarit (R), içerisindeki silisyum oranı tespit edilmiştir.

2. Aşama: Bu çalışmada sol-jel yöntemi kullanılarak silika aerogel sentezi ticari döküm kumu, atık döküm kumu, kuvars taşı, radyolarit taşı, gibi farklı silika kaynakları kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Başlangıç malzemeleri ile ilgili gerekli hazırlıklar tamamlandıktan sonra deneysel çalışmalar aşağıda verilen sıraya göre yapılmıştır.

- Ticari döküm kumundan silika aerogel üretilmiş ve üretim parametreleri taranmıştır.
- Atık döküm kumundan silika aerogel üretilmiş ve üretim parametreleri taranmıştır.
- Radyolaritten silika aerogel üretilmiş ve üretim parametreleri taranmıştır.
- Kuvarsdan silika aerogel üretilmiş ve üretim parametreleri taranmıştır.
- Ticari döküm kumundan, atık döküm kumundan, kuvarsdan, radyolaritten yüzey modifikasyonu yapılarak süperhidrofobik silika aerogel üretilmiş ve üretim parametrelerinin taranmıştır.

Deneysel çalışmalarda, çalışmanın çıkış noktalarından bir olan Sol-Jel yöntemi kapsamında silika aerogel sentezi için ilk önce başlangıç malzemeleri olan silis kaynakları saflaştırılmıştır. Ardından başlangıç malzemelerinden sodyum silikat sentezi gerçekleştirilmiştir. Başlangıç malzemelerinden çözelti hazırlama işleminden sonra yaşlandırma işlemi, kurutma işlemi ve nihai ürün olan silika aerogel elde edilmiştir.

3. Aşama: Sol-jel yöntemi ile sentezlenen süperhidrofobik silika aerogelin karakterizasyon çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Sentezleme çalışmalarının uygunluğuna ve sentezleme çalışmalarının optimizasyonuna yönelik olarak bazı çalışmalar yapılmıştır.

- Başlangıç malzemelerinin elementel ve kimyasal bileşenlerini belirlemek için XRF analizi
- Başlangıç malzemelerinin yapısal özelliklerinin tespiti için XRD analizi
- Başlangıç malzemelerinden elde edilen sıvı sodyum silikat çözeltisinin elementlerini belirlemek için ICP-OES analizi
- Sentezlenen silika aerogelin içerdiği bileşikler tanımlamak için FT-IR analizi, sentezlenen silika aerogelin mikroyapısal özelliklerinin tespiti için FE-SEM görüntülerinin incelenmesi, sentezlenen silika aerogelin yapısal özelliklerinin belirlenmesi için XRD analizi, sentezlenen silika aerogelin yüzey alanının tespiti için BET analizi, sentezlenen silika aerogelin yüzeyinin hidrofilik, hidrofobik veya

süperhidrofobik özellikte olduklarının belirlenmesi için Temas Açısı Ölçümleri yapılmıştır.

4. Aşama: Mimari yapı elemanının üretilmesi için sentezlenen süperhidrofobik silika aerogelin farklı takviye oranlarında alçı levha deney numunelerinin hazırlanmasında kullanılmıştır. Mimari yapılarda uygulama ile birlikte, nihai yapı elemanın optimum parametre ve oranlar neticesinde üretilmesi sonrası sırasıyla; mekanik özellikleri (eğilme dayanımı ve basınç dayanımı testleri) ve fiziksel özellikleri (termal iletkenlik katsayısı ve su emme testleri) tespit edilmiştir.

3.2.1. Farklı Silika Kaynaklarından Sodyum Silikat Çözeltisi Eldesi

Deneysel çalışmaların ilk aşamasını oluşturan sodyum silikat sentezi için kullanılan başlangıç malzemelerinden kuvars taşı, radyolarit taşı kırıcıda küçük parçalar haline getirilmiştir. Daha sonrasında kuvars taşı, radyolarit taşı, ticari döküm kumu, atık döküm kumu mekanik öğütücüde 50 µm altında öğütülerek tane boyutları homojen hale gelmesi sağlanmıştır (Şekil 47). Silis çözeltisi eldesi hidrotermal proses olarak da isimlendirilen bu yöntemde, silika kumu (SiO_2), kostik (NaOH) ile birlikte basınç ve yüksek sıcaklık altındaki reaktörlerde doğrudan çözündürülür ve reaksiyon sonucunda sodyum silikat elde edilir (Brown, 2000; Nanba vd., 2003).



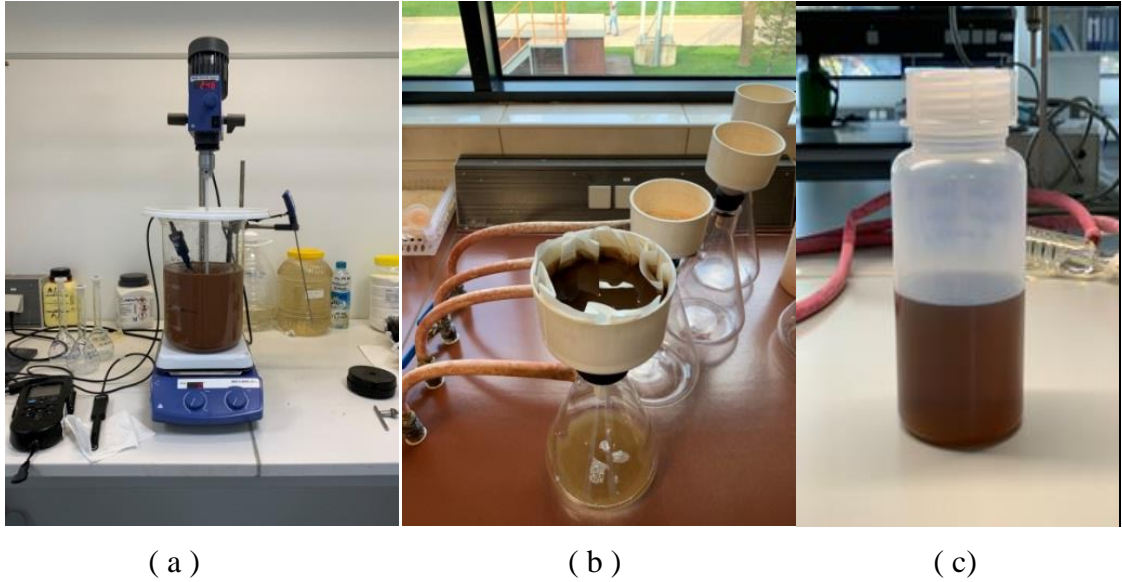
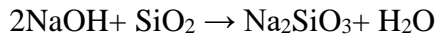
(a)



(b)

Şekil 47. Radyolarit numunesinin aşamaları (a) kırıcıda küçük parçalar haline getirilen numune (b) öğütücüde pudra haline getirilen numune

Silis kumu (ticari döküm kumu, ticari döküm kumu, radyolarit, kuvars) saflaştırma aşamasında 50 g silis kumu 300 ml saf su manyetik karıştırıcıda karıştırılmıştır. Karışıma pH 1 olana kadar 1M HCl ilave edilmiştir. Hazırlanan sulu çözelti 80°C’de 2 saat süreyle ısıtıcılı manyetik karıştırıcıda karıştırıldıktan sonra karışım siyah bant süzgeç kâğıdından süzülüp saf su ile yıkanmıştır. Etüvde 60°C’de 24 saat kurutulmuştur. Kurutulmuş olan 200 g silis kumuna 1064 ml NaOH eklenerek çözelti hazırlanmıştır. Hazırlanan çözelti ile 250°C’de 2 saat boyunca otoklavda reaksiyon gerçekleştirilmiştir. Reaksiyon sonunda elde edilen karışım süzgeç kâğıdından süzülüp ana çözülden ayrılarak sodyum silikat elde edilmiştir. Sodyum silikat reaksiyonu aşağıda verilmiştir.



Şekil 48. Radyolaritin sodyum silikat çözeltisi hazırlama aşamaları (a) manyetik karıştırıcıda karıştırma ve pH ayarlama işlemi (b) süzgeç kâğıdından süzme işlemi c) otoklavda NaOH ile reaksiyon işleminden sonra süzülüp elde edilen sodyum silikat çözeltisi

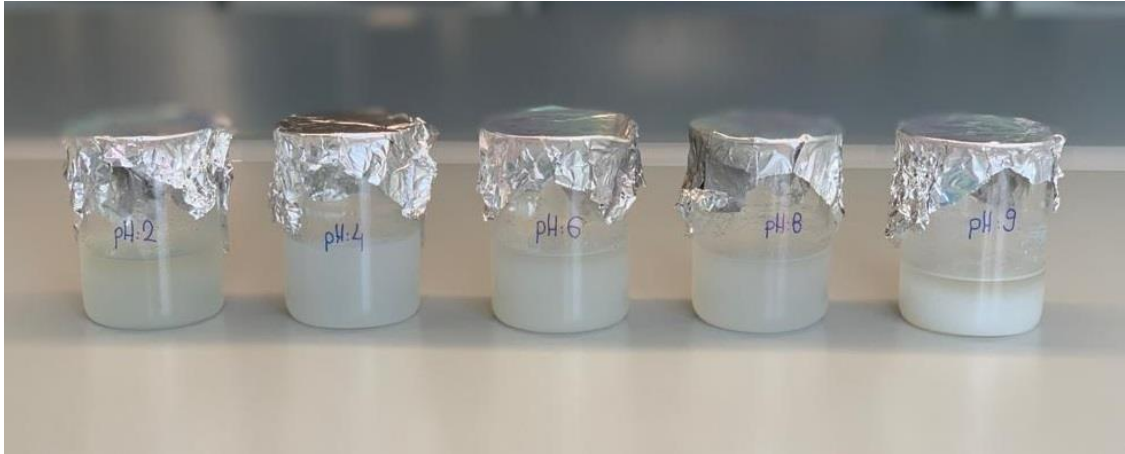
Sodyum silikat eldesi için uygulanan bütün bu proses başlangıç malzemesi olarak belirlenen ticari döküm kumu, ticari döküm kumu, radyolarit, kuvars için uygulanmış ve böylelikle 4 farklı sodyum silikat çözeltisi elde edilmiştir. Farklı başlangıç malzemelerinden elde edilen sodyum silikat çözeltileri silika aerojel üretim prosesinde kullanılmıştır.

3.2.2. Sol-jel Yöntemi ile Silika Kaynaklarından Aerojel Üretimi

3.2.2.1. Ticari döküm kumu, atık döküm kumu, radyolarit, kuvarsdan farklı pH değerlerinde silika aerojel üretimi

Ticari döküm kumundan (TDK), radyolaritten (R), kuvarsdan (K), hidrotermal prosesi ile sodyum silikat çözeltisi elde edilmiştir. Hazırlanan çözeltiler dinlendirildikten sonra silika aerojel sentezi için kullanılmıştır. Silika aerojel üretimine pH'ın etkisini incelemek için 2, 4, 6, 8, 9 olmak üzere 5 farklı pH değeri taranmıştır.

10 ml sodyum silikat çözeltisinin üzerine 1M HCl eklenerek balıklı manyetik karıştırıcı yardımıyla pH'ı sırasıyla 2, 4, 6, 8, 9 olması sağlanmıştır. pH'ı ayarlanan numuneler 25°C'de 24 saat beklemeye bırakılmış ve böylelikle jelleşme işlemi tamamlanmıştır (Şekil 49).



Şekil 49. Sodyum silikat çözeltisinin pH ayarlaması yapıldıktan sonraki hali

Yaşlandırma işlemi için, jelleşme işlemi tamamlanmış olan numunelerin bünyelerindeki suyu uzaklaştırmak için 50°C'de 24 saat boyunca Memmert marka etüvde bekletilmişlerdir (Şekil 50). Yaşlandırma aşamasında numunelerin herbirine 4 ml etanol ilave edilmiştir.

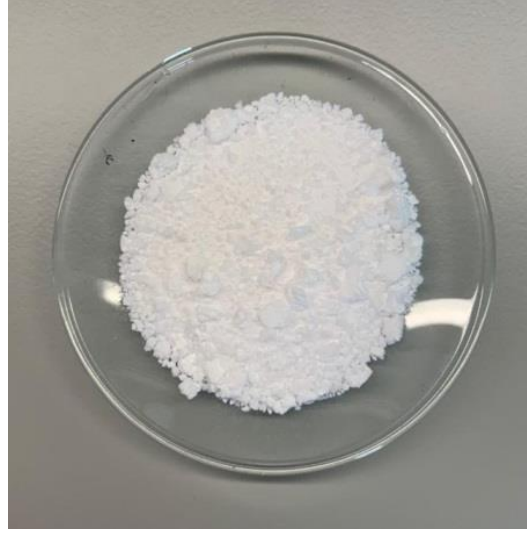


Şekil 50. Silika aeojelin yaşlandırma aşaması

Sentezlenen arojellerin yapısında bulunan tuzları uzaklaştırmak amacıyla saf su ile yıkama işlemi gerçekleştirilerek sonrasında 50°C’de 24 saat boyunca sabit kurutulmuştur. Sentezde taranan parametreler Tablo 9’da verilmiştir. Sentez sonunda 4 farklı başlangıç malzemesinden hidrofilik silika aerojel sentezlenmiştir (Şekil 51).

Tablo 9. Ticari döküm kumu (TDK), atık döküm kumu (ADK), radyolarit (R), kuvarsdan (K) silika aerojel üretiminde kullanılan parametreler tablosu

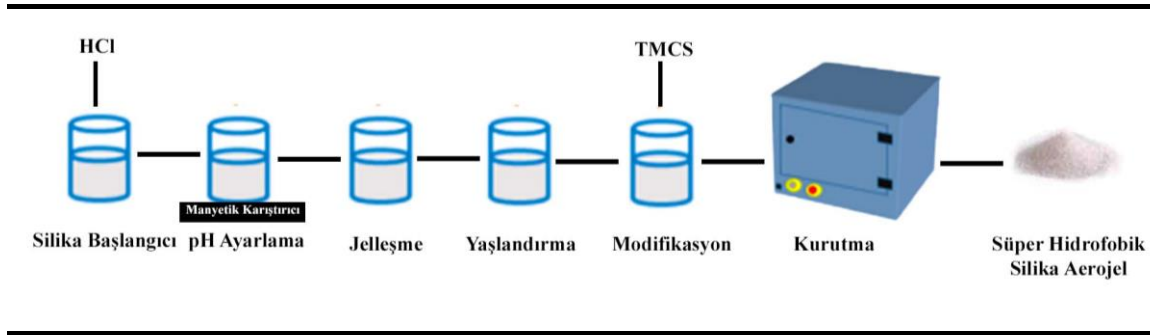
pH	Yaşlandırma sıcaklığı (°C)	Yaşlandırma süresi (saat)	Kurutma tipi
2	50	24	50°C’de sabit kurutma
4	50	24	50°C’de sabit kurutma
6	50	24	50°C’de sabit kurutma
8	50	24	50°C’de sabit kurutma
9	50	24	50°C’de sabit kurutma



Şekil 51. Hidrofilik silika aerojel

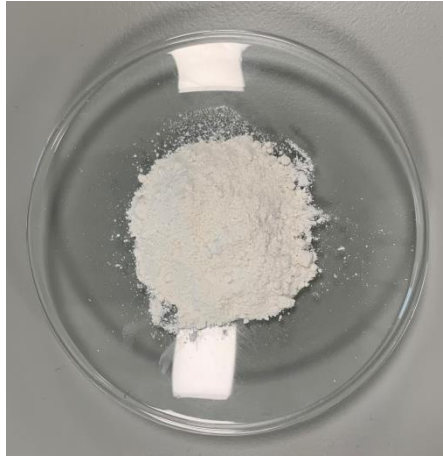
3.2.2.2. Ticari döküm kumundan, atık döküm kumundan, radyolaritten ve kuvarsdan yüzey modifikasyonu yapılarak süperhidrofobik silika aerojel üretimi

Deneysel çalışmalarda yüzey modifikasyonunun yapılmasının amacı, hidrofilik olarak üretilen silika arojellere hidrofobik özellik kazandırmak ve yüzey alanını arttırmaktır. Bu amaçla, optimum parametrelerle hidrofilik ticari döküm kumundan üretilen silika arojellerden farklı olarak 1 gün etanol ile yaşlandırma işleminden sonra % 70'lik TEOS/Etanol ile yüzey modifikasyonu yapılmış ve reaksiyona girmeyen TEOS'u uzaklaştırmak için n-heptan yıkanmıştır. Daha sonra silika arojele hidrofobiklik kazandırmak amacı ile hacimce oranı TMCS/n-hekzan (1/10) olan çözeltiler hazırlanır. Hazırlanan bu modifikasyon çözeltilerinin her biri jel ile karıştırılarak 50°C'de 24 saat bekletilir. Numune hekzan ile yıkandıktan sonra etüvde 50°C'de 24 saat kurumaya bırakılır (Şekil 52). Kurutma işleminin ardından süperhidrofobik silika arojeller elde edilir (Tablo 10). Bu deney prosesi ticari döküm kumu (TDK), atık döküm kumu (ADK), radyolarit (R) ve kuvarsdan (K) hidrofilik olarak üretilen silika arojeller içinde sırasıyla uygulanmıştır.



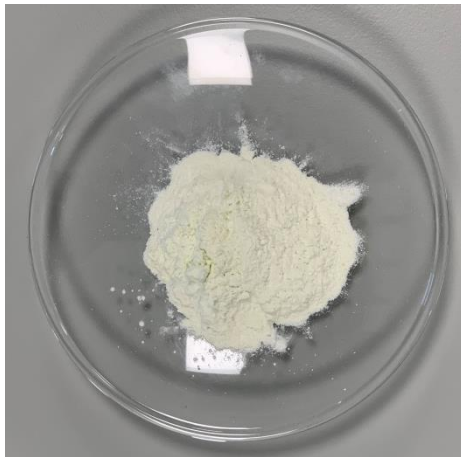
Şekil 52. Süperhidrofobik silika aerojel sentez şeması

Tablo 10. Sentez sonrası üretilen süperhidrofobik silika aerojel numuneleri



TDK Süperhidrofobik Silika Aerojel

ADK Süperhidrofobik Silika Aerojel



K Süperhidrofobik Silika Aerojel

R Süperhidrofobik Silika Aerojel

3.2.3. Silika Aerojel Katkılı Alçı Levha Numunelerinin Karışım Oranları ve Üretimi

Farklı takviye oranlarında süperhidrofobik silika aerojel katkılı alçı levha numunelerinin mekanik özelliklerinin (eğilme dayanımı, basınç dayanımı) ve fiziksel özelliklerinin (su emme, termal iletkenlik katsayısı) saptanması ve alçı levha numunelerindeki farklı katkı oranlarının numunelerin performans özelliklerindeki değişimi tespit etmek amacıyla 5 farklı yüzdelere sahip (%0, %0.5, %1, %2, %5) silika aerojel tozları ile 20 adet alçı levha numunesi üretilmiştir. 28 gün oda sıcaklığında bekleyen alçı levha numuneleri bekleme süreleri tamamlandıktan sonra sırasıyla deneylere tabi tutulmuştur.

3.2.3.1. Silika Aerojel Katkılı Alçı Levha Numunelerinin Karışım Oranları

Deneysel çalışmalar kapsamında; TS EN 520 + A1 standartları esasına uygun olarak alçı levha deney numuneleri üretimi gerçekleştirilmiştir. Alçı levha üretimi için hazırlanan harç karışımlarına düşük katkı oranlarında silika aerojel takviyesi ilave edilmiştir. Bu amaçla silika aerojel katkı oranları alçı ağırlığınca kütlece %0, %0.5, %1, %2, %5 düzeylerinde olacak şekilde planlanmıştır. Ticari döküm kumu (TDK), atık döküm kumu (ADK), radyolarit (R) ve kuvars (K) olmak üzere 4 farklı başlangıç malzemesinden üretilen silika aerojel tozları 5 farklı katkı oranlarında alçı karışımlarına ilave edilerek 20 farklı alçı levha deney numuneleri üretilmiştir. Tablo 11’de silika aerojel katkılı alçı levha deney numunelerinin ağırlıkça % karışım oranları yer almaktadır. Silika aerojel katkı oranları alçı ağırlığınca kütlece %0 olan numuneler ADK1-TDK1-R1-K1, silika aerojel içeriği %0.5 olan numuneler ADK2-TDK2-R2-K2, silika aerojel içeriği %1 olan numuneler ADK3-TDK3-R3-K3, silika aerojel içeriği %2 ADK4-TDK4-R4-K4, silika aerojel içeriği %5 olan numuneler ADK5-TDK5-R5-K5 olarak adlandırılmaktadır. Her karışımdan 3 adet tekrar olacak şekilde alçı levha deney numunesi hazırlanarak toplamda 60 adet alçı levha numunesi dökümü yapılmıştır. Eğilme dayanımı testi için 40x40x160 mm ölçülerinde tek tip prizmatik alçı levha deney numuneleri Tablo 12’de verilen karışım miktarlarına göre hazırlanmıştır. Hazırlanan prizmatik alçı levha deney numunelerine 28 günlük bekleme süresi bittikten sonra ilk önce eğilme dayanımı testi uygulanmıştır. Eğilme dayanımı testinden sonra deney numuneleri tekrar kullanılarak her bir karışıma ait 3 numunenin 2’ye ayrılması ile elde edilen 40x40 mm yüzey alanlı 6 adet deney numune parçasına basınç dayanımı testi yapılmıştır. Mekanik testleri tamamlanan alçı levha deney numunelerinin termal

iletkenlik katsayısının ölçümü için ayrıca 50 mm çapında 20 mm yüksekliğinde silindirik alçı levha deney numuneleri üretilmiştir. Tablo 13 ve Tablo 14’de termal iletkenlik katsayısının ölçümü için hazırlanan deney numunelerinin katkı oranları verilmiştir. Termal iletkenlik testi için üretilen deney numuneleri 28 günlük bekleme süresinden sonra termal iletkenlik ölçümü gerçekleştirilmiştir. Daha sonra termal iletkenlik testi için üretilen numuneler su emme oranı tayini için kullanılmış olup yeniden deney numunesi üretilmemiştir. Tablo 15’de süperhidrofobik silika aerojel katkılı alçı levha numuneleri için bekleme süreleri ve yapılan deneylere ait numune adetleri verilmiştir.

Tablo 11. Mekanik testler için silika aerojel katkılı alçı levha numunelerinin karışım oranları (ağırlıkça %)

Karışım	Silika Aerojel (%)	Alçı (%)	Su (%)
TDK1	0,00	60,00	40,00
TDK2	0,50	59,50	40,00
TDK3	1,00	59,00	40,00
TDK4	2,00	58,00	40,00
TDK5	5,00	55,00	40,00
ADK1	0,00	60,00	40,00
ADK2	0,50	59,50	40,00
ADK3	1,00	59,00	40,00
ADK4	2,00	58,00	40,00
ADK5	5,00	55,00	40,00
R1	0,00	60,00	40,00
R2	0,50	59,50	40,00
R3	1,00	59,00	40,00
R4	2,00	58,00	40,00
R5	5,00	55,00	40,00
K1	0,00	60,00	40,00
K2	0,50	59,50	40,00
K3	1,00	59,00	40,00
K4	2,00	58,00	40,00
K5	5,00	55,00	40,00

Tablo 12. Mekanik deneyler için silika aerojel katkı alçı levha numunelerinin karışım oranları (g)

Karışım	Silika Aerojel (g)	Alçı (g)	Su (ml)
TDK1	0,00	300	200
TDK2	1,50	298,50	200
TDK3	3,00	297,00	200
TDK4	6,00	294,00	200
TDK5	15,00	285,00	200
ADK1	0,00	300	200
ADK2	1,50	298,50	200
ADK3	3,00	297,00	200
ADK4	6,00	294,00	200
ADK5	15,00	285,00	200
R1	0,00	300	200
R2	1,50	298,50	200
R3	3,00	297,00	200
R4	6,00	294,00	200
R5	15,00	285,00	200
K1	0,00	300	200
K2	1,50	298,50	200
K3	3,00	297,00	200
K4	6,00	294,00	200
K5	15,00	285,00	200

Tablo 13. Termal iletkenlik deneyi için silika aerojel katkılı alçı levha numunelerinin karışım oranları (%)

Karışım	Silika Aerojel (%)	Alçı (%)	Su (%)
TDK1	0,00	60,00	40,00
TDK2	0,50	59,50	40,00
TDK3	1,00	59,00	40,00
TDK4	2,00	58,00	40,00
TDK5	5,00	55,00	40,00
ADK1	0,00	60,00	40,00
ADK2	0,50	59,50	40,00
ADK3	1,00	59,00	40,00
ADK4	2,00	58,00	40,00
ADK5	5,00	55,00	40,00
R1	0,00	60,00	40,00
R2	0,50	59,50	40,00
R3	1,00	59,00	40,00
R4	2,00	58,00	40,00
R5	5,00	55,00	40,00
K1	0,00	60,00	40,00
K2	0,50	59,50	40,00
K3	1,00	59,00	40,00
K4	2,00	58,00	40,00
K5	5,00	55,00	40,00

Tablo 14. Termal iletkenlik deneyi için silika aerojel katkılı alçı levha numunelerinin karışım oranları (g)

Karışım	Silika Aerojel (g)	Alçı (g)	Su (ml)
TDK1	0,00	120,00	80,00
TDK2	0,60	119,40	80,00
TDK3	1,20	118,80	80,00
TDK4	2,40	117,60	80,00
TDK5	6,00	114,00	80,00
ADK1	0,00	120,00	80,00
ADK2	0,56	119,40	80,00
ADK3	1,02	118,80	80,00
ADK4	2,40	117,60	80,00
ADK5	6,00	114,00	80,00
R1	0,00	120,00	80,00
R2	0,60	119,40	80,00
R3	1,20	118,80	80,00
R4	2,40	117,60	80,00
R5	6,00	114,00	80,00
K1	0,00	120,00	80,00
K2	0,60	119,40	80,00
K3	1,20	118,80	80,00
K4	2,40	117,60	80,00
K5	6,00	114,00	80,00

Tablo 15. Alçı levha deney numuneleri için yapılan testler

Karışım	Alçı Levha Deney Numuneleri İçin Yapılan Testler							
	Mekanik Testler				Fiziksel Testler			
	Eğilme Dayanımı Testi (40x40x160 mm)		Basınç Dayanımı Testi (40x40 mm)		Termal İletkenlik Katsayısı Analizi (50x20 mm)		Su Emme Analizi (50x20 mm)	
	Numune Sayısı (Adet)	Bekleme Süresi (Gün)	Numune Sayısı (Adet)	Bekleme Süresi (Gün)	Numune Sayısı (Adet)	Bekleme Süresi (Gün)	Numune Sayısı (Adet)	Bekleme Süresi (Gün)
TDK1	3	28	6	28	1	28	1	28
TDK2	3	28	6	28	1	28	1	28
TDK3	3	28	6	28	1	28	1	28
TDK4	3	28	6	28	1	28	1	28
TDK5	3	28	6	28	1	28	1	28
ADK1	3	28	6	28	1	28	1	28
ADK2	3	28	6	28	1	28	1	28
ADK3	3	28	6	28	1	28	1	28
ADK4	3	28	6	28	1	28	1	28
ADK5	3	28	6	28	1	28	1	28
R1	3	28	6	28	1	28	1	28
R2	3	28	6	28	1	28	1	28
R3	3	28	6	28	1	28	1	28
R4	3	28	6	28	1	28	1	28
R5	3	28	6	28	1	28	1	28
K1	3	28	6	28	1	28	1	28
K2	3	28	6	28	1	28	1	28
K3	3	28	6	28	1	28	1	28
K4	3	28	6	28	1	28	1	28
K5	3	28	6	28	1	28	1	28

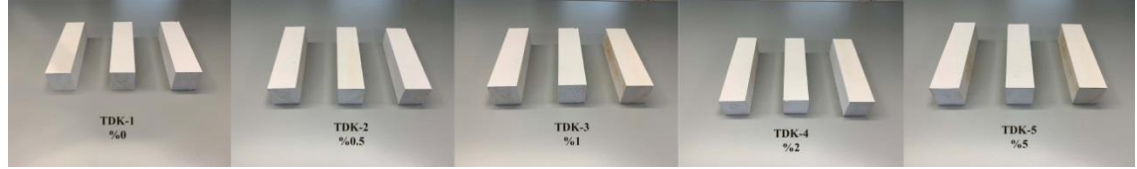
3.2.3.2. Silika Aerojel Katkılı Alçı Levha Numunelerinin Üretimi

Bu çalışmanın üretim aşamasında; alçı levha karışımlarının oluşturulması için Tablo 12’de belirtilen oranlarda kartonpiyer alçısı, süperhidrofobik silika aerojel ve su kullanılmıştır. Deneylerde TS EN 13279-1,2 standardına uygun olarak üretilen kartonpiyer alçısı kullanılmıştır. Her bir kalıp için toplamda 500 ml sulu çözelti hazırlanmıştır. Hazırlanan sulu çözeltilerin tamamında su oranı %40 olarak belirlenmiştir. Hazırlanan toz karışımında ise %55,00-60,00 aralığında alçı, alçı ağırlığının %0,00-5,00 aralığında ise süperhidrofobik silika aerojel ilave edilmiştir. Mekanik testler için 40x40x160 mm ölçülerinde tek tip prizmatik kalıplara hazırlanan sulu çözeltiler dökülmüştür. Oda sıcaklığında kuruyan alçı numuneler kalıplardan çıkarılmıştır. Sonrasında Etüvde 105°C sıcaklıkta sabit tartıma gelinceye kadar kurumaya bırakılmıştır. Oda sıcaklığında kuruyan alçı levha numunelerine 28 günlük bekleme süresinin sonunda eğilme dayanımı testi ve basınç dayanımı testi yapılmıştır (Tablo 16).

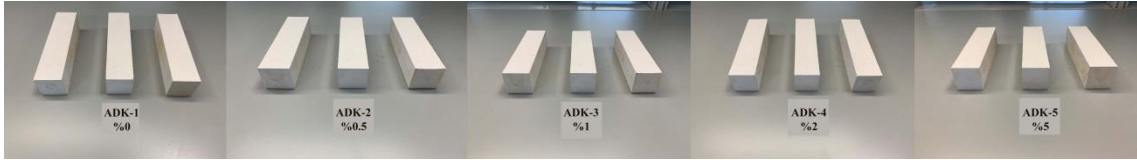
Termal İletkenlik katsayısı için 50 mm çapında 20 mm yüksekliğinde silindirik kalıplar kullanılmıştır. Tablo 12’de termal iletkenlik deneyi için süperhidrofobik silika aerojel katkı alçı levha numunelerinin karışım oranları verilmiştir. Bu oranlara göre her bir kalıp için 200 ml’lik sulu çözelti hazırlanmıştır. Hazırlanan sulu çözeltilerin tamamında su oranı %40, toz oranında (alçı ve süperhidrofobik silika aerojel) %60 olması planlanmıştır. Kalıplara dökülen karışımlar oda sıcaklığında kuruduktan sonra kalıptan çıkarılmıştır. Bir sonraki aşamada 105°C’de sıcaklıkta etüvde sabit tartıma gelene kadar kurutulmuştur. Sabit tartıma gelen numuneler oda sıcaklığında 28 günlük bekleme süresinden sonra termal iletkenlik katsayısı ölçümüne tabi tutulmuştur (Tablo 17). Termal iletkenlik katsayısı testi için kullanılan numuneler, termal iletkenlik deneyi yapıldıktan sonra su emme oranı tayini için tekrar kullanılmıştır (Şekil 53).

Tablo 16. Eğilme dayanımı ve basınç dayanımı testi için üretilen silika aerojel tozları ile hazırlanan 40x40x160 mm ölçülerinde tek tip prizmatik alçı levha deney numuneleri

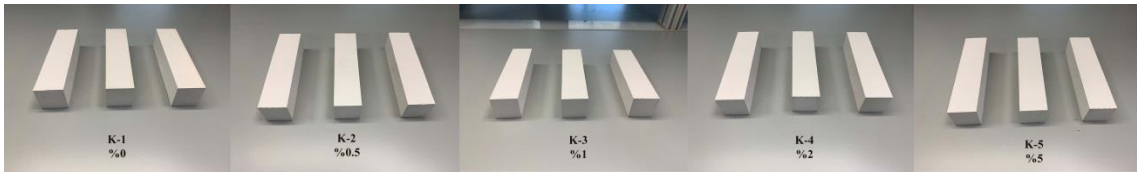
TDK'dan Üretilen Alçı Levha Numuneleri



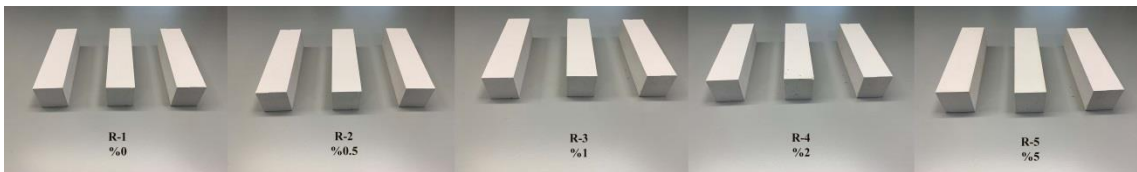
ADK'dan Üretilen Alçı Levha Numuneleri



K'dan Üretilen Alçı Levha Numuneleri

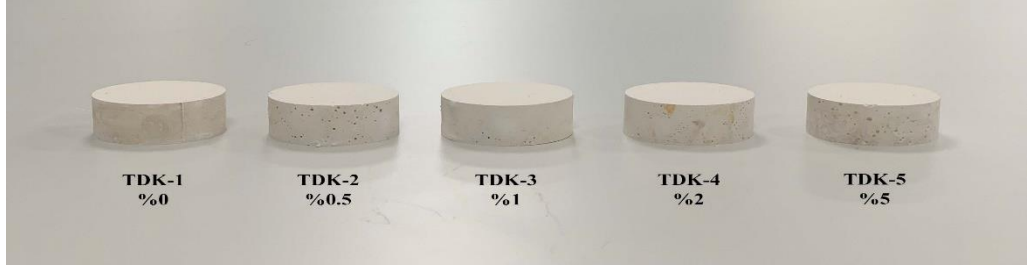


R'den Üretilen Alçı Levha Numuneleri

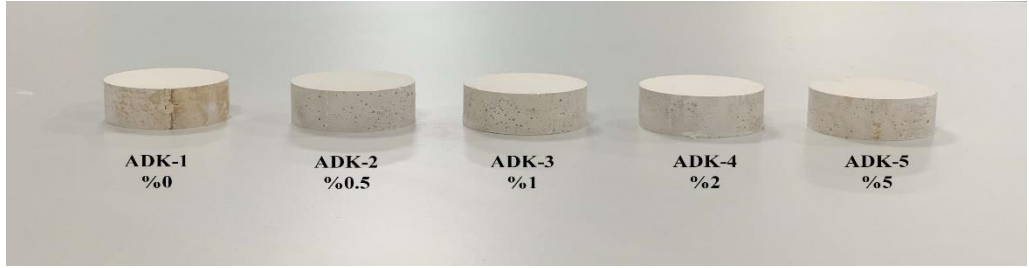


Tablo 17. Termal iletkenlik katsayısının ölçümü için üretilen silika aerojel tozları ile hazırlanan deney numuneleri

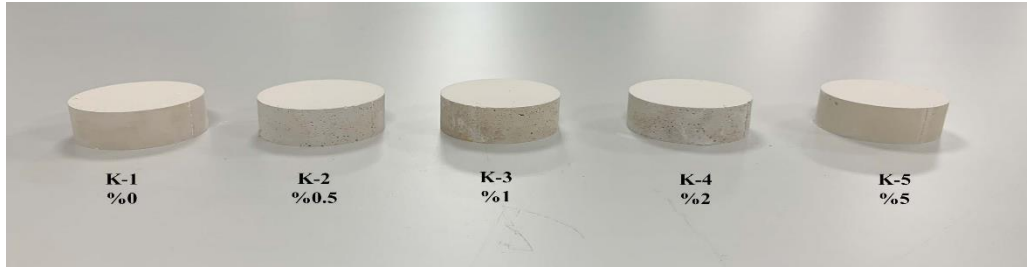
TDK'dan Üretilen Alçı Levha Numuneleri



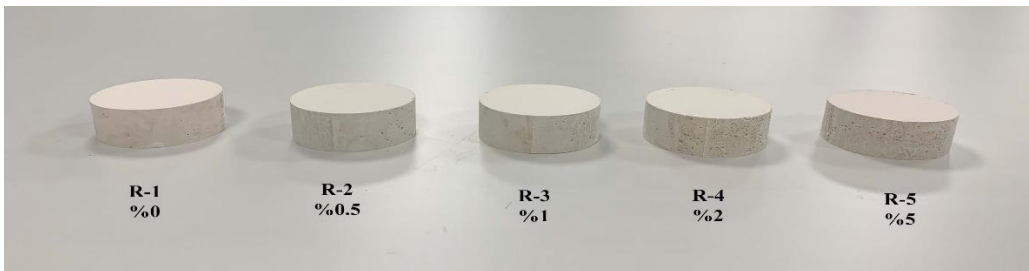
ADK'dan Üretilen Alçı Levha Numuneleri



K'dan Üretilen Alçı Levha Numuneleri



R'den Üretilen Alçı Levha Numuneleri





Şekil 53. Su emme oranı tayini için TDK, ADK, K ve R'den üretilen silika aerojel tozları ile hazırlanan deney numuneleri

3.3. Sentezlenen Silika Aerojellerin Karakterizasyonu

Sol-jel yöntemi ile silika aerojel numunelerinin sentezlenmesinde kullanılan 4 farklı kaynaktan temin edilen başlangıç malzemelerinin (ticari döküm kumu, atık döküm kumu, kuvars, radyolarit) ve sentez sonrası oluşan silika aerojel tozlarının karakterizasyon çalışmaları yapılmıştır. Bilindiği gibi sol-jel yönteminin etkili bir şekilde gerçekleşmesi için malzeme karakterizasyonu oldukça önemlidir.

Dolayısıyla sentezlenen nihai toz numunelerinin yapısal ve kimyasal analizlerinin belirlenmesi, bağ yapılarının tespiti, silika aerojel toz parçacıklarının yüzey alanı ölçümü, süperhidrofobiklik dereceleri, nihai toz numunelerinin şekil ve morfolojik açıdan değerlendirilmesi gibi çalışmalar ön plana çıkmaktadır. Bu bakımdan malzeme karakterizasyonu, XRF incelemeleri, XRD analizleri, ICP-OES incelemeleri, FT-IR çalışması, BET ölçümleri, Temas açısı ölçümleri ve son olarak FE-SEM incelemeleri yapılarak tamamlanmıştır.

Sentezleme çalışmalarının devamında uygulanan nihai malzeme karakterizasyonu çalışmalarının akabinde silika aerojel bazlı çift taraflı karton kaplı alçı levha üretimi odaklı mimari yapı uygulamaları kapsamında deney numunelerinin üretimi gerçekleştirilmiştir. Farklı silika aerojel takviye oranları ile hazırlanan nihai yapı elemanlarının mekanik ve fiziksel özellikleri üzerindeki etkisinin tespiti için analizler yapılmıştır. Nihai yapı elemanının optimum parametre ve oranlar neticesinde üretilmesi

sonrası; eğilme dayanımı testi, basınç dayanımı testi, termal iletkenlik incelemeleri, su emme analizi yapılarak mimari malzemenin performans değerlendirmesi yapılmıştır.

3.3.1. XRF İncelemeleri

XRF analiz çalışmaları, sol-jel yönteminde kullanılan başlangıç malzemelerinin elementel kompozisyonunu belirlemede önemlidir. Dolayısıyla başlangıç malzemelerinin karakterizasyonunda elementlerin tespitine yönelik XRF analizine ihtiyaç duyulmuştur. Toz halindeki katı hammaddeler sodyum silikat eldesinden önce (ticari döküm kumu, döküm kumu, quartz taşı, radyolarit taşı) ARL ADVANT'X 9800 marka XRF cihazda analiz edilmiştir (Şekil 54). Öğütücüde öğütülüp toz haline getirilen numuneler hidrolik pres altında basınçla sıkıştırılarak pres-pastil halinde getirilerek analize hazır hale getirilmiştir. Her ölçüm üç paralel olarak gerçekleştirilmiştir.



Şekil 54. XRF analiz cihazı

3.3.2. XRD İncelemeleri

XRD analiz çalışmaları, sol-jel yönteminde kullanılan başlangıç malzemelerinden silika aerogel elde edilmesinde, reaksiyon oluşum ve tamamlanma süreleri açısından oldukça önemli olmuştur. Dolayısıyla başlangıç malzemelerinin karakterizasyonunda ve sentezlenen silika aerogeldeki oluşması muhtemel bileşiklerin tespitine yönelik olarak çalışmalarda XRD analizine ihtiyaç duyulmuştur. Toz halindeki katı hammaddeler (ticari döküm kumu, atık döküm kumu, radyolarit taşı, quartz taşı) GNR Explorer marka XRD cihazda analiz edilmiştir (Şekil 55). Öğütücüde öğütülüp toz haline getirilen numuneler çelik numune kabında düz bir yüzey oluşturacak şekilde yerleştirilmiş daha sonra

$5^{\circ} < 2\theta < 70^{\circ}$ aralığında, her bir 0.04 adımı 1 saniye olacak şekilde tarama yapılmıştır. Her ölçüm üç paralel olarak gerçekleştirilmiştir.



Şekil 55. XRD analiz cihazı

3.3.3. ICP-OES İncelemeleri

ICP-OES analiz çalışmaları başlangıç malzemelerinden (ticari döküm kumu, atık döküm kumu, radyolarit ve kuvars) elde edilen sodyum silikat çözeltilerinin kimyasal analizleri ve konsantrasyonlarını tespit etmek için ihtiyaç duyulmuştur. Sıvı haldeki sodyum silikat çözeltisi Spectro Arcos model ICP/OES spektrometresi kullanılarak analiz edilmiştir (Şekil 56).



Şekil 56. ICP-OES cihazı

3.3.4. Yoğunluk Çalışması

Yoğunluk analizi ticari döküm kumu, atık döküm kumu, radyolarit ve kuvarsdan sentezlenen silika aerjellerin kütlelerinin hacmine oranı olarak tanımlanır. pH 2, 4, 6, 8, 9 olmak üzere 5 farklı değerde silika aerjel üretimi gerçekleştirilmiştir. Farklı pH değerlerinde elde edilen numunelerin yoğunluk analizleri yapılmış ve yoğunluğu en düşük olan numunenin sentezlendiği pH, değeri üretim için optimum pH olarak belirlenmiştir. Yoğunluk birimi g/cm^3 cinsinden hesaplanmıştır.

3.3.5. FT-IR Çalışması

Çalışmalarda XRD cihazı kullanılarak yapılan analizlerin akabinde, sentezlenen ürünlerin yapısının tanımlanabilmesi açısından bağ yapıları tespiti amacıyla, FT-IR (Fourier Dönüşüm Kızıl Ötesi) çalışması yapılmıştır. Özellikle sol-jel yöntemi ile sentezlenen silika aerjelin fonksiyonel bağ özelliklerinin tespitinde önemli olmuştur. 2, 4, 6, 8, 9 aralığında sentezlenen silika aerjel numunelerinde yoğunluğu en düşük olan numune için FT-IR ölçümü gerçekleştirilmiştir. FT-IR çalışmaları, Thermo Scientific – Nicolet iS20 model cihaz kullanılarak yapılmıştır (Şekil 57). Yapılan ölçümler 4000–400 cm^{-1} dalga boyu aralığındadır.



Şekil 57. FT-IR analiz cihazı

3.3.6. BET Ölçümleri

Sol-jel yöntemi ile sentezlenen silika aerjel toz parçacıklarının yüzey alan ölçümleri Micromeritics NOVA4200e adsorpsiyon cihazında yapılmıştır (Şekil 58). Numuneler $10^{\circ}C/dk$ ısıtma hızıyla $150^{\circ}C$ 'ye kadar ısıtılmış ve gaz giderme işlemi 133 mbar basınç altında 3 saat sürmüştür. Analiz sonuçlarından yararlanılarak Brunauer-Emmett-Teller (BET) yüzey alanları hesaplanmıştır.



Şekil 58. BET analiz cihazı

3.3.7. Temas Açısı Ölçümleri

Temas açısı analiz çalışmaları, toz yüzeylerin ıslanabilirlik, sıvı emilimi, sıvıyı yüzeyde tutma, sıvı yayılması açısından oldukça önemli olmuştur. Numunenin üzerindeki damla görüntülerinin zamana bağlı damla şeklini tespit etmek için temas açısı analizine ihtiyaç duyulmuştur. Dolayısıyla deneysel çalışmada sol-jel yöntemi ile sentezlenen silika aerojel toz numunelerinin hidrofilitiklik, hidrofobiklik ve süperhidrofobiklik derecesini tespit etmek için temas açısı analizi yapılmıştır. Temas açısı çalışmaları, Biolin Scientific Attention - Theta Lite cihazı kullanılarak yapılmıştır (Şekil 59).



Şekil 59. Temas açısı analiz cihazı

3.3.8. FE-SEM İncelemeleri

Alan Emisyonlu Taramalı Elektron Mikroskobu (FE-SEM) genellikle yüksek voltajla hızlandırılmış elektronların malzeme yüzeyini taraması ve geri saçılan elektronların görüntülenmesi prensibine göre çalışmaktadır. Deneysel çalışmada kullanılan sol-jel yöntemi ile üretilen nihai toz karışımlarının şekil ve morfolojik açıdan mikro yapısal değişimleri FE-SEM incelemeleri ile tespit edilmiştir. FE-SEM incelemeleri ZEISS GeminiSEM 500 cihazı kullanılarak yapılmıştır (Şekil 60).



Şekil 60. FE-SEM analiz cihazı

3.4. Mekanik Mukavemet Testleri

3.4.1. Eğilme Dayanımı Testi

Farklı takviye oranlarında silika aerojel katkılı (%0, %0.5, %1, %2, %5) alçı levha numunelerinde, mekanik özellikleri belirlemek için deney programında 28 gün olarak belirlenen bekleme süresinden sonra TS EN 1015-11 standardı esaslarına göre ilk önce eğilme dayanımı testi uygulanmıştır. Deneysel çalışmalar kapsamında eğilme dayanımı testi için 40x40x160 mm ölçülerinde prizmatik alçı levha numuneleri üretilmiştir. 5 farklı takviye oranlarına sahip alçı levha numunelerinin her biri için 3 tekrar olacak şekilde eğilme testi ayrı ayrı uygulanmıştır. Böylelikle her bir alçı levha numunesinin basınç dayanımı 3 adet test sonucunun aritmetik ortalaması alınarak belirlenmiştir. Toplamda 60 adet alçı levha numunelerine 50±10 N/s yükleme hızında ve yükleme sırasında orta açıklık değeri 100 mm olacak şekilde eğilme dayanımı testi

gerçekleştirilmiştir. Eğilme dayanımı testi, Necmettin Erbakan Üniversitesi BİTAM laboratuvarlarında bulunan SHIMADZU AGS-X (100 kN) marka (Tablo 18) eğilme dayanım cihazı kullanılarak yapılmıştır (Şekil 61).

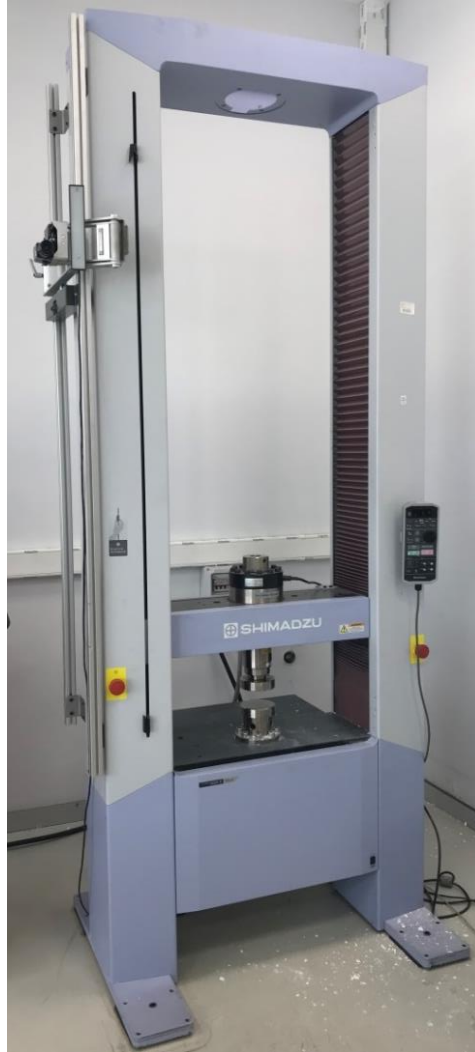


Şekil 61. Eğilme dayanım cihazı

3.4.2. Basınç Dayanımı Testi

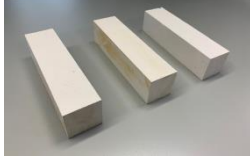
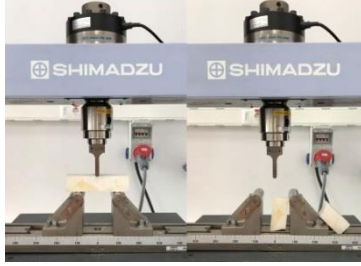

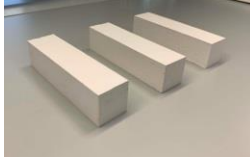
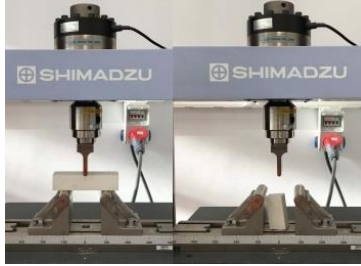




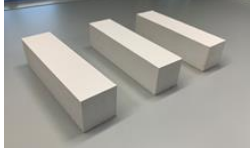


Farklı takviye oranlarında silika aerojel katkılı (%0, %0.5, %1, %2, %5) alçı levha numunelerinde, mekanik özellikleri belirlemek için deney programında 28 gün olarak belirlenen bekleme süresinden sonra basınç dayanım testi uygulanmıştır. Basınç dayanımı testi, eğilme dayanımı testi sonrasında ikiye ayrılan 40x40 mm yüzey alanlı prizmatik alçı levha numune parçaları üzerinden gerçekleştirilmiştir. Deneyde

uygulanan basınç yükü 2400 ± 100 N/s olarak ayarlanmıştır. Her bir farklı takviye oranlarına sahip alçı levha numunesine ait 3 farklı numuneden elde edilmiş 6 farklı numune parçasına basınç dayanımı testi uygulanmıştır. Böylelikle alçı levha numunesinin basınç dayanımı 6 adet test sonucunun aritmetik ortalaması alınarak belirlenmiştir. Basınç dayanımı testi, Necmettin Erbakan Üniversitesi BİTAM laboratuvarlarında bulunan SHIMADZU AGS-X (100 kN) marka (Tablo 18) basınç dayanım cihazı kullanılarak yapılmıştır (Şekil 62).



Şekil 62. Basınç dayanım cihazı

Tablo 18. DeneY Numunelerinin Mekanik Testleri

DENEY NUMUNELERİNİN MEKANİK TESTLERİ			
	40x40x160mm DeneY Numuneleri	Eğilme Dayanımı Testi	Basınç Dayanımı Testi
TDK			
ADK			
K			
R			

3.5. Fiziksel Özellik Testleri

3.5.1. Termal İletkenlik İncelemeleri

Farklı takviye oranlarında silika aerojel katkılı alçı levha numunelerinde, fiziksel özellikleri belirlemek için deney programında 28 gün olarak belirlenen oda sıcaklığında bekleme süresinden sonra termal iletkenlik testi uygulanmıştır. Termal iletkenlik deneyi için 50 mm çapında 20 mm yüksekliğinde silindirik kalıplar kullanılarak oluşturulan numunelerin termal iletkenlik katsayısı ölçülmüştür. Termal iletkenlik katsayısı deneyi, Seydişehir Eti Alüminyum araştırma laboratuvarların da bulunan RDC-143 Thermal Conductivity marka cihaz ile gerçekleştirilmiştir (Şekil 63). Termal iletkenlik katsayısı W/mK cinsinden ölçebilmektedir. Cihazın sensörünün ölçüm yapabilmesi için numunenin 50 mm çapında olması gerekmektedir. Ayrıca analiz yapılırken ölçümlerin hassas olması için deney numunelerinin üst yüzeyinin pürüzsüz ve düz olmasına dikkat edilmiştir.



Şekil 63. Termal iletkenlik ölçüm cihazı

3.5.2. Su Emme Analizi

Su emme analizi için termal iletkenlik katsayısı için üretilen süperhidrofobik alçı levha deney numuneleri kullanılmıştır. Su emme analizi için yeniden numune üretilmemiştir. Alçı levha deney numuneleri sabit tartıma gelinceye kadar 105°C'de etüvde kurutulmuştur. Daha sonra alçı levha deney numunelerinin değişmez kütleye geldiği kabul edilerek nihai tartım yapılmıştır. Bir sonraki aşamada alçı levha deney numuneleri su dolu bir kaba bırakılarak 2 saat suda bekletilmiştir. Numunelerin su emme değerleri

TS EN 520 + A1 standartları esasına standardına uygun olarak bulunmuştur. Sudan çıkarılan numunelerin toplam su emme oranı, yaş kütle ve kuru kütle arasındaki farkın kuru kütleyle oranı hesaplanarak bulunmuştur. Su emme oranı aşağıda verilen formüle göre hesaplanmıştır.

$$SA = \frac{m_2 - m_1}{m_1} \times 100$$

SA: Ağırlıkça artma miktarı (%)

m1: Deney örneğinin ilk ağırlığı (g)

m2: Deney örneğinin son ağırlığı (gr)

3.6. Bölüm Sonucu

DeneySEL çalışmaların yapıldığı bu bölümde silika arojelın sol-jel yöntemi ile sentezi, üretim parametrelerinin belirlenmesi ve elde edilen süperhidrofobik silika arojelın uygunluğu kapsamında karakterizasyon çalışmaları yapılmıştır. Ardından mimarlık uygulamaları çerçevesinde süperhidrofobik silika arojel takviyeli alçı levha deney numunelerinin hazırlanması sonrası sırayla; üç nokta eğilme analizi, basınç analizi, termal iletkenlik katsayısı tespiti ve su emme analizi tespiti gerçekleştirilmiştir. Bir sonraki bölümde, deneySEL sonuçlar kapsamında öncelikle sentezlenen silika arojel malzemesinin karakterizasyon sonuçları, süperhidrofobik silika arojel katkılı alçı levha deney numunelerinin mekanik mukavemet test sonuçları (üç nokta eğilme analizi, basınç analizi) ve fiziksel özellik test sonuçları (termal iletkenlik katsayısı tespiti ve su emme analizi) verilecektir.

4. DENEYSEL SONUÇLAR

4.1. Sentezlenen Malzemelerin Karakterizasyonu

4.1.1. XRF Sonuçları

Deneysel çalışmalarda farklı başlangıç kaynakları olarak kullanılan ticari döküm kumu (TDK), atık döküm kumu (ADK), radyolarit (R) ve kuvarsın (K) yapısal özelliklerinin değerlendirilmesinde ilk aşamayı XRF incelemeleri oluşturmaktadır. Ayrıca mimari uygulamalar için kullanılan ticari olarak satılan alçı tozu malzemesinin kimyasal bileşenlerini belirlemek için de XRF incelemeleri gerçekleştirilmiştir.

Bu bağlamda; Tablo 19’da ticari olarak kullanılan alçı tozu malzemesinde yer alan elementlerin içerikleri verilmiştir. Analiz sonuçlarına göre %55,00 oranında SO₃ içeriği, 38,40 CaO içeriği tespit edilmiştir. Deneysel çalışmada kullanılan ticari döküm kumunun (TDK), atık döküm kumunun (ADK), radyolarit (R) ve kuvarsın (K) kimyasal bileşimleri ağırlıkça yüzde olarak XRF cihazı kullanılarak belirlenmiştir. Literatür çalışmaları incelendiğinde bu tarzdaki doğal malzemelerin çoğunluğunun içeriğinde yer alan kimyasallar değerlendirildiğinde, minimum %80 değerinde SiO₂ kimyasal bileşenin yer aldığı görülmektedir (Muliawan, vd., 2019; Kantarçeken ve Çizmecioğlu, 2019; Yaghoubi, 2020; Santurde, 2011). Bu kapsamda elde edilen XRF analiz sonuçları incelendiğinde (Tablo 20) deney numunelerinde ortaya çıkan kimyasal bileşenler açısından, temel bileşen olarak SiO₂ yapısının yer aldığı görülmektedir.

Tablo 20’de verilen analiz sonuçlarına göre ticari döküm kumunda %97,80 oranında silisyum içeriği, atık döküm kumunda %70,40 oranında silisyum içeriği, radyolaritde %94,50 oranında silisyum içeriği, kuvars da %99,80 oranında silisyum içeriği tespit edilmiştir.

Tablo 19. Alçı tozuna (CaSO₄) ait XRF tablosu (%)

Numunenin Adı	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	MgO	SO ₃	CaO	SrO	P ₂ O ₅
Alçı (CaSO ₄)	0,36	0,050	0,10	0,37	55,00	38,40	0,39	0,0053

Tablo 20. TDK, ADK, R, K başlangıç kaynaklarına ait XRF tablosu (%)

Numunenin Adı	SiO₂	Al₂O₃	MgO	CaO	Fe₂O₃	Na₂O	K₂O	P₂O₅
Ticari Döküm Kumu	97,80	1,01	0,02	0,04	0,23	-	-	-
Atık Döküm Kumu	70,40	11,60	4,01	1,75	3,25	1,83	0,84	0,098
Radyolarit	94,50	1,98	-	0,28	1,00	-	0,81	-
Kuvars	99,80	-	-	-	0,03	-	-	-

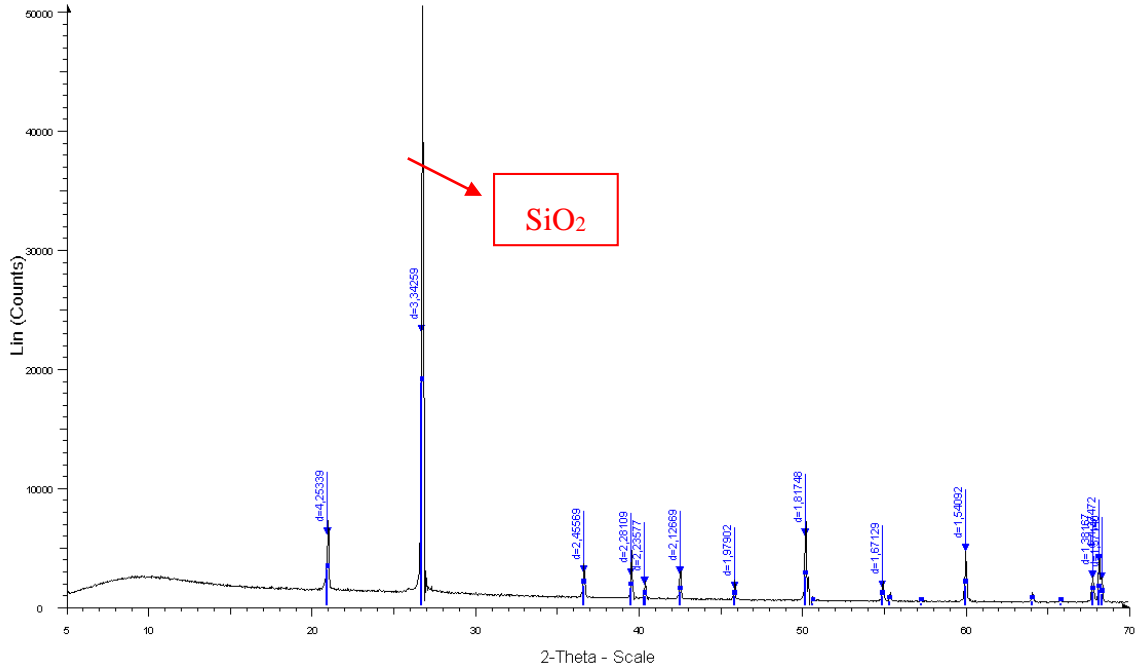
4.1.2. XRD Sonuçları

Deneysel çalışmalarda kullanılan farklı başlangıç malzemeleri ticari döküm kumu, atık döküm kumu, radyolarit ve kuvarsın yapısal özelliklerinin değerlendirilmesinde, elde edilen XRD analiz sonuçları sırasıyla şekil 64-67’de gösterilmiştir.

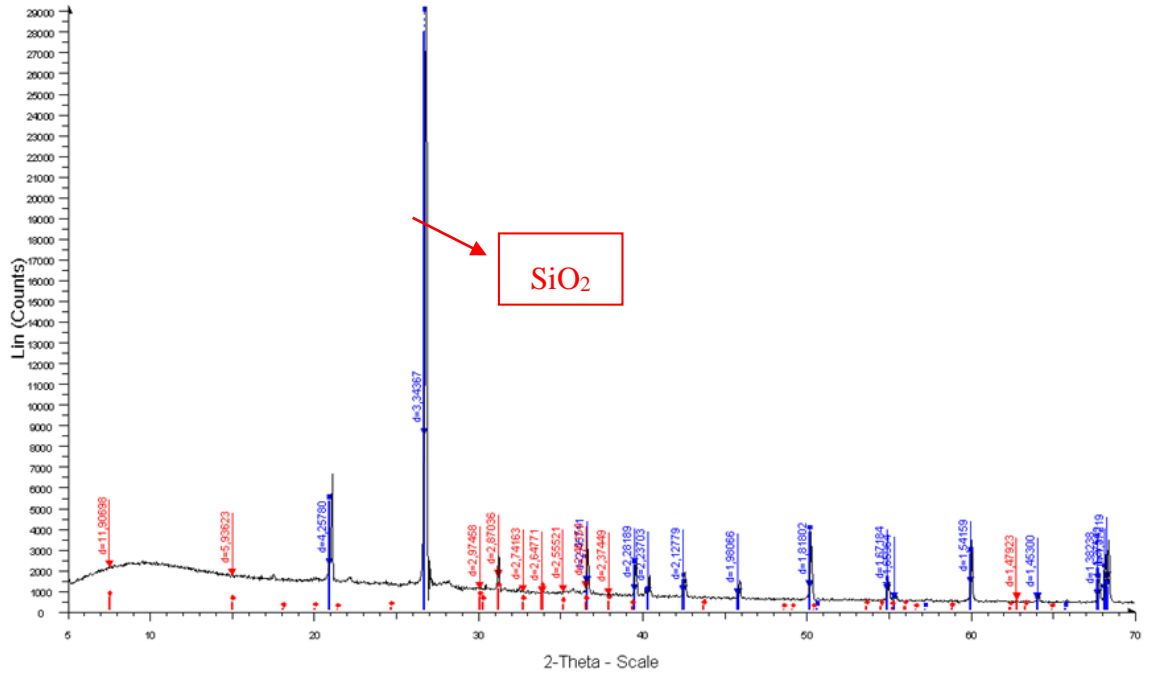
Farklı başlangıç kaynaklarının XRD analizinde elden edilen sonuçlar, $2\theta = 5^\circ$ ile 70° arasında değişen difraksiyon açılarında gerçekleştirilmiş, Bruker programı vasıtasıyla XRD kırınım deseni olarak elde edilmiştir. Elde edilen XRD analiz sonuçları incelendiğinde (Şekil 64-67), deney numunelerinde ortaya çıkan en yüksek/ana pik şiddetinin SiO₂ yapısını tanımladığı tespit edilmiştir. Aydın ve ark. (2021) düşük kalite kuvars kumu zenginleştirilmesi üzerine yapmış oldukları bir çalışmada, kuvars kumunun hammadde niteliği olması bakımından içeriğinin yaklaşık olarak %86 olması gerektiğini ve bu malzemede ana pik şiddeti olarak da yaklaşık $2\theta = 27^\circ$ mesafesinde olduğunu ifade etmişlerdir. Deneysel çalışmalarda elde edilen SiO₂ pik şiddetinin benzer 2θ mesafelerinde ortaya çıktığı tespit edilmiştir. Bu sonuçlar açısından SiO₂ yapısı, ticari döküm kumunda silisyum dioksit (SiO₂, PDF no: 00-046-1045) olarak belirlenmiştir. Benzer mantıkla atık döküm kumunda silisyum dioksit (SiO₂, PDF no: 01-070-7344) yanı sıra demir oksit (Fe₂O₃, PDF no: 00-040-1139) olarak yapıda yer aldığı tespit edilmiştir. Radyolarit başlangıç kaynağı XRD analiz sonucunda silisyum dioksit (SiO₂, PDF no: 00-046-1045) olarak tespit edilmiştir. Son olarak kuvars

başlangıç kaynağının yapısında silisyum dioksit (SiO_2 , PDF no: 00-046-1045) olarak yer aldığı belirlenmiştir.

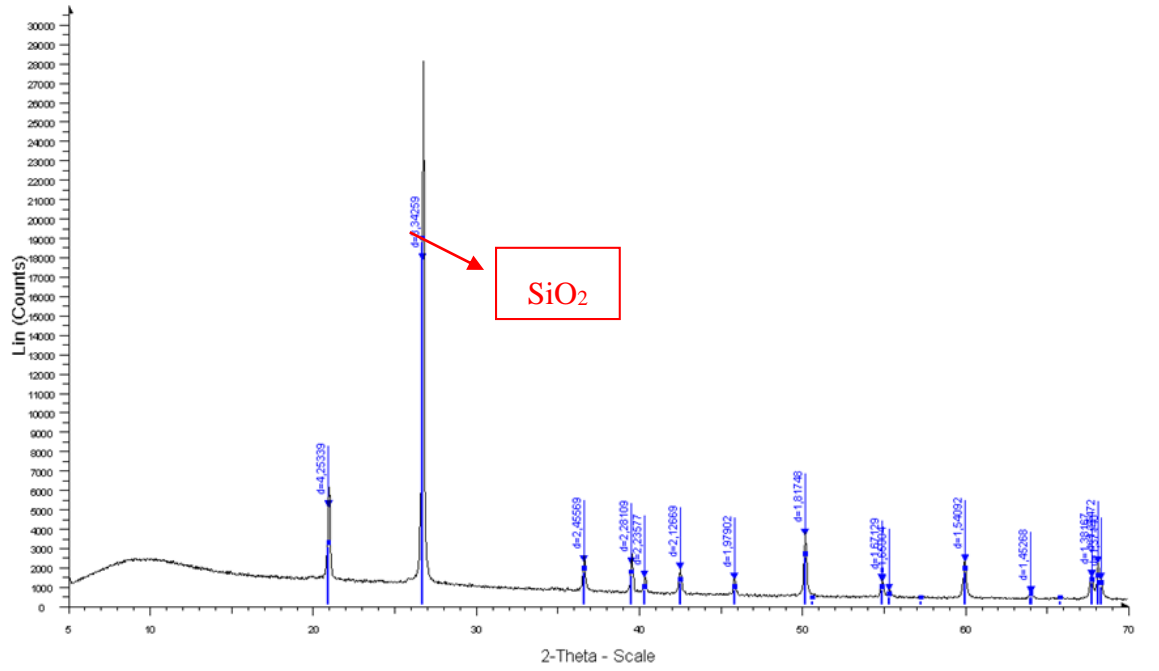
Çimen (2021) döküm kumu ve atık döküm kumunun silika aerojel sentezini gerçekleştirdiği çalışmada, döküm kumu başlangıç malzemesinin XRD analiz sonucunda ana pik şiddetinin yaklaşık olarak $2\theta = 29,39^\circ$ ve CaCO_3 kaynaklı piklerin yapıda yer aldığını ifade etmiştir.



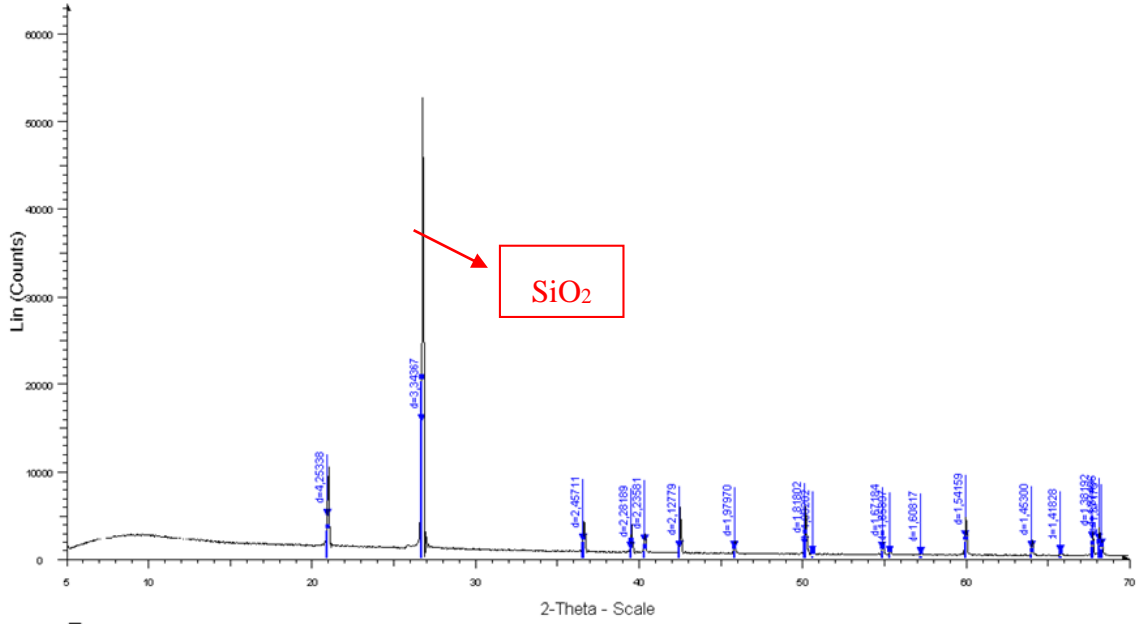
Şekil 64. Ticari döküm kumuna ait XRD diyagramı



Şekil 65. Atık döküm kumuna ait XRD diyagramı



Şekil 66. Radyolarite ait XRD diyagramı



Şekil 67. Kuvarsa ait XRD diyagramı

Deneysel çalışmalarda farklı başlangıç kaynakları kullanılarak TMCS öncülüğünde süperhidrofobik silika aerjel modifikasyonu sonucunda üretilen malzemelere faz ve dönüşümlerinin tespitine yönelik XRD analizleri yapılmıştır. Elde edilen XRD analiz sonuçları sırasıyla Şekil 68, Şekil 69, Şekil 70 ve Şekil 71’ de gösterilmiştir. Analiz sonuçları değerlendirildiğinde, üretilen silika aerjel malzemelerinin amorf yapıda olduğu görülebilmektedir. Literatürle uyumlu olarak $2\theta = 27^\circ$ ’de amorf yapıdaki silisyum pikinin yer aldığı tespit edilmiştir.

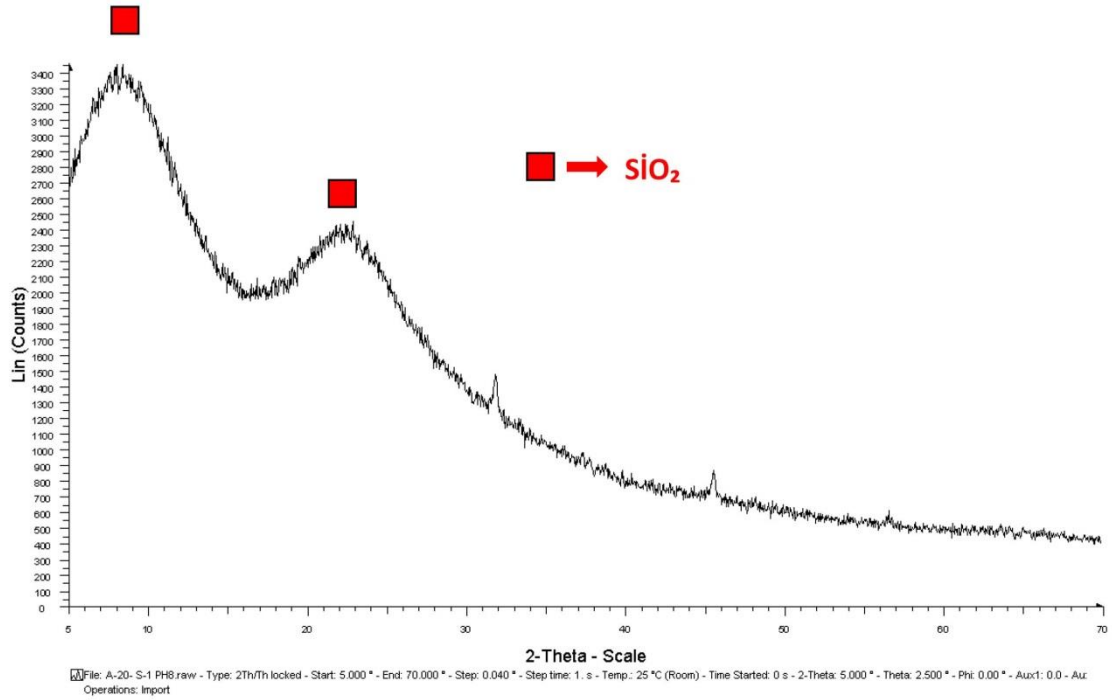
Kayır (2021) silika aerjellerin karakterizasyonu üzerine yapmış olduğu çalışmada, sentezlenen malzemenin ana pik şiddetinin yaklaşık $2\theta = 22^\circ$ civarında ve pik değerinin amorf yapıda olduğunu belirtmiştir.

Saraç (2018) kuvars, perlit, pomza, zeolit, cam gibi hammaddelerden sentezlediği amorf yapıdaki silika aerjel tozunun ana pik değeri $2\theta = 22^\circ$ - 23° mesafesinde olduğunu ifade etmiştir.

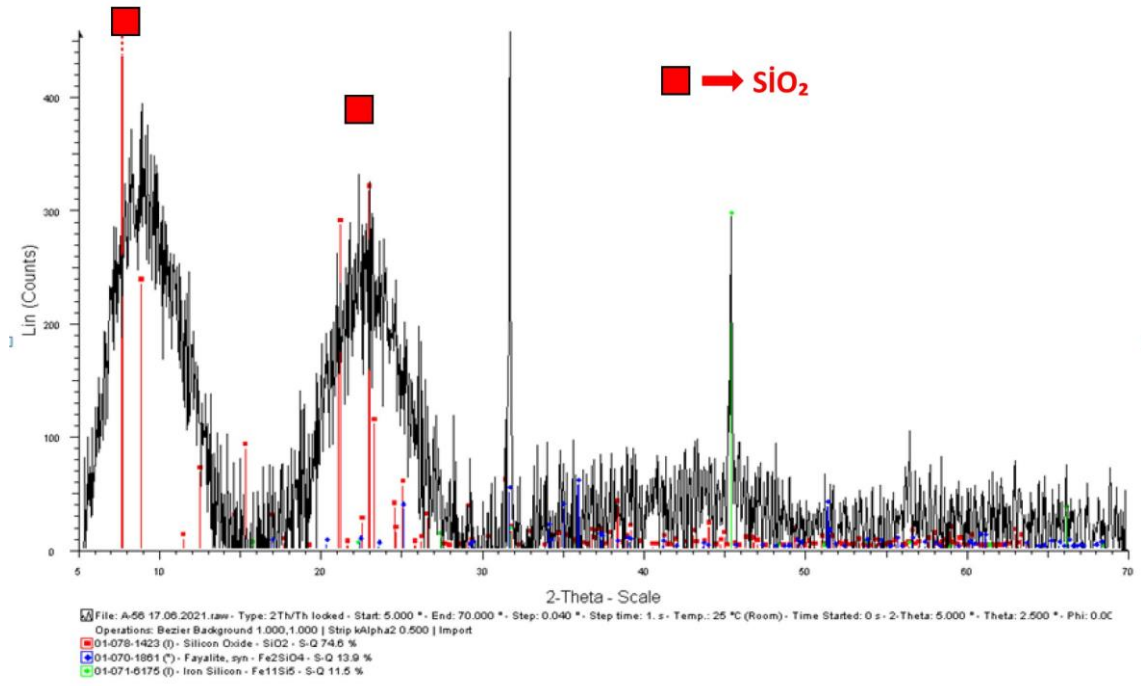
Sharafudeen ve arkadaşları kumdan sodyum silikat sonrasında silikanın hazırlanması üzerine yapmış oldukları bir çalışmada, XRD kırılma modelinde silikaya karşılık gelen pik şiddeti yaklaşık $2\theta = 21.8^\circ$ olarak elde edilmiş ve amorf yapıda olduğu bulunmuştur.

Deneysel çalışmalarda silika aerogelin sentezinde elde edilen SiO₂ pik şiddetinin benzer sonuçlarda ortaya çıktığı tespit edilmiştir (Sharafudeen vd., 2016).

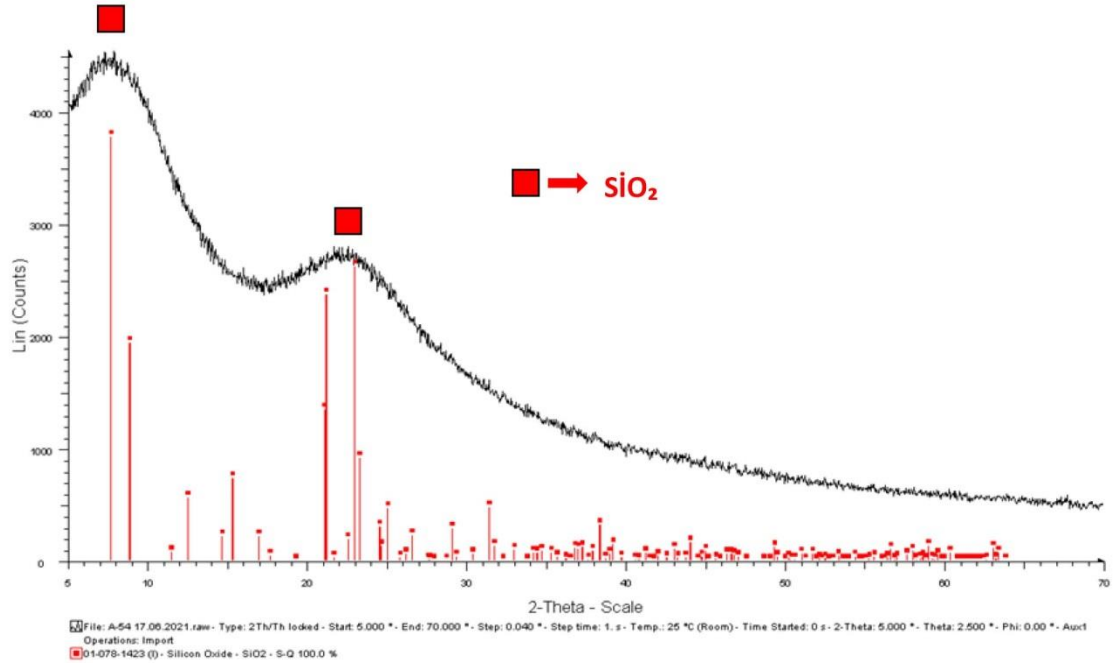
XRD analiz sonuçları incelendiğinde, başlangıç malzemeleri üzerine uygulanan XRD analizlerinin (Şekil 64-67) yanı sıra modifikasyon işlemi neticesinde elde edilen XRD analiz sonuçlarında pik değerlerinin (Şekil 68-71) amorf yapıda ortaya çıktığı görülmektedir.



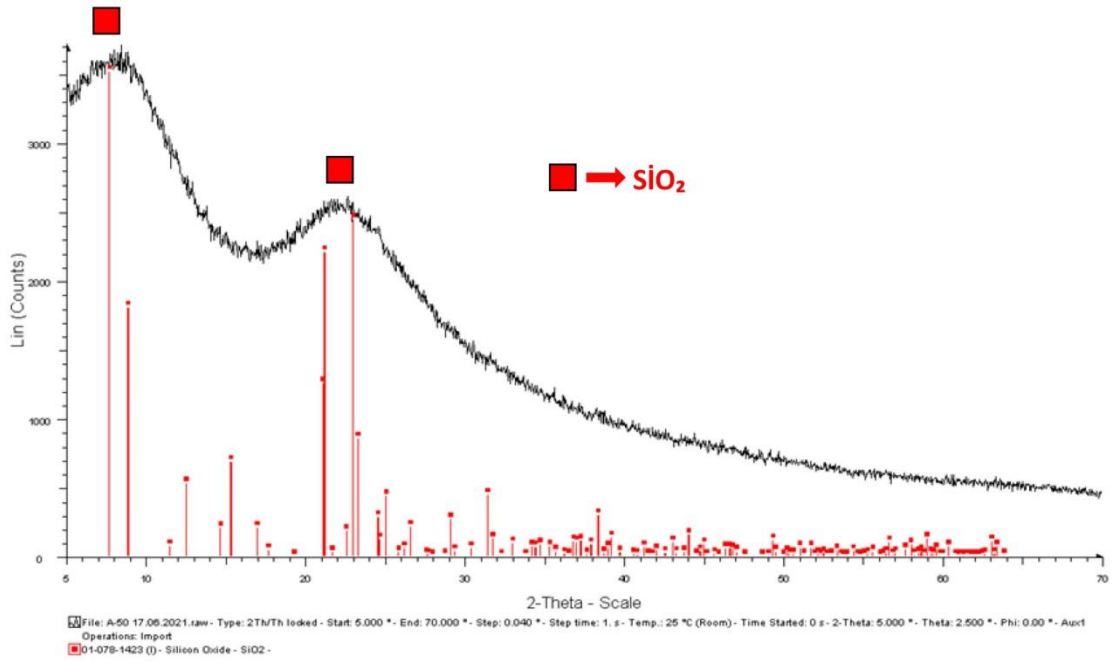
Şekil 68. Ticari döküm kumunda üretilen optimum silika aerogel numunesine ait XRD diyagramı



Şekil 69. Atık döküm kumunda üretilen optimum silika aerojel numunesine ait XRD diyagramı



Şekil 70. Radyolaritten üretilen optimum silika aerojel numunesine ait XRD diyagramı



Şekil 71. Kuvarsdan üretilen optimum silika aerojel numunesine ait XRD diyagramı

4.1.3. ICP-OES Sonuçları

Dört farklı başlangıç malzemelerinden elden edilen sıvı sodyum silikat çözeltilerine ICP-OES analizi yapılarak Si/NaOH miktarı belirlenmiştir. Sonuçların daha hassas olması açısından numuneler iki paralel kullanılarak çalışılmıştır. Tablo 21’de ticari döküm kumu, atık döküm, radyolaritten ve kuvarsdan elde edilen sodyum silikat çözeltilerinin ICP-OES analiz sonuçları verilmiştir.

Ticari döküm kumundan, atık döküm kumundan, radyolaritten, kuvarsadan elde edilen sodyum silikat çözeltilerine ait ICP-OES analiz sonuçları incelendiğinde (Tablo 21), SiO₂ ve Na₂O içeriklerinin farklı yüzde değerlerinde ortaya çıktığı görülmektedir.

ICP-OES analiz sonuçlarına göre ticari döküm kumunun NaOH ile reaksiyonu sonucu oluşan sodyum silikat çözeltilerinin SiO₂ konsantrasyonu %14,04, atık döküm kumunun SiO₂ konsantrasyonu % 7,07, radyolaritin SiO₂ konsantrasyonu % 9,72, kuvarsdan elde edilen sodyum silikat çözeltilerinin SiO₂ konsantrasyonu % 10,98 olarak tespit edilmiştir.

Tablo 21. Sodyum silikat çözeltisine bağlı ortaya çıkan ICP-OES Sonuçları

Numunenin Adı	Konsantrasyon (%)			Konsantrasyon (ppm)	
	SiO ₂	Na ₂ O	SiO ₂ / Na ₂ O	SiO ₂	Na ₂ O
TDK Sodyum Silikat	14,04	18,56	0,76	140446,00	185575,00
ADK Sodyum Silikat	7,07	16,94	0,42	70692,90	169378,00
Radyolarit Sodyum Silikat	9,72	17,89	0,54	97230,70	178898,00
Kuvars Sodyum Silikat	10,98	16,71	0,66	109784,00	167070,00

4.1.4. Yoğunluk Sonuçları

Deneysel çalışmalarda kullanılan farklı başlangıç malzemeleri ticari döküm kumu, atık döküm kumu, radyolarit ve kuvarsdan silika aerojel sentezinde pH değerinin malzeme üzerindeki etkisinin değerlendirilmesinde elde edilen yoğunluk sonuçları sırasıyla şekil 72-75’de gösterilmiştir.

Silika aerojel üretiminde pH değerinin etkisi incelenirken diğer tüm parametreler sabit tutulmuş ve sentezlenen numuneler TDK-pH-X, ADK-pH-X, R-pH-X, K-Ph-X şeklinde isimlendirilmiştir. Bu isimlendirme bütün başlangıç malzemeleri için gerçekleştirilmiştir. TDK; ticari döküm kumunun, ADK; atık döküm kumunun, R; radyolaritin, K; kuvarsin kısaltmasıdır. pH 2, 4, 6, 8, 9 aralığında taranmıştır, X pH değerini temsil etmektedir.

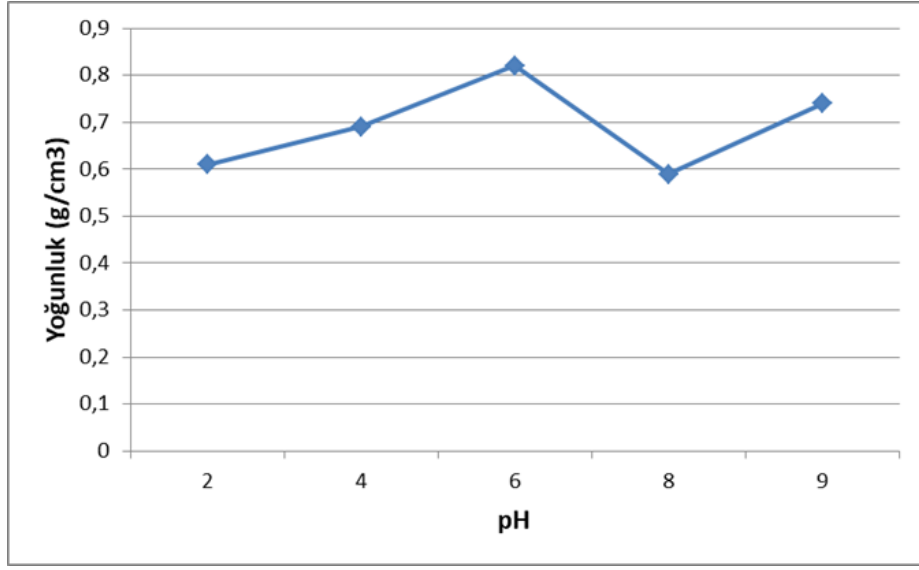
Ticari döküm kumu, atık döküm kumu, radyolarit, kuvars için pH’ın etkisi incelenirken; 2, 4, 6, 8, 9 pH değerlerinde sentezlenen numunelerin yoğunlukları ölçülmüştür. Sentezlenen silika aerojel numunelerinin yoğunluk sonuçlarına bakıldığında en düşük yoğunluğa sahip numunenin sentezlendiği pH değeri o numune için optimum pH parametresi olarak belirlenmiştir.

Şekil 72’de verilen yoğunluk grafiğine göre ticari döküm kumundan sentezlenen silika aerogelin yoğunluk değerleri incelendiğinde, en düşük yoğunluk değeri pH 8’de 0.590 g/cm³ olarak elde edilmiştir. Ölçülen pH değerleri arasında yoğunluğun düşük olması sebebiyle TDK-pH-8 numunesi diğer numuneler arasında en iyi numune olarak belirlenmiştir. Bu değer çalışmanın ilerleyen kısımlarında ticari döküm kumundan silika aerogel sentezi için pH 8 değeri optimum değer olarak alınmıştır.

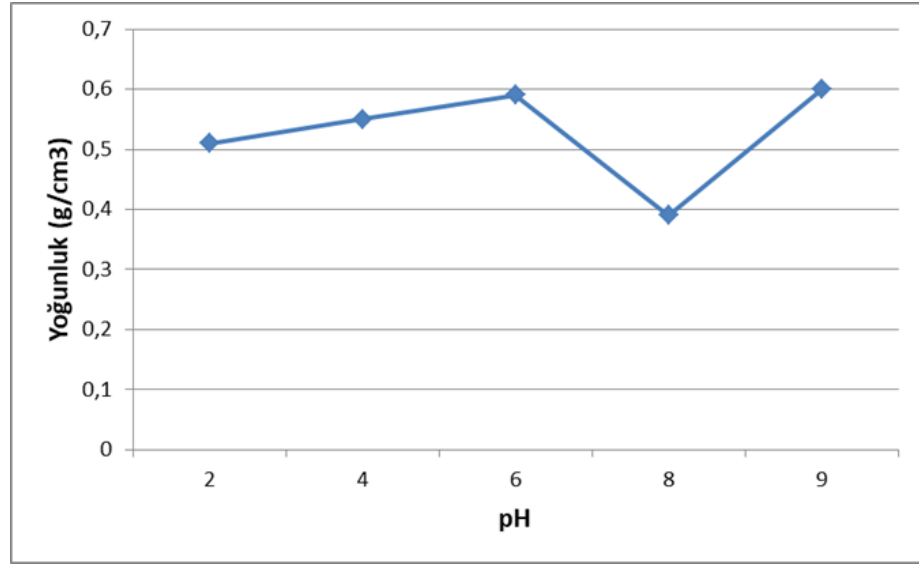
Atık döküm kumu için pH’ın etkisi incelenirken; pH değeri 2, 4, 6, 8 ve 9 olarak sentezlenen ADK numunelerinin yoğunluk değerleri ölçülmüş elde edilen sonuçlar Şekil 73’te grafik olarak verilmiştir. Şekilde verilen yoğunluk grafiğine göre, en düşük yoğunluk değeri pH 8’de 0.390 g/cm³ olarak ölçülmüştür. Ölçülen pH değerleri arasında yoğunluğun düşük olması sebebiyle ADK-pH-8 numunesi diğer numuneler arasında en iyi numune olarak belirlenmiştir. Bu değer çalışmanın ilerleyen kısımlarında atık döküm kumundan silika aerogel sentezi için pH 8 değeri optimum değer olarak alınmıştır.

Şekil 74’de verilen yoğunluk grafiğine göre radyolaritten sentezlenen silika aerogelin yoğunluk değerleri incelendiğinde, en düşük yoğunluk değeri pH 6’da 0.340 g/cm³ olarak ölçülmüştür. Ölçülen pH değerleri arasında yoğunluğun düşük olması sebebiyle R-pH-6 numunesi diğer numuneler arasında en iyi numune olarak belirlenmiştir. Bu değer çalışmanın ilerleyen kısımlarında radyolaritten silika aerogel sentezi için pH 6 değeri optimum değer olarak alınmıştır.

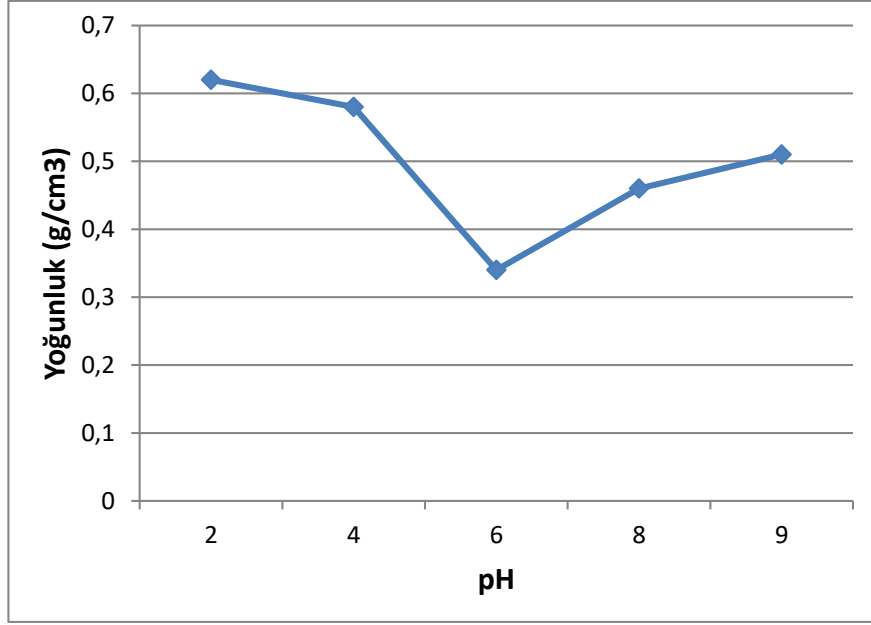
Şekil 75’de verilen yoğunluk grafiğine göre kuvarndan sentezlenen silika aerogelin yoğunluk değerleri incelendiğinde, en düşük yoğunluk değeri pH 6’da 0.500 g/cm³ olarak ölçülmüştür. Ölçülen pH değerleri arasında yoğunluğun düşük olması sebebiyle K-pH-6 numunesi diğer numuneler arasında en iyi numune olarak belirlenmiştir. Bu değer çalışmanın ilerleyen kısımlarında kuvarsdan silika aerogel sentezi için pH 6 değeri optimum değer olarak alınmıştır.



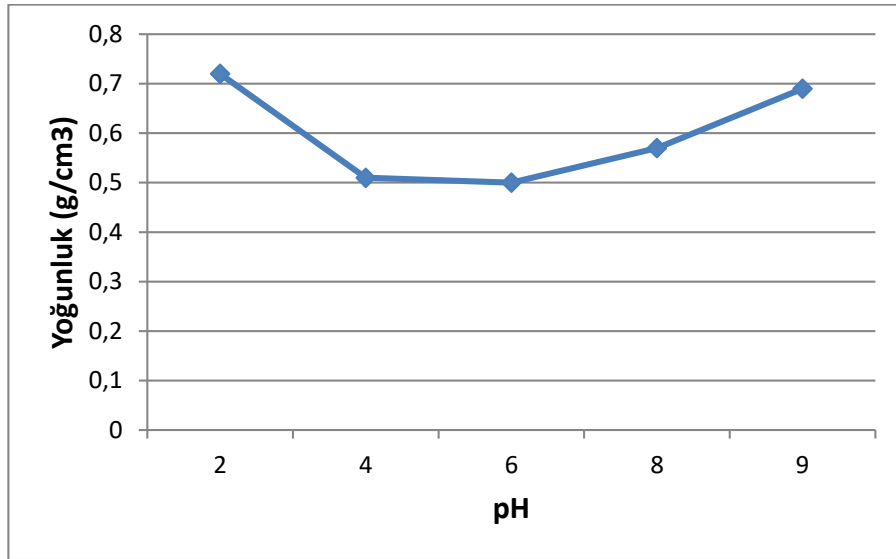
Şekil 72. TDK-pH-X numunelerinin yoğunluk grafiği



Şekil 73. ADK-pH-X numunelerinin yoğunluk grafiği



Şekil 74. R-pH-X numunelerinin yoğunluk grafiği



Şekil 75. K-pH-X numunelerinin yoğunluk grafiği

4.1.5. FT-IR Sonuçları

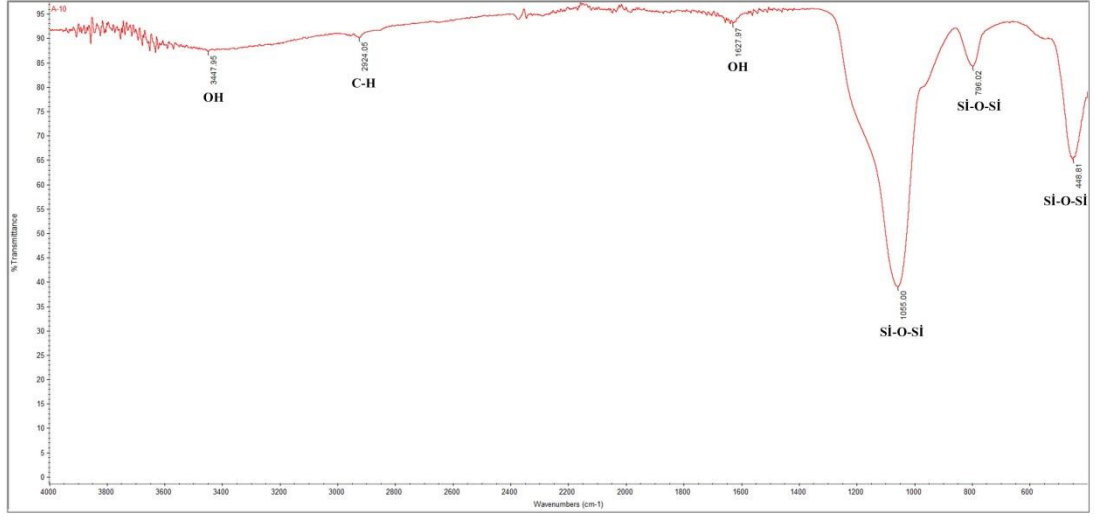
Farklı başlangıç malzemeleri (ticari döküm kumu, atık döküm kumu, radyolarit ve kuvars) kullanılarak optimum pH değerleri neticesinde üretilen hidrofilik silika aerjel numunelerinin FT-IR analiz sonuçları Şekil 76-79' de gösterilmiştir. Sentezlenen silika aerjelin XRD analiz sonuçları ötesinde daha net sonuçların elde edilebilmesi kapsamında bağ yapısının belirlenmesi için FT-IR analizi yapılmıştır. FT-IR

karakterizasyon çalışmaları optimum pH değerleri neticesinde üretilen hidrofilik silika aerojel numuneleri ve TMCS yüzey modifikasyonu sonucunda elde edilen süperhidrofobik silika aerojel numuneleri üzerinden gerçekleştirilmiştir.

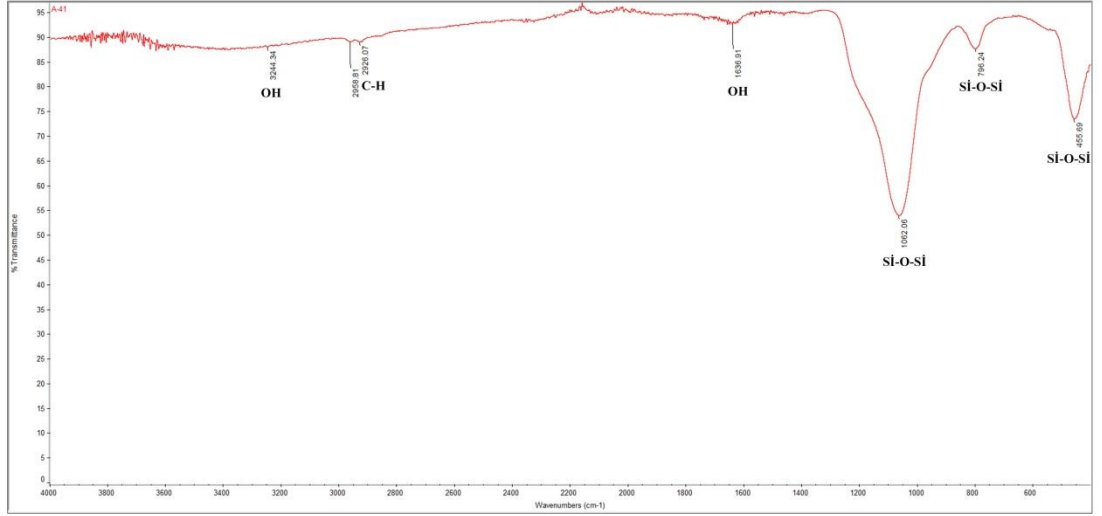
Farklı başlangıç malzemeleri ile elde edilen modifiye işlemi uygulanmamış hidrofilik silika aerojel numunelerinin tamamında 4000-400 cm^{-1} aralığında gerçekleştirilen FT-IR analizi sonuçları incelendiğinde (Tablo 22); ortaya çıkan bağ yapılarının sırasıyla O-H, Si-O-Si ve C-H aralarındaki bağlanmalarının olduğunu tanımlamaktadır. Bu kapsamda sentezlenen hidrofilik silika aerojel malzemesinde, 3400 cm^{-1} ve 1600 cm^{-1} dalga boylarında yapı içerisinde fiziksel olarak nemden/sudan kaynaklı olarak O-H absorpsiyon bantları/titreşimlerinin yer aldığı görülebilmektedir. Bununla birlikte 1050-1060 cm^{-1} ve 450-455 cm^{-1} dalga boylu aralığında ise Si-O-Si piklerinin yer aldığı gözlemlenmektedir (Saraç, 2018). Aynı zamanda 790 cm^{-1} dalga boyunda da Si-O-Si absorpsiyon piklerinin yer aldığı görülebilmektedir. O-H ve Si-O-Si absorpsiyon batlarının yanısıra 2950 cm^{-1} dalga boyunda C-H bağına karşılık gelen absorpsiyon pik zirvesi tespit edilmiştir (Wagh, 2015). Literatürde benzer şartlarda sentezlenen silika arojelin FT-IR spektrumlarına bakıldığında ise Si-O-Si absorpsiyon bantlarının sırasıyla 440-470 cm^{-1} , 790-804 cm^{-1} ve 1070-1090 cm^{-1} dalga boylarında Si-O-Si bağ yapılarını tanımladığı, O-H bağ yapısı açısından absorpsiyon bandının ise 3440-1630 cm^{-1} değerlerinde (Güler, 2012; Yılmaz, 2013) ve 2900 cm^{-1} dalga boylarında C-H bağı olduğu görülmektedir (Mahadik vd., 2011, Huang, vd., 2009).

Tablo 22. TDK, ADK, R, K maddelerinden farklı pH'larda elde edilen hidrofilik silika arojellerin F-TIR spektrumları

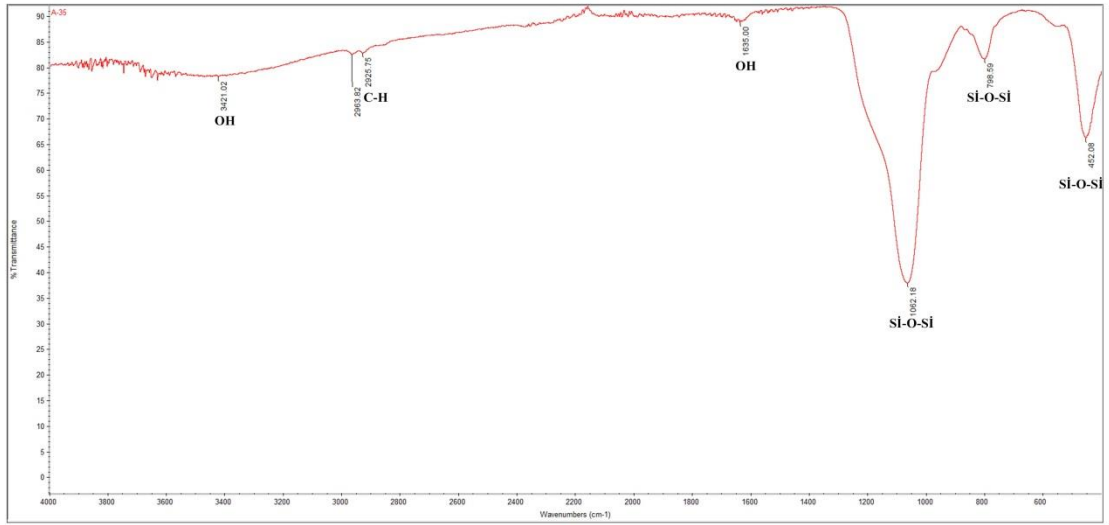
BANDLAR	TDK-pH-8	ADK-pH-8	R-pH-6	K-pH-6
O-H	3447.95	3244.34	3421.02	3416.64
Absorpsiyon Piki	1627.97	1636.91	1635.00	1636.78
Si-O-Si	1055.00	1062.06	1062.18	1058.06
Absorpsiyon Piki				
Si-O-Si	448.81	455.69	452.08	449.26
Absorpsiyon Piki				
Si-O-Si	796.02	796.24	798.59	799.35
Absorpsiyon Piki				
C-H	2924.05	2926.07	2925.75	-
Absorpsiyon Piki				



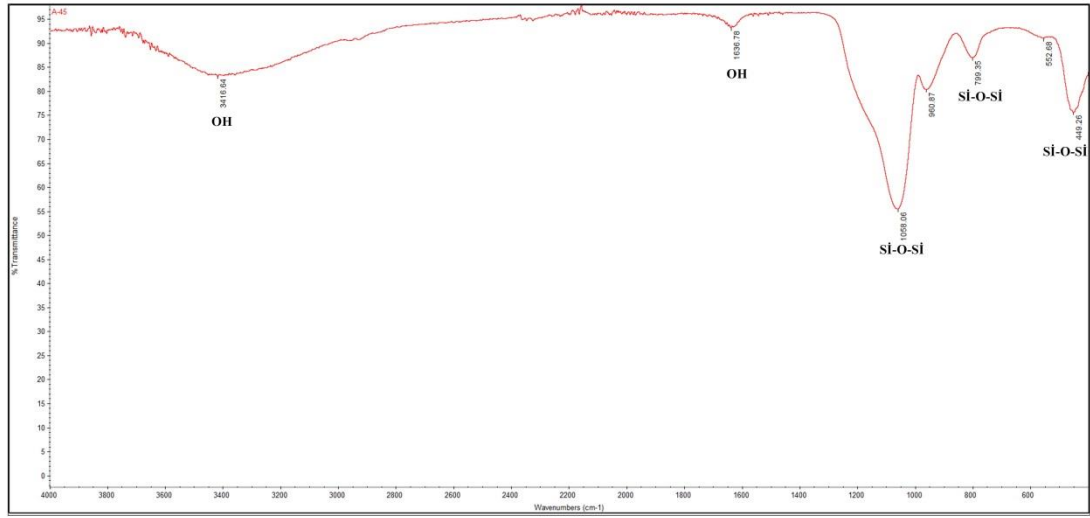
Şekil 76. TDK-pH-8 numunesine ait FT-IR analiz sonucu



Şekil 77. ADK-pH-8 numunesine ait FT-IR analiz sonucu



Şekil 78. R-pH-6 numunesine ait FT-IR analiz sonucu



Şekil 79. K-pH-6 numunesine ait FT-IR analiz sonucu

Farklı başlangıç malzemeleri (ticari döküm kumu, atık döküm kumu, radyolarit ve kuvars) kullanılarak optimum pH değerleri neticesinde üretilen süperhidrofobik (TMCS) silika aerjel numunelerinin FT-IR analiz sonuçları Şekil 80-83’ de gösterilmiştir. Yüzey modifikasyonunun etkisini görmek için sentezlenen silika aerjellere FTIR analizi yapılmıştır.

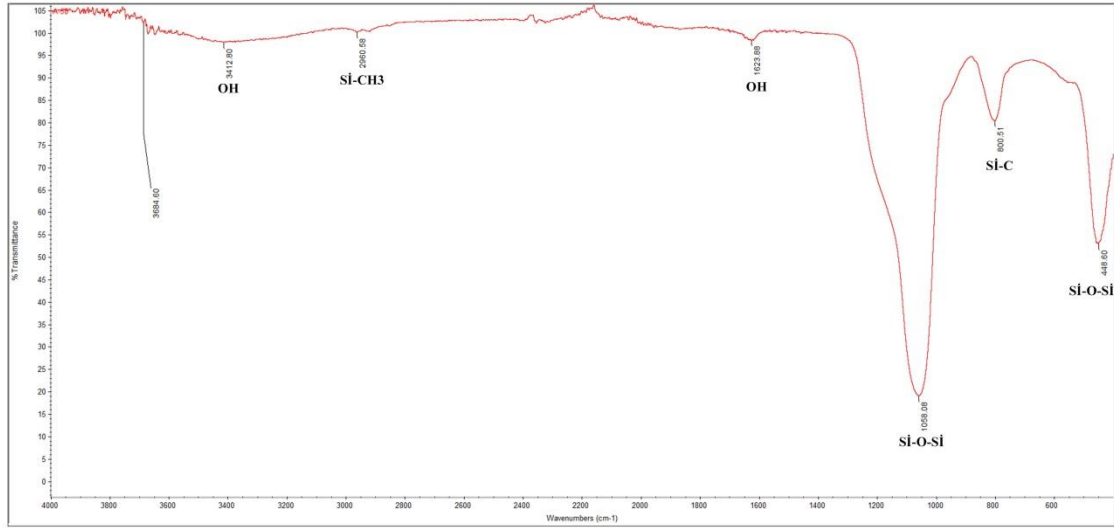
Süperhidrofobik silika aerjel numunelerinin 4000-400 cm^{-1} aralığında gerçekleştirilen FT-IR analizi sonuçları incelendiğinde (Tablo 23); yaklaşık olarak 3400 cm^{-1} ve 1600 cm^{-1} bölgelerinde yapı içerisinde fiziksel olarak nemden/sudan kaynaklı olarak O-H absorpsiyon bantları/titreşimlerinin yer aldığı görülebilmektedir. Bu tez çalışması kapsamında süperhidrofobik silika aerjel sentezine yönelik olarak, başlangıç malzeme içeriklerinde yer alan reaktif gruplar önem arz etmektedir. Bu anlamda yapıda yer alan silika grubu (SiO_2) aktif gruplardır ve O-H gruplarını yüzeylerinde taşıyabilmektedir. Bunun yanı sıra malzeme yüzey alanı ne kadar fazla ise o kadar çok malzeme yüzeyinde modifiye edilebilecek grup vardır. Dolayısıyla o derece molekül malzeme yüzeyine yüklenebilir (Crick ve Parkin, 2010; Alptekin vd., 2019; Mahadik vd., 2011). Bununla birlikte 1054-1058 cm^{-1} 440-448 cm^{-1} dalga boyuna Si-O-Si titreşim bantları, 945-946 cm^{-1} dalga boyunda Si-OH gözlemlenmektedir. Aynı zamanda 2960-2962 cm^{-1} dalga boyunda Si- CH_3 grubundan, 800-850 cm^{-1} , 750-790 cm^{-1} dalga boyunda TMCS'nin yapıya bağlanması sonrası ortaya çıkan Si-C absorpsiyon bantları gözlemlenmiştir. Sentezlenen malzeme yüzeyi ile alakalı olarak, yüzey ne kadar apolar ise (nonpolar) suyu o kadar iter. Kullanılan $(\text{CH}_3)_3\text{SiCl}$ formülüne sahip TMCS malzeme içeriğinde yer alan Silan (bir tarafı Klor Cl, diğer tarafı Methyl CH_3) içeriğindeki CH_3 yapısı nonpolar grup olarak bilinmektedir. Su ile etkileşimi zayıftır. Dolayısıyla su ile etkileşime girmediği için suyu itici özelliği bulunmaktadır (Crick ve Parkin, 2010; Mahadik vd., 2011). Buda sentezlenen silika aerjel toz malzemesinin suyu sevmeyen özellikte yani süperhidrofobik olduğunu göstermektedir. Ayrıca 940 cm^{-1} 'de zayıf Si-OH absorpsiyon pikleri gözlemlendi (Al Oweini ve El-Rassy, 2009; Hilonga vd., 2009).

Yapılan literatür araştırmaları neticesinde; TMCS yüzey modifikasyonu sonucunda elde edilen süperhidrofobik silika aerjellere ait FT-IR analiz sonuçları incelendiğinde Si- CH_3 ve Si-C bağlanma şekli olarak karakteristik piklerinin 2980 cm^{-1} , 1255 cm^{-1} , 1400 cm^{-1} ve 850 cm^{-1} dalga boyunda olduğu belirtilmektedir. Bu pikler TMCS'nin kimyasal bağlanma ile silis omurgasına başarılı bir şekilde dahil olduğunu göstermektedir (Li vd., 2012). Benzer şekilde hidrofilik ve hidrofobik silika aerjellerin bazı fiziksel ve kimyasal özelliklerinin karşılaştırılması açısından FT-IR analizi sonucu, TMCS'nin yapıya bağlanması ile 2990 cm^{-1} civarında Si- CH_3 grubundan ve 1280, 840 ve 766 cm^{-1} dolaylarında Si-C absorpsiyon bantları gözlemlenmiştir (Yang vd., 2020). TMCS ile yüzey modifikasyonu yapılmış silika aerjel tozlarına ait alınan başka bir FTIR

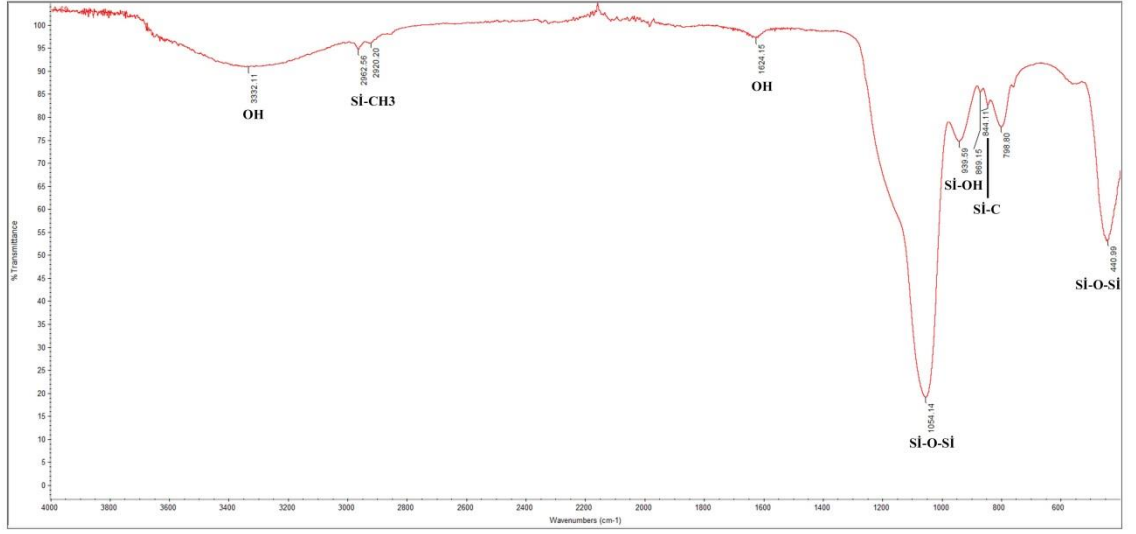
spektrumunda ise 850 ve 2965 cm^{-1} 'de görülen Si-CH₃ pikleri yüzey modifikasyonun gerçekleştiğini göstermektedir (Sarawade, 2006).

Tablo 23. TDK, ADK, R, K'dan optimum pH'larda elde edilen süperhidrofobik silika aerojellerin FT-IR spektrumları

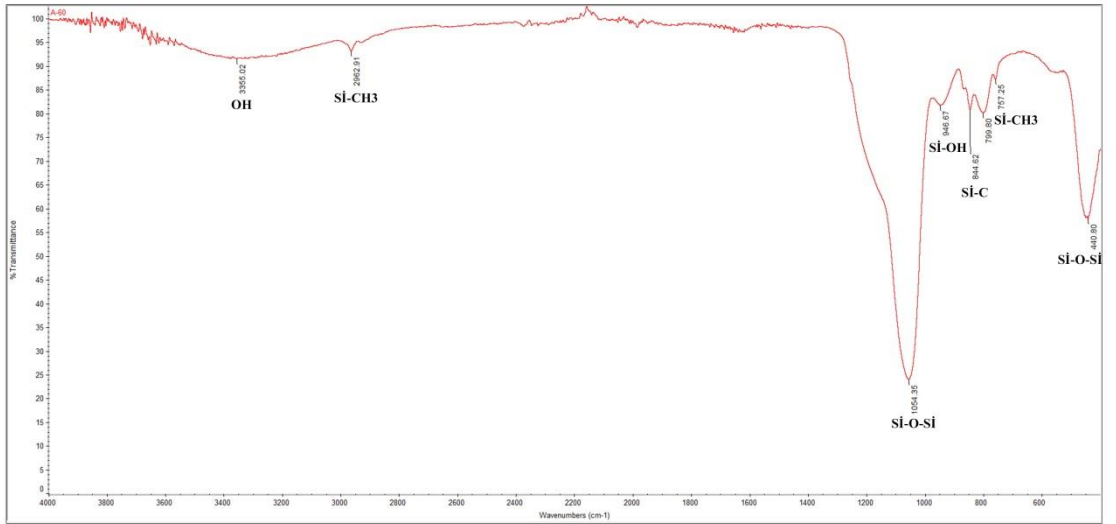
BANDLAR	TDK-pH-8	ADK-pH-8	R-pH-6	K-pH-6
O-H	3412.80	3332.11	3355.02	3327.02
Absorpsiyon Piki	1623.88	1624.15	-	1618.09
Si-O-Si	1058.08	1054.14	1054.35	1054.47
Absorpsiyon Piki	448.60	440.99	440.80	440.89
Si-CH₃	2960.58	2962.56	2962.91	2962.56
Absorpsiyon Piki	-	-	757.25	757.28
Si-C Piki	800	844.11	844.62	844.60
Si-OH	-	939.59	946.67	945.26



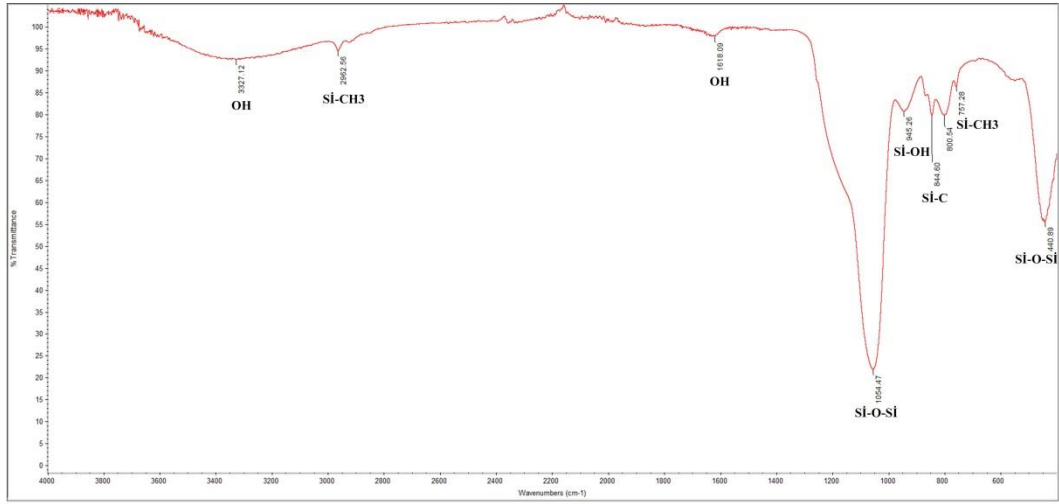
Şekil 80. TDK-pH-8 numunesinin yüzey modifikasyonu sonucu F-TIR spektrumu



Şekil 81. ADK-pH-8 numunesinin yüzey modifikasyonu sonucu F-TIR spektrumu



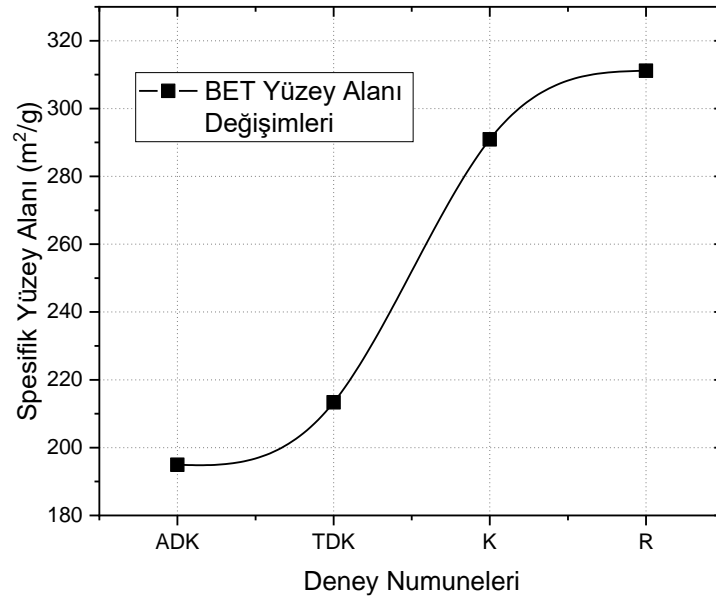
Şekil 82. R-pH-6 numunesinin yüzey modifikasyonu sonucu F-TIR spektrumu



Şekil 83. K-pH-6 numunesinin yüzey modifikasyonu sonucu F-TIR spektrumu

4.1.6. BET Sonuçları

Farklı başlangıç malzemeleri (ticari döküm kumu, atık döküm kumu, radyolarit ve kuvars) kullanılarak optimum pH değerleri neticesinde üretilen süperhidrofobik (TMCS) silika aerojel numunelerinin elde edilen BET yüzey alanı analiz sonuçları Şekil 84’ te gösterilmiştir. Genellikle literatür çalışmaları da incelendiğinde, silika aerojel malzemelerinin düşük yoğunluk ve yüksek yüzey alanına sahip olduğu bilinmektedir (Bhagat, 2008; Kesgin, 2019).



Şekil 84. BET yüzey alanı değişim sonuçları

Bu kapsamda elde edilen BET yüzey alanı sonuçları incelendiğinde (Şekil 84), en yüksek BET yüzey alanı değeri 311,161 m²/g olarak radyolarit ile sentezlenen ve modifiye edilmiş silika aerojel malzemesinden elde edildiği tespit edilmiştir. Diğer başlangıç malzemeleri (ADK-TDK-K) ile sentezlenen ve modifiye edilmiş silika aerojel malzemelerinin BET yüzey alanı sonuçları ise sırasıyla 194,930 m²/g, 213,379 m²/g ve 290,904 m²/g olarak elde edilmiştir.

Genel olarak yapılan yüzey modifikasyonu sonrasında deney numunelerinin düşük yoğunlukta olduğu ve özellikle radyolarit malzemesi ile sentezlenen silika aerojel malzemesinde BET yüzey alanı yüksek olarak elde edilmiştir. Yapılan benzer içerikli çalışmalardan elde edilen sonuçlar incelendiğinde; Mermer'in silika temelli aerojellerin sol-jel yöntemi ile sentezi ve yapısal özelliklerin incelenmesi üzerine yaptığı çalışmada kumdan hidrofobik silika aerojel sentezi gerçekleştirmiştir. Sentezlenen numunelerin BET yüzey alanı değeri 281,73 m²/g olarak ölçülmüştür. Sentezlenen silika aerojel numunelerinin düşük yoğunluk ve yüksek yüzey alanı oluştuğunu ifade etmiştir (Mermer, 2018). Sarawade ve arkadaşlarının yaptıkları benzer bir çalışmada cam suyundan elde edilmiş sodyum silikat başlangıç malzemesi kullanarak hidrofobik (TMCS) silika aerojel sentezi gerçekleştirmişlerdir. Sentezledikleri silika aerojelin BET yüzey alanı değerleri 431 ila 681 m²/g olarak tespit edilmiştir. Sentezledikleri silika aerojeller de düşük yoğunluk yüksek yüzey alanı oluştuğunu ifade etmişlerdir (Sarawade vd., 2006). Nayak ve Bera pirinç kabuğu külünden silika aerojel sentezi ile spesifik yüzey alanı değeri 273 m² /g olan silika aerojel numuneler elde etmişlerdir (Nayak ve Bera, 2009). Tadjarodi ve arkadaşları pirinç kabuğu külünden sol-jel yöntemi ve atmosferik basınç altında kurutma ile silika aerojel sentezi gerçekleştirdi. Sentezlenen numunelerin BET analizi 315 m² /g olarak ölçülmüştür (Tadjarodi, 2012). Sonuç olarak elde edilen gerek yoğunluk gerekse yüksek yüzey alanı değerleri, yapılan çalışmalar ile paralellik sergilediği görülmektedir. Bu bağlamda TMCS öncülüğü ve uygulamasının, farklı başlangıç malzemeleri ile elde edilen süperhidrofobik malzemelerinin yüzey alanı değerlerinin artışında önemli bir etkiye sahip olduğu söylenebilir.

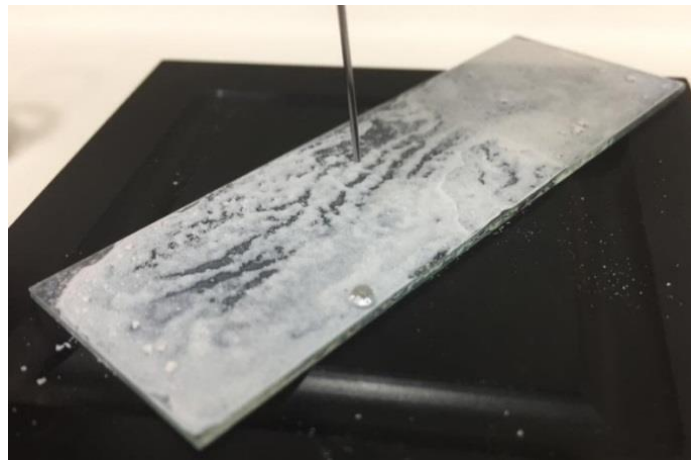
4.1.7. Temas Açısı Ölçüm Sonuçları

Deneysel çalışmalarda farklı başlangıç malzemeleri (ticari döküm kumu, atık döküm kumu, radyolarit ve kuvars) kullanılarak optimum pH değerleri neticesinde üretilen TMCS ile yüzey modifikasyonu sonrası süperhidrofobik özellik kazandırılan silika aerogel numunelerinin hidrofilik, hidrofobik veya süperhidrofobik derecelerinin belirlenebilmesi için temas açısı ölçümleri yapılmıştır. Temas açısının ölçümleri açısından TMCS ile yüzey modifikasyonu yapılmış olan süperhidrofobik silika aerogel numune üzerinde ortaya çıkan su damlacığının görüntüsü Şekil 85’ de gösterilmiştir. Bu duruma bağlı olarak elde edilen temas açısı ölçüm sonuçları ise sırasıyla Şekil 86-89’ de gösterilmiştir. Malzemede yüzeyinin hidrofobik olup olmadığı temas açısı ile belirlenebilir. Bu kapsamda temas açısı sonuçlarına göre 90° den küçük olan yüzeyler hidrofilik, 90° ile 150° arasında olan yüzeyler hidrofobik, temas açısı 150° den büyük olan yüzeylerse süperhidrofobik olarak değerlendirilmektedir (Ogihara vd., 2012; Alptekin vd., 2019; Alptekin, 2015). Bir malzeme yüzeyinin süperhidrofobik olabilmesi için iki şart gerekmektedir. Birinci şart yüzeyin temas açısının 150°’den büyük olması, ikinci şart ise yüzeyin eğiminin 10° daha küçük olmasıdır. 10° daha küçük yüzey eğimi olan malzemelerde, su yüzeye yapışmadan akarak yüzeyden uzaklaşmaktadır. Bu iki şart sağlanıyorsa malzemelerin yüzeyi süperhidrofobiktir. Su yüzeyden akıp gittiği için süperhidrofobik modeli olarak da Cassie-Baxter modeline uymaktadır (Crick ve Parkin, 2010). Bu anlamda silika aerojellerin yüzey modifikasyonu üzerine yapılan çalışmalar incelendiğinde; Liv vd. (2012) , TEOS ve TMCS öncüsü kullanarak tek aşamada ortam basıncında yüzey modifikasyonu yoluyla hidrofobik silika aerogelin sentezini gerçekleştirmişlerdir. Modifikasyon sonrasında temas açısı 110° olarak ölçülmüştür, bu değer silika aerogelin suyu sevmeyen yani hidrofobik yapıda olduğunu ortaya koymaktadır. Bir diğer çalışma açısından, Rao ve arkadaşları sodyum silikat ön maddesi kullanarak ortam basıncında kurutma yöntemi ve çözücü değiştirme işlemi ile yüzey modifikasyonu sonrası temas açısı 160° olan süperhidrofobik silika aerogel sentezi gerçekleştirmiştir (Rao vd., 2007).

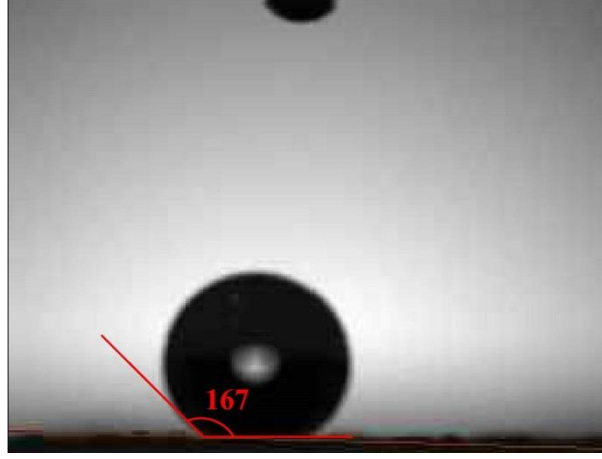
Yapılan çalışmalar ve özellikle bu çalışma açısından ortaya çıkarılan sentezleme çalışmaları neticesinde TMCS ile yüzey modifikasyonu sonrası temas açısı ölçüm sonuçları değerlendirildiğinde; TDK’dan sentezlenen ve modifiye edilen silika aerogel

malzemesinin temas açısı değeri 167° olarak ölçülmüştür (Şekil 86). Bu değer ticari döküm kumundan üretilen silika aerojelin süperhidrofobik özellikte olduğunu göstermektedir. Şekil 87-88-89' da sırasıyla verilen ADK, R ve K başlangıç malzemeleri ile sentezlenen ve modifikasyon sonrası silika aerojel malzemelerinin temas açısı ölçüm sonuçlarının tümü $\theta > 150^\circ$ den büyüktür. Yine benzer şekilde elde edilen bu değerler ADK, R ve K başlangıç malzemelerinden üretilen silika aerojelin süperhidrofobik özellikte olduğunu göstermektedir. Deneysel çalışmalarda TDK, ADK, R ve K'dan üretilen numune yüzeylerinde süperhidrofobiklik için gereken 2 şart sağlandığı için deneysel numuneler süperhidrofobik özelliktedir. Deney numunelerimizin yüzeyi Cassie-Baxter modeline sahiptir ve süperhidrofobiklik ideal derecede elde edilmiştir. Ayrıca deney numunelerinin süperhidrofobiklik derecelerini gösterebilmek için statik temas açısı yerine dinamik temas açısı ölçüldü ve temas açısı görüntülerini Şekil 86-89 sırasıyla gösterilmektedir. Dinamik temas açısını ölçerken yüzeyi az miktarda eğerek damlatılan suyun yüzden akıp gitmesi ile belirlenmektedir (Maynes vd., 2011; Prince vd., 2015; Kibar, 2016a; Kibar, 2016b).

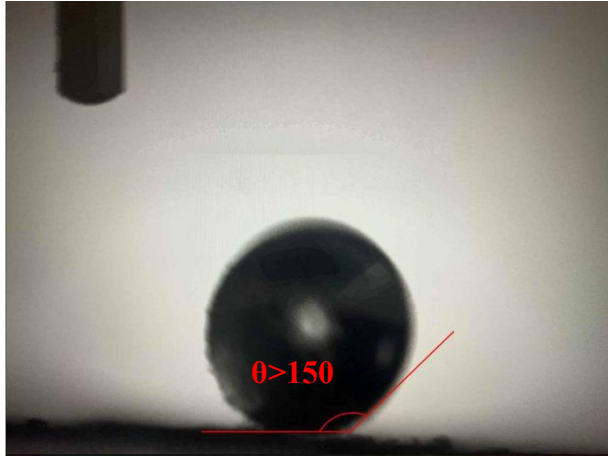
Süperhidrofobik malzeme üretimi üzerine yapılan çalışmalar diğer çalışmalarda incelendiğinde, TMCS ile modifiye çalışmaları sonrası elde edilen temas açısı değerleri sırasıyla 152.8° ve 155° olarak ölçülmüştür (Nguyen, vd., 2020) Mahadik vd. (2011). Yapılan bu çalışmalar ile birlikte bu durumun sentezlenen silika aerojel malzemelerinin süperhidrofobik yapıda olduğunu doğrular nitelikte olduğu şeklinde yorumlanabilir.



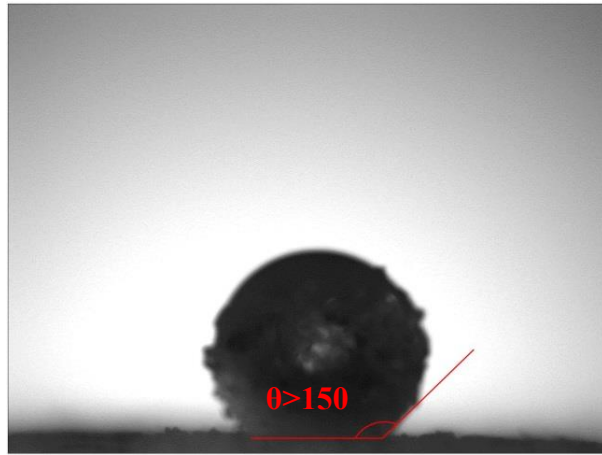
Şekil 85. TMCS ile yüzey modifikasyonu yapılmış olan süperhidrofobik silika aerojel numune üzerinde su damlacığının görüntüsü



Şekil 86. TMCS ile yüzey modifikasyonu yapılmış olan süperhidrofobik TDK silika aerjel numunesinin temas açısı ölçümü



Şekil 87. TMCS ile yüzey modifikasyonu yapılmış olan süperhidrofobik silika aerjelin temas açısı ölçümü



Şekil 88. TMCS ile yüzey modifikasyonu yapılmış olan süperhidrofobik silika aerjelin temas açısı ölçümü



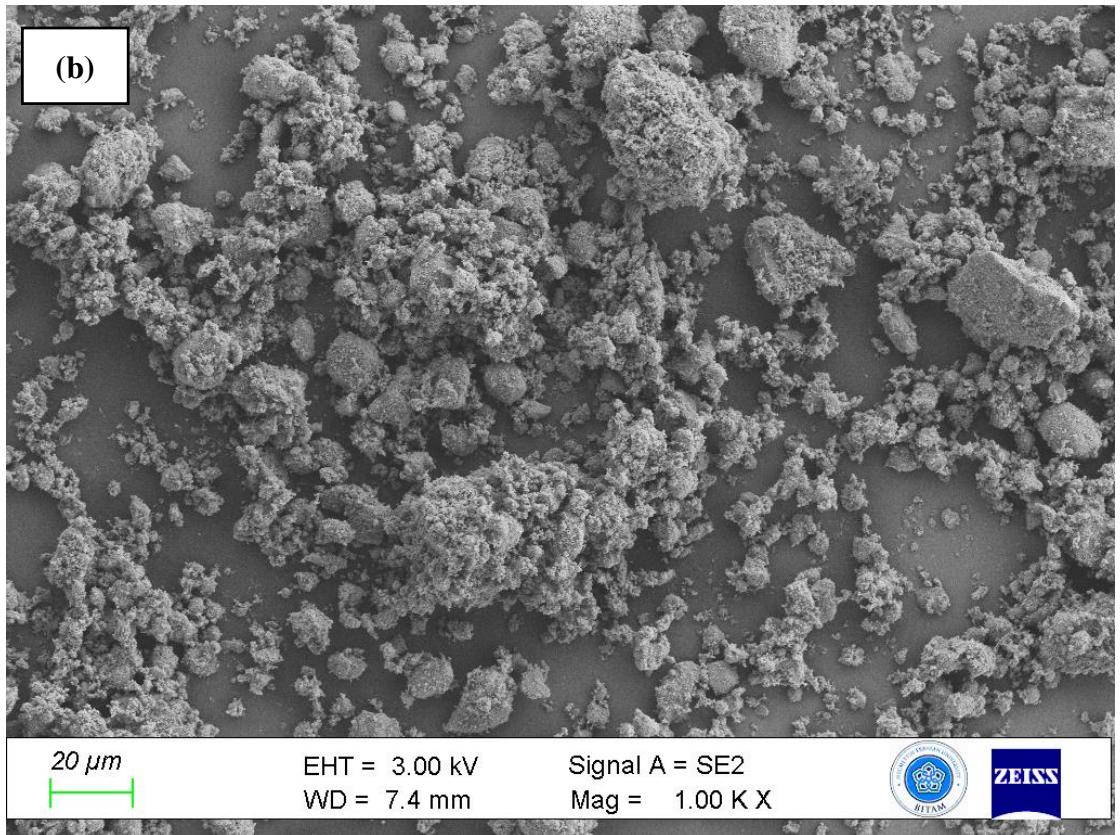
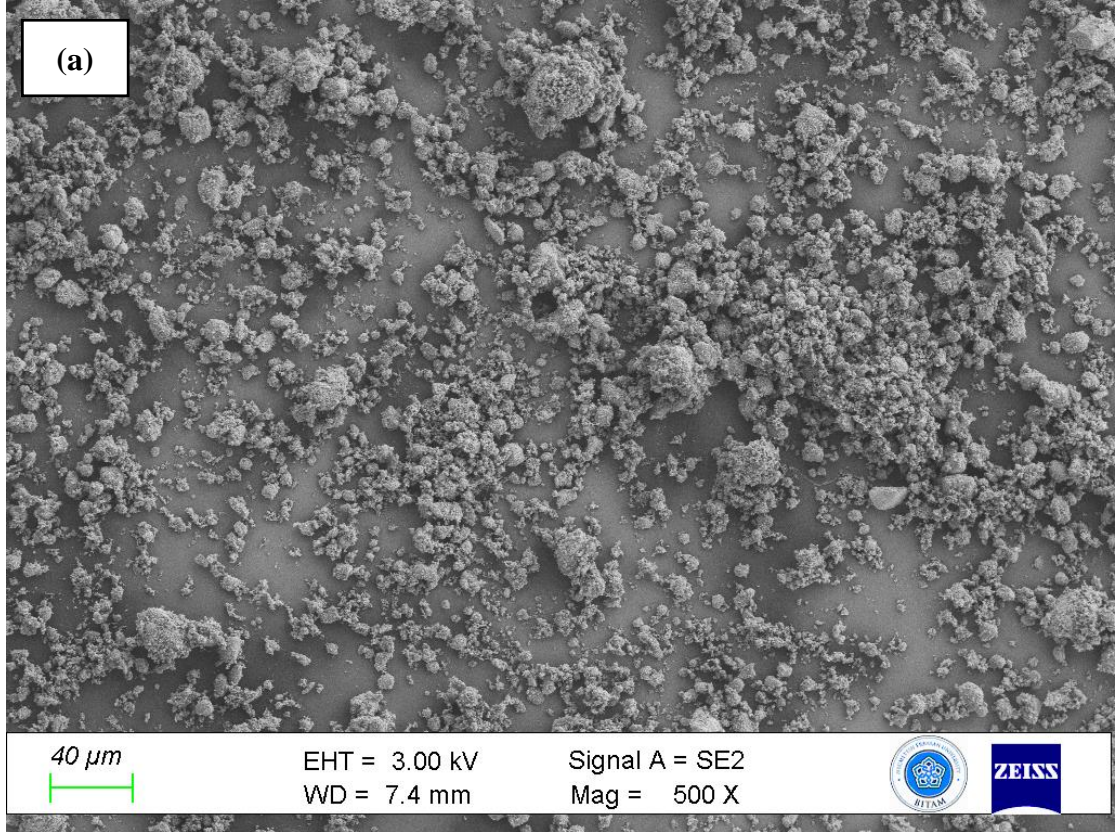
Şekil 89. TMCS ile yüzey modifikasyonu yapılmış olan süperhidrofobik silika aerogelin temas açısı ölçümü

4.1.8. FE-SEM Sonuçları

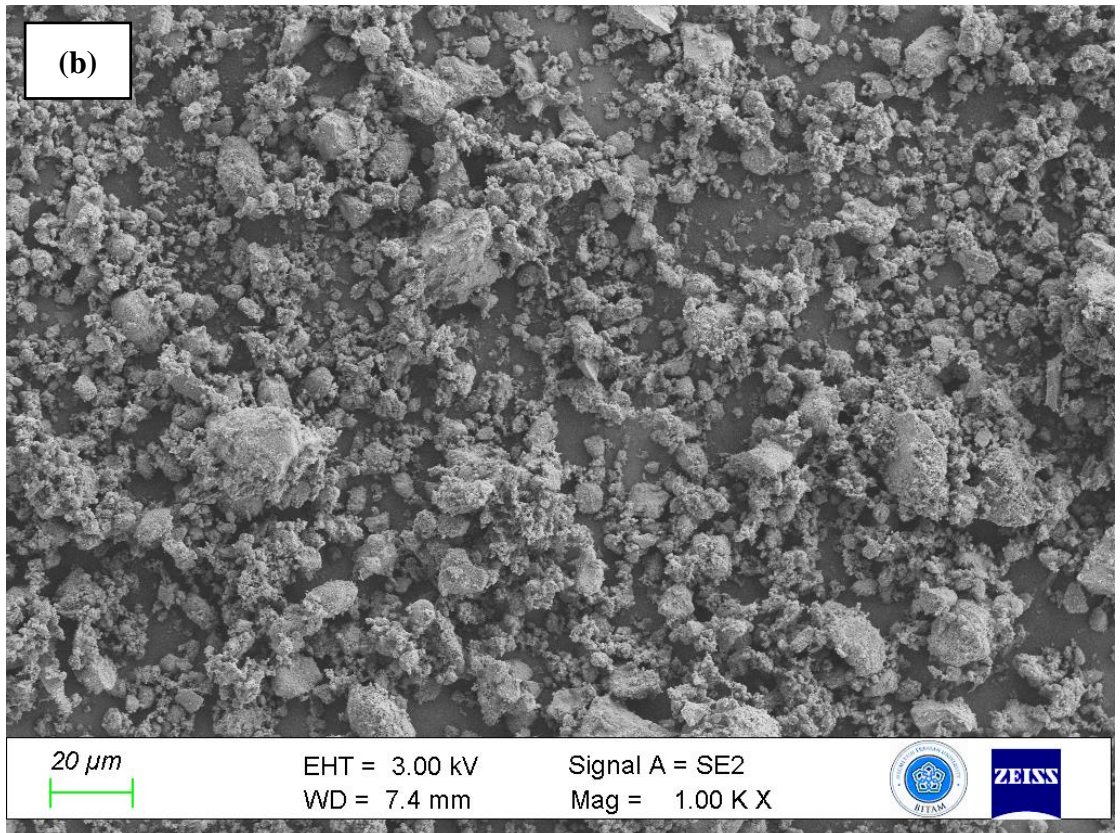
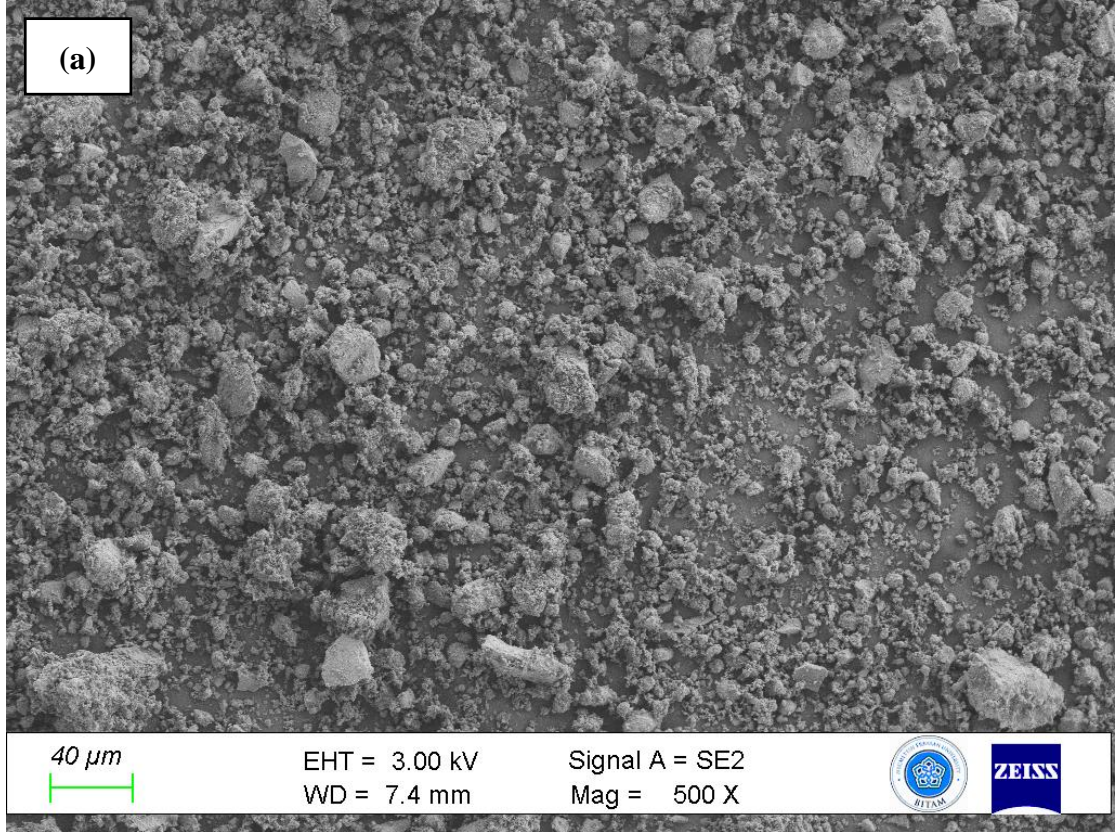
Deneysel çalışmalarda farklı silika kaynakları kullanılarak sol-jel yöntemi ile TMCS modifikasyon ajanı kullanılarak üretilen süperhidrofobik silika aerogel toz malzemelerinin elde edilen SEM görüntüleri sırasıyla Şekil 90-93'de verilmiştir. Bu anlamda farklı başlangıç silika içerikleri ile üretilen aerogel toz malzemelerin neredeyse hepsinde çoğunlukla düzensiz şekil ve morfolojide yer aldığı görülebilmektedir. Özellikle bu sentezlenen silika aerogel toz malzemenin çok küçük boyutlarda ve nano mertebeye yakın olması sebebiyle, tozlarda ciddi anlamda kümeleşme/topaklanma veya aglomera oluşumları göze çarpmaktadır. Bu da tozların iri boyut sergilemesine sebep olmaktadır.

Şekil 90 ve 91' de verilen ticari döküm ve atık döküm kumu kullanılarak sentezlenen silika aerogel toz malzemelerin SEM görüntüleri incelendiğinde, tozların çoğunlukla daha ince ve küçük boyutlarda oluştuğu tespit edilmiştir. Özellikle bazı bölgelerde tozlarda kümeleşme ile küçük toz boyutundan kaynaklı olarak irileşmelerin veya büyük toz boyutlarının sergilendiği görülebilmektedir. Toz şekil ve morfolojisi açısından değerlendirildiğinde, tozların düzensiz ve karmaşık şekil morfolojisinde yer aldığı belirlenmiştir. Ayrıca yüksek büyütmede elde edilen SEM görüntüsü incelendiğinde (Şekil 90-b), SEM görüntüsü üzerinde yer alan büyüklük veya skala dikkate alındığında (20µm), tozların büyük bir çoğunluğunun neredeyse 10µm altında olduğu söylenebilir. Bu da azalan parçacık boyutu ve şekli açısından, tozlarda yüzey alanı kaynaklı olarak da toz boyutunu bazı bölgelerde iri parçacık boyutunda gösterebilmektedir.

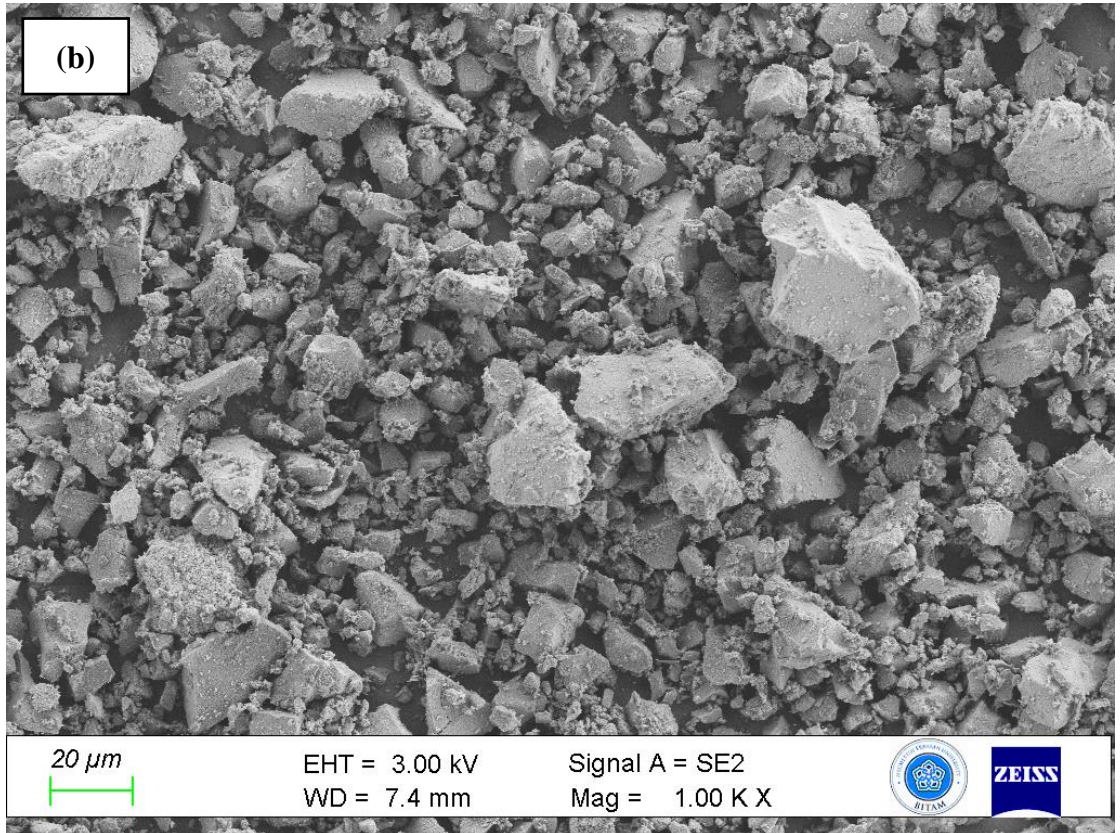
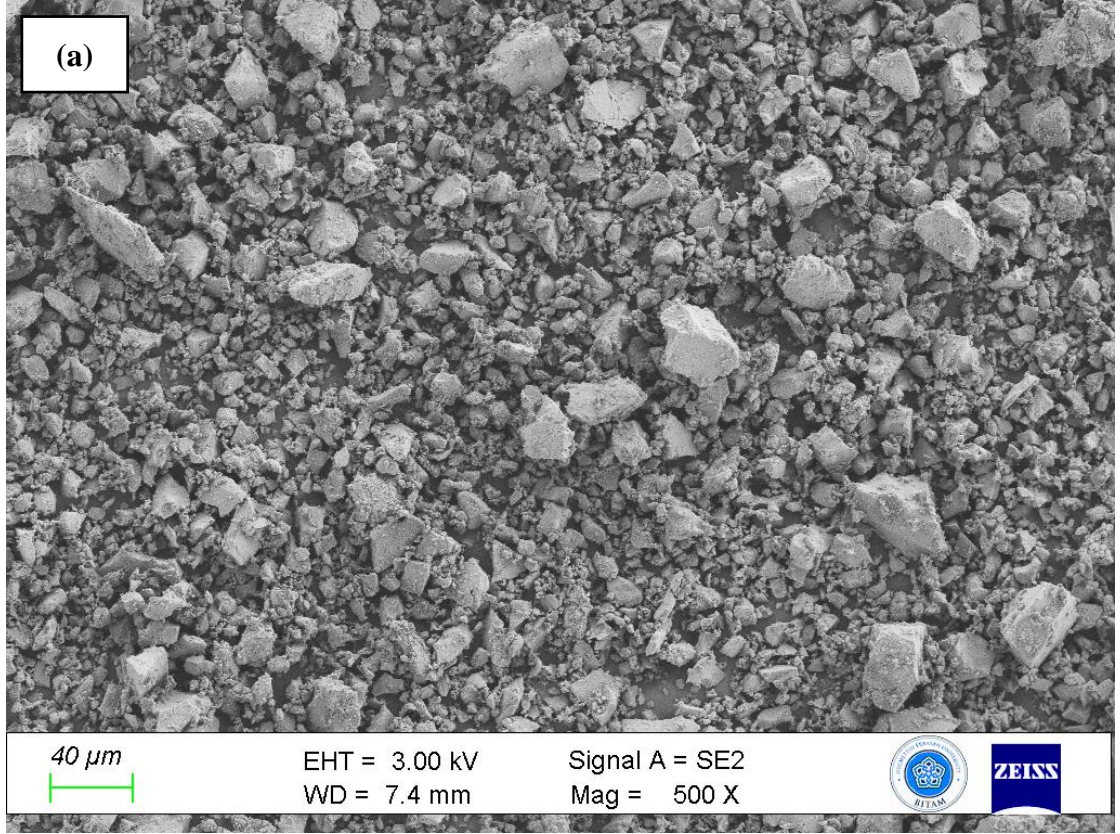
Şekil 92 ve 93' de verilen radyolarit ve kuvars başlangıç malzemesi kullanılarak sentezlenen aerojel toz malzemelerin SEM görüntüleri incelendiğinde, atık ve ticari döküm kumları içeriği sentezlenen toz malzemenin aksine, tozların nispeten daha iri boyutlarda olduğu görülebilmektedir. Bu durum özellikle radyolarit başlangıç malzemesi ile sentezlenen aerojel toz malzemedede daha çok belirgin olarak yer almaktadır. Bu anlamda radyolarit içerikli silika aerojel malzeme yüksek büyütmede elde edilen SEM görüntüsü incelendiğinde (Şekil 92-b) ve SEM ölçü skalası bakımından (20mµ) göz önüne alınırsa, neredeyse tek bir aerojel toz parçacığının yaklaşık 20mµ boyutunda yer aldığı belirtilebilir. Toz şekil ve morfolojisi açısından incelendiğinde, bu silika aerojel toz malzemelerin poligonal ve keskin köşeli toz şekil ve morfolojisine sahip olduğu tespit edilmiştir. Şekil 90 ve 91' de verilen ticari ve atık döküm kumu içeriği ile sentezlenen aerojel toz malzeme şekil ve morfolojisine nazaran kuvars ve radyolarit içerikli silika aerojel malzemedede düzensiz ve karmaşık şekil oluşumlarının yanı sıra daha keskin köşe ve poligonal oluşumların baskın olduğu tespit edilmiştir. Bu durumda şekil ve morfolojik açıdan ortaya çıkan farklılık, özellikle başlangıç toz malzeme üretim şartları, içeriğinden ve şeklinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Bu durum yapılan literatür çalışmaları incelendiğinde, farklı başlangıç malzeme (arıtma çamuru, feldspat vs.) ve proses parametrelerinin (TEOS vs.) sonucu olarak, aerojel toz şekil ve morfolojilerinin değişkenlik gösterebildiğini ortaya çıkarmaktadır (Yılmaz, 2013; Mermer, 2018).



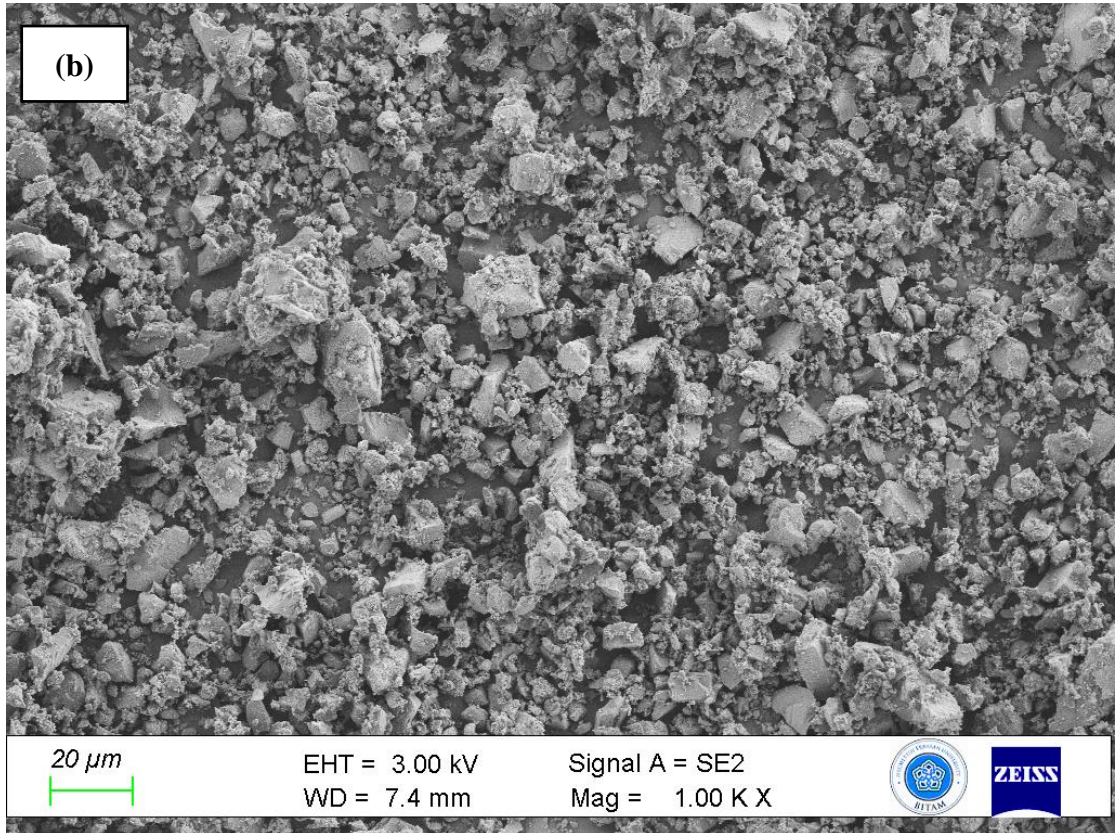
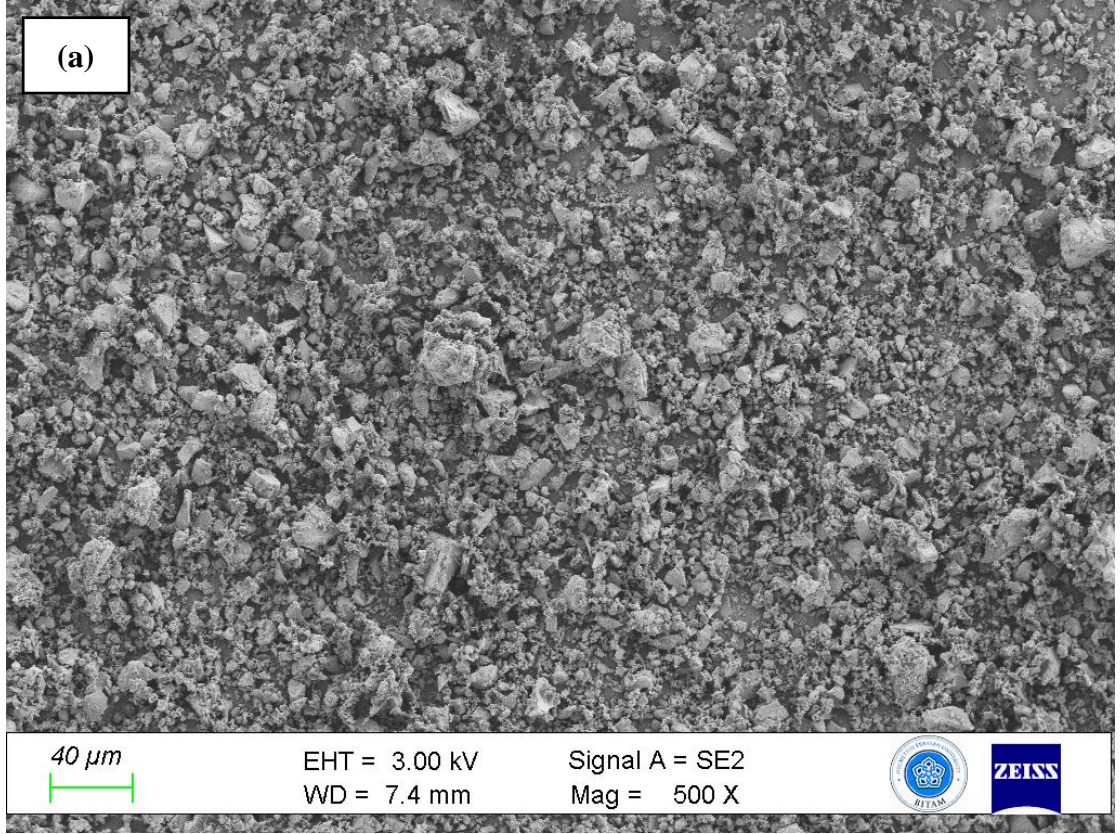
Şekil 90. Ticari döküm kumundan üretilen silika aerojele ait FE-SEM görüntüsü



Şekil 91. Atık Döküm kumundan üretilen silika aerojele ait FE-SEM görüntüsü



Şekil 92. Radyolaritten üretilen silika aerojele ait FE-SEM görüntüsü

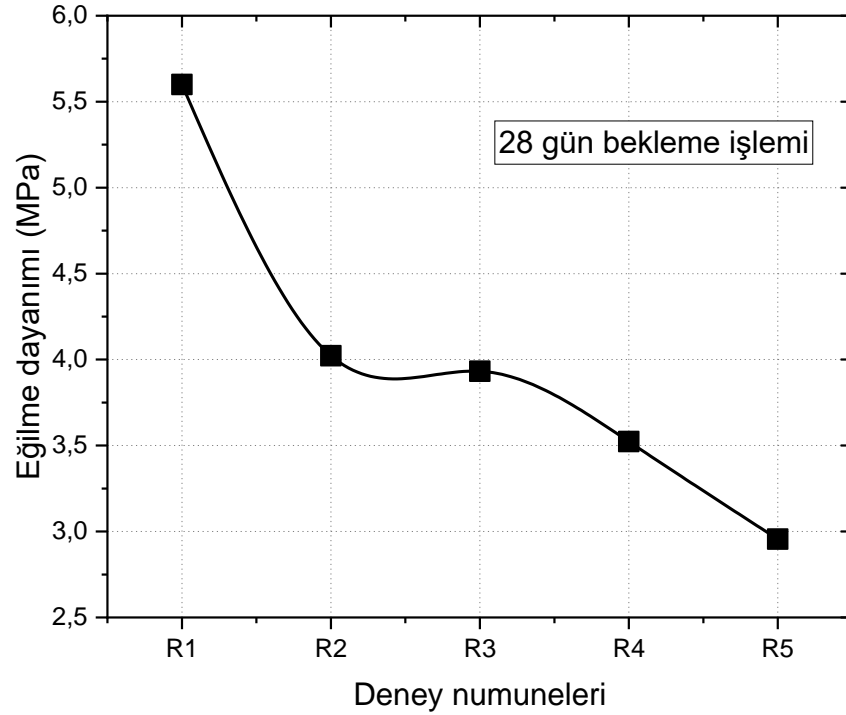


Şekil 93. Kuvarsdan üretilen silika aerojele ait FE-SEM görüntüsü

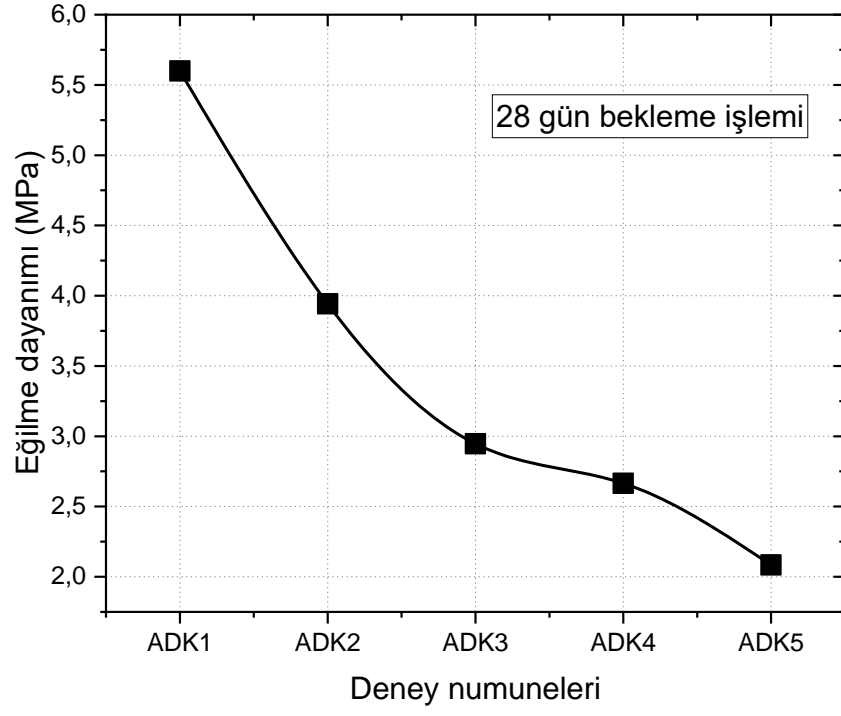
4.2. Mekanik Mukavemet Test Sonuçları

4.2.1. Üç Nokta Eğilme Analiz Sonuçları

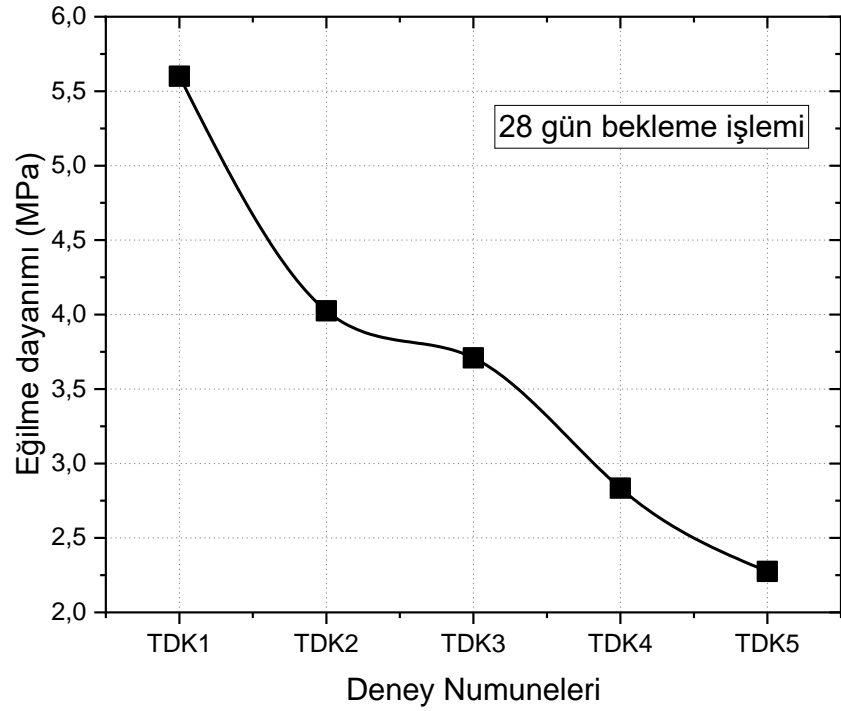
Deneysel çalışmalarda farklı başlangıç silika kaynakları kullanılmak suretiyle, sol-jel yöntemi kullanılarak sentezlenen silika arojel malzemesi mimarlık uygulamaları ve mekanik özelliklerin tayini açısından çalışmalar yapılmıştır. Bu kapsamda sentezlenen farklı takviye oranlarında (%0, %0.5, %1, %2, %5) silika arojel malzemesi kullanılarak hazırlanan alçı levhalarda malzeme dayanım değerleri sırasıyla üç nokta eğilme ve basınç dayanım deneyleri gerçekleştirilmiştir. Sentezlenen farklı silika arojel takviyesi ile hazırlanan alçı levhalara uygulanan üç nokta eğilme dayanım sonuçları sırasıyla Şekil 94-97 olmak üzere gösterilmiştir.



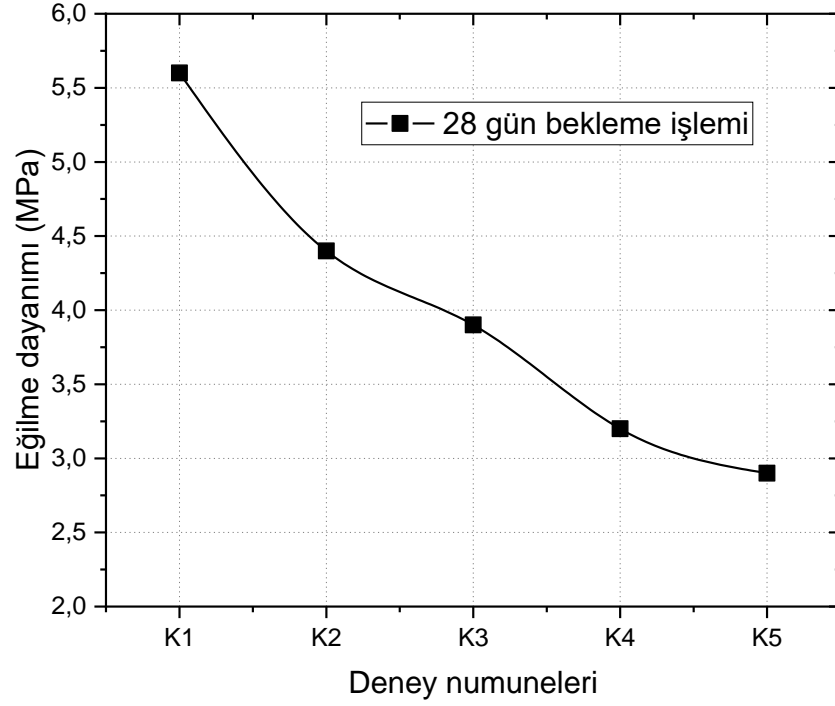
Şekil 94. Radyolaritten üretilen alçı levha numunesi eğilme dayanım sonucu



Şekil 95. Atık Döküm Kumundan üretilen alçı levha numunesi eğilme dayanım sonucu



Şekil 96. Ticari Döküm Kumundan üretilen alçı levha numunesi eğilme dayanım sonucu



Şekil 97. Kuvarsdan üretilen alçı levha numunesi eğilme dayanım sonucu

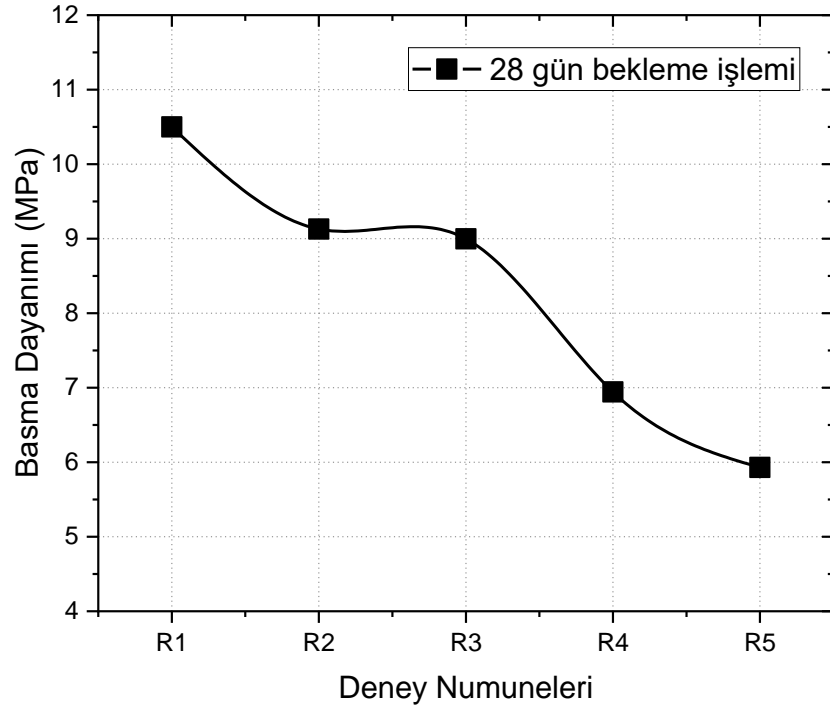
Sentezlenen silika aerojel malzemesine farklı takviye oranları ilave edilerek hazırlanan deney numunelerinde elde edilen üç nokta eğilme dayanım değerleri incelendiğinde (Şekil 94-97), takviye içeriği olmadan (R1-ADK1-TDK1-K1) hazırlanan alçı levha numunesine nazaran silika aerojel içeriğinin artışına bağlı olarak bütün deney numunelerinde dayanım değerlerinde azalma olduğu tespit edilmiştir. En yüksek dayanım değeri takviyesiz olarak hazırlanan alçı levha numunesinde 5,6 MPa olarak ölçülmüştür. Ancak artan silika aerojel içeriği ile hazırlanan alçı levha deney numunelerinde (R, ADK, TDK ve K) üç nokta eğilme dayanım değerleri azalma eğilimi sergilemesinin yanı sıra en düşük üç nokta eğilme dayanım değerleri sırasıyla 2,95 MPa, 2,08 MPa, 2,27 MPa ve 2,9 MPa (Şekil 94-97) olarak tespit edilmiştir. Silika aerojel içeriği ile çimento esaslı hazırlanan malzemelerin mekanik ve mikro yapı özelliklerinin üzerine yapılan bir çalışmada, benzer şekilde takviye silika aerojel içeriğinin artışına bağlı olarak üç nokta eğilme dayanım değerlerinde bir azalma olduğu ifade edilmiştir. Aynı zamanda düşük takviye içeriklerinde gerek mekanik

gerekse fiziksel özellikler açısından avantaj sağlanabileceği belirtilmiştir (Bostancı, 2021).

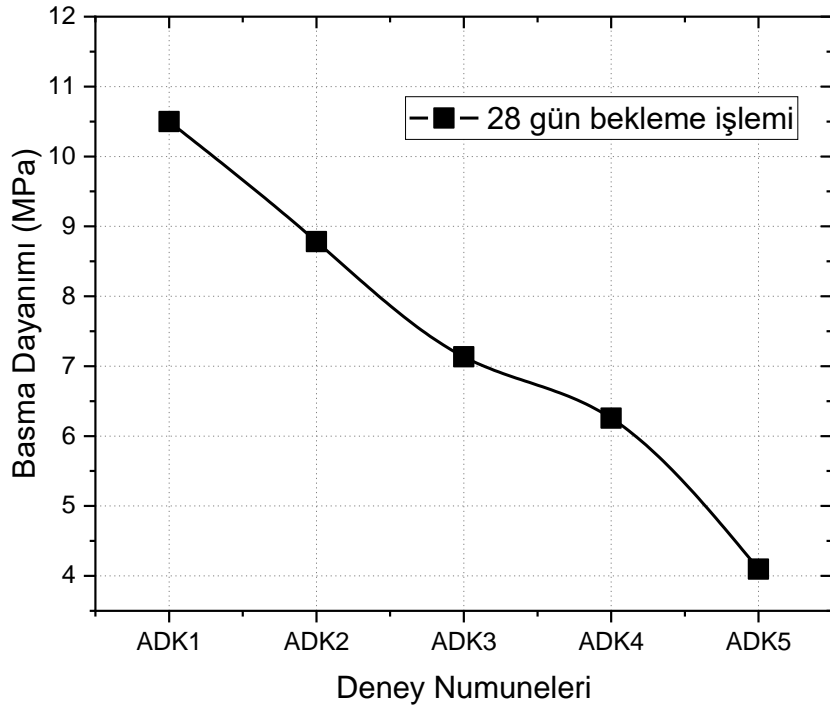
Takviyesiz deney numunelerine kıyasla diğer deney numunelerinde dayanım değeri açısından azalmadaki düşüşün sebebi olarak, alçı levha üretiminde takviye edilen silika aerojel miktarının artışının önemli bir etken olduğu belirtilebilir. Ayrıca bu durumun ortaya çıkması, artan aerojel miktarı ile alçı levha numunelerinde aerojel malzeme toz şekil ve morfolojisinden de kaynaklı olarak gözenek miktarının ana yapıda artış eğiliminde olması olarak da belirtilebilir. Bu da sentezlenen ve takviye olarak kullanılan silika aerojel malzemenin üretim şartları ve parametrelerinden kaynaklı olarak malzeme üç nokta eğilme dayanım değerlerini azaltıcı yönde bir davranış sergilediği olarak düşünülebilir. Aynı zamanda elde edilen üç nokta eğilme dayanım değerleri incelenirse, özellikle düşük takviye içeriklerin de daha yüksek bir dayanım değeri elde edildiği görülmektedir. Böylece aerojel katkısının yüksek miktarlarda olmasının yanı sıra daha düşük takviye oranlarında nispeten malzeme ve mimarlık uygulamalarında tercih edilebilirliği söz konusu olabilir.

4.2.2. Basınç Dayanımı Analiz Sonuçları

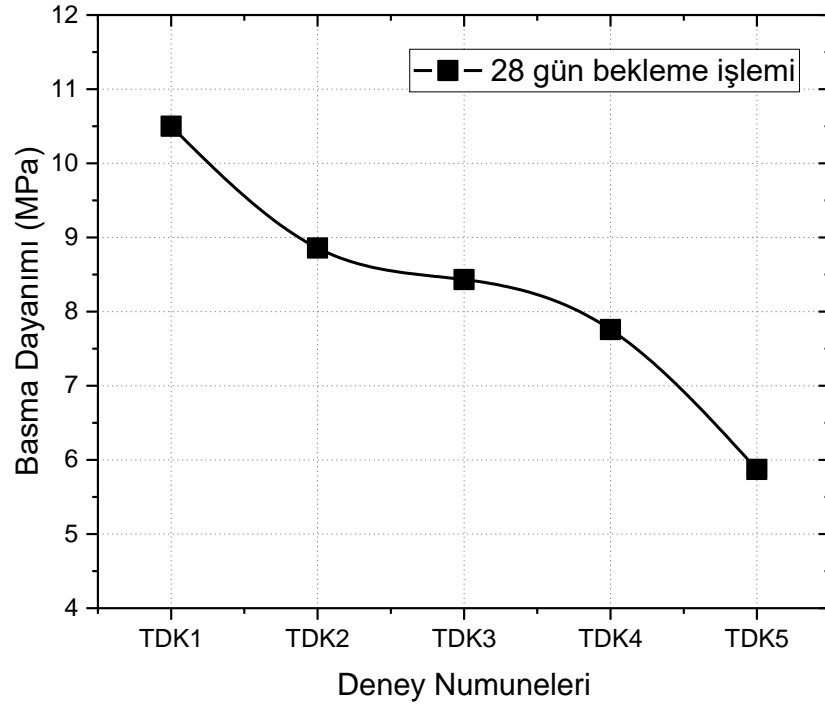
Sentezlenen farklı silika aerojel takviyesi ile hazırlanan alçı levha numunelerine uygulanan basınç dayanımı sonuçları sırasıyla Şekil 98-101 olmak üzere gösterilmiştir. Silika aerojel içeriği olmadan hazırlanan deney numunesine nazaran farklı aerojel takviye içeriği ile üretilen alçı levha numunelerinin 28 gün bekleme süresi sonucunda, basınç dayanımı değerlerinde azalma meydana geldiği görülmektedir (Şekil 98-101).



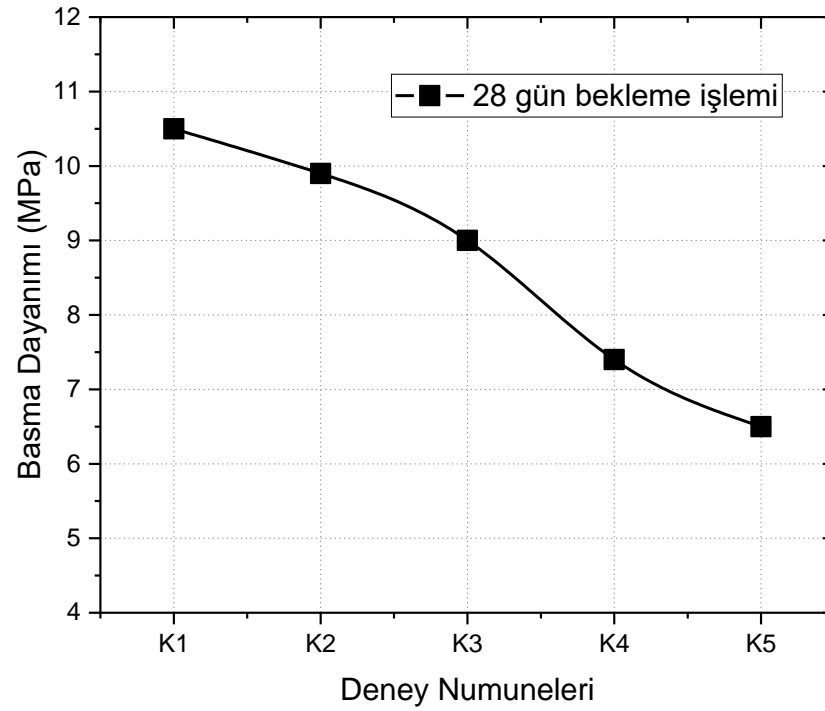
Şekil 98. Radyolaritten üretilen alçı levha numunesi basınç dayanımı sonucu



Şekil 99. Atık Döküm Kumundan üretilen alçı levha numunesi basınç dayanımı sonucu



Şekil 100. Ticari Döküm Kumundan üretilen alçı levha numunesi basınç dayanımı sonucu



Şekil 101. Kuvarsdan üretilen alçı levha numunesi basınç dayanımı sonucu

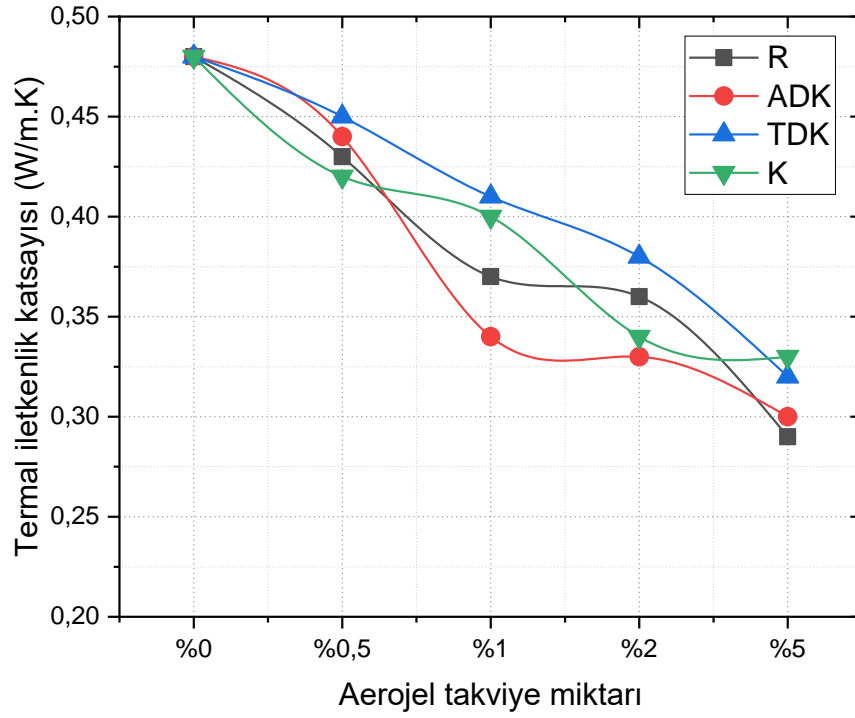
Deney numunelerine uygulanan basınç dayanımı değerleri incelendiğinde, en yüksek basınç dayanımı değeri 10,5 MPa olarak silika aerojel içeriği bulunmayan deney numunesinde ölçülmüştür. Bu durumun yanı sıra artan düşük miktarlarda silika aerojel içeriğine bağlı olarak (R, ADK, TDK ve K) basınç dayanımı değerleri azalma sergilerken, elde edilen en düşük basınç dayanım değerleri sırasıyla 5,93 MPa, 4,09 MPa, 5,87 MPa ve 6,5 MPa olarak ölçülmüştür. Silika aerojel katkılı benzer çalışmalarda, hazırlanan deney numuneleri açısından artan silika aerojel katkısının malzeme mekanik özelliklerini azalan bir eğilime dönüştürdüğü vurgulanırken düşük içeriği ile kullanılması sonrası mekanik ve termal malzeme performansı açısından olumlu etkisi ifade edilmektedir (Abbas vd., 2012; Strzałkowski ve Garbalinska, 2016).

Yapılan basınç dayanımı deneyleri aynı deney parametreleri ve benzer bekleme süresi (28 gün) altında üretilen numunelere uygulanırken, sadece farklı silika aerojel içeriklerinden kaynaklı olarak basınç dayanım değerlerinde düşüş meydana gelmiştir. Bu durum üç nokta eğilme dayanım sonuçlarında olduğu gibi basınç dayanım sonuçlarında da artan silika aerojel içeriği benzerlik göstermektedir. Benzer şartlar ve parametreler altında elde edilen sonuçlar açısından değerlendirme yapıldığında, azalan değerler dikkate alındığında silika arojelin alçı levha yapısında sergilediği gözenek yapısı ve dağılımları bu sonuçların ortaya çıkmasında önemli bir etken olduğu belirtilebilir.

4.3. Fiziksel Özellik Test Sonuçları

4.3.1. Termal İletkenlik Analiz Sonuçları

Yapılan tez çalışmasında sol-jel yöntemi kullanılarak sentezlenen silika aerojel malzemesi karakterizasyonu ve mekanik özelliklerin ötesinde mimarlık malzeme ve uygulamaları kapsamında, fiziksel özelliklerin çoğunlukla ön plana çıktığı bilinmektedir. Bu bağlamda sırasıyla termal iletkenlik ve su emme analiz uygulamaları gerçekleştirilmiştir. Farklı başlangıç malzeme kaynakları (Radyolarit, Atık döküm kumu, kuvars) kullanılarak takviyesiz ve düşük miktarlardaki farklı silika aerojel içerikleri ile üretilen deney numunelerinin termal iletkenlik katsayısı sonuçları Şekil 102' de gösterilmiştir.



Şekil 102. Deney numunelerinin termal iletkenlik katsayısı sonucu

Literatür çalışmaları değerlendirildiğinde, genellikle bu tarz mimari yapı malzemelerinin 0-1 W/mK değer olarak termal iletkenlik katsayısı sonucu sergilediği karşımıza çıkmaktadır (Buratti vd., 2014). Deney numunelerinin tamamında elde edilen termal iletkenlik katsayısı ölçüm aralığı incelendiğinde (Şekil 102), yaklaşık olarak 0.29-0.48W/mK aralığında ölçüldüğü ve literatür çalışmaları ile uyumlu ortaya çıktığı görülebilmektedir. Aynı zamanda yapılan benzer içerikli çalışmalardan elde edilen sonuçlar incelendiğinde; Buratti ve arkadaşları yaptıkları çalışmada farklı katkı oranlarında silika aerojel takviyeli sıvaların üretiminde artan takviye oranlarına bağlı olarak malzemelerin termal iletkenlik katsayı değerlerinin azaldığını tespit etmişlerdir. Aerojel içermeyen alçı numunesinin ise 0.50 W/mK termal iletkenlik katsayısına sahip olduğunu belirtmişlerdir (Buratti vd., 2014). Bu anlamda yapılan tez çalışmasında silika aerojel katkısı olmadan hazırlanan alçı levha malzemesinin termal iletkenlik katsayısı değeri de 0.48W/mK olarak benzer ölçülmüştür (Şekil 102).

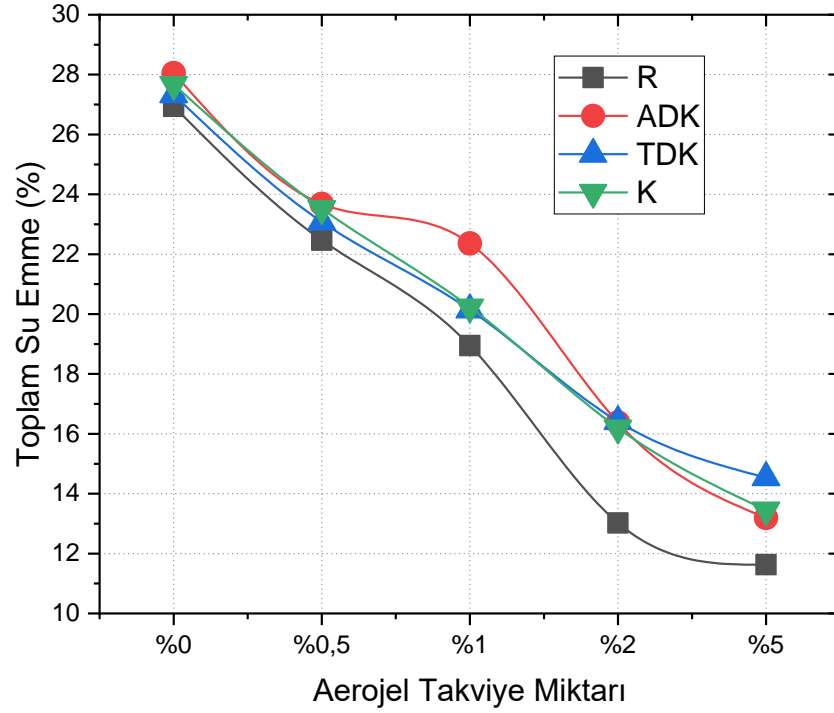
Silika aerojel katkısı ile hazırlanan deney numunelerinin Şekil 102’ de verilen termal iletkenlik katsayısı ölçüm sonuçları incelendiğinde, bütün farklı başlangıç malzeme kaynakları kullanımını neticesinde artan takviye silika aerojel içeriğine bağlı olarak termal

iletkenlik katsayı sonuçlarında net bir azalma olduğu tespit edilmiştir. Artan silika erojel takviye içeriği ile üretilen bütün deney numunelerinde termal iletkenlik katsayı değeri azalırken, en düşük termal iletkenlik katsayısı değeri 0.29 W/mK olarak tespit edilmiştir. Bu elde edilen değer, radyolarit kaynağından sentezlenen en yüksek takviye silika erojel içeriği ile üretilen numunede ortaya çıkmıştır. Aynı zamanda elde edilen yoğunluk sonuçları da dikkate alındığında, radyolarit malzemesi ile sentezlenen silika erojel malzemesi en düşük yoğunluk değerine sahip olduğu görülmektedir. Yine yapılan benzer içerikli çalışmalar incelendiğinde; Gao ve arkadaşlarının yapmış olduğu çalışmada hazırlanan deney numuneleri açısından artan erojel katkısının malzemede termal iletkenlik katsayısında bir azalma sergilediği tespit edilmişlerdir (Gao vd., 2014). Mermer ve Pişkin (2018) ultrason destekli sol-jel yöntemi ile kumdan erojel sentezi, karakterizasyonu ve termal yalıtım sıvası üretiminde değerlendirilmesi üzerine yaptığı çalışmada; düşük katkı oranlarında silika erojel takviyeli yalıtım sıvalarının termal iletkenlik ölçümü incelendiğinde artan erojel takviye içeriği ile deney numunelerinin termal iletkenlik katsayısı değeri azaldığı tespit edilmiştir. %10 oranında erojel takviyeli numunenin takviyesiz numuneye oranla %26,05 daha iyileştirilmiş yalıtım özelliğine sahip olduğu belirtilmektedir.

Artan silika erojel içerikleri ile katkısız olarak hazırlanan malzemeye kıyasla üretilen bütün deney numunelerinde azalan termal iletkenlik katsayısı sonucu, silika erojel malzeme kullanımının etkinliğini ve verimliliğini ortaya koymaktadır. Çünkü bilindiği üzere silika erojel parçacıkları üstün ısı yalıtım özellikleri sergilemektedir. Böylelikle elde edilen termal iletkenlik deney verileri göz önünde bulundurulduğunda (Şekil 102), artan silika erojel içeriklerinin deney numunelerinde olumlu katkısı olduğu ve malzeme termal iletkenlik performansında özellikle de mimarlık uygulaması açısından avantaj sağlayacağı göz önünde bulundurulabilir.

4.3.2. Su Emme Analiz Sonuçları

Farklı başlangıç malzeme kaynakları (Radyolarit, atık döküm kumu, ticari döküm kumu, kuvars) kullanılarak takviyesiz ve düşük miktarlardaki farklı silika erojel içerikleri ile üretilen deney numunelerinin su emme analiz sonuçları Şekil 103' de gösterilmiştir.



Şekil 103. Deney numunelerinin su emme analizi sonucu

Silika aerojel içeriği olmadan hazırlanan deney numunesine kıyasla farklı silika aerojel takviye içeriği ile üretilen alçı levha numunelerinin 28 gün bekleme süresi sonucunda, su emme değerlerinde azalma meydana geldiği görülmektedir (Şekil 103). Başlangıçta silika aerojel içeriği bulunmayan alçı levha deney numunelerinin (R, ADK, TDK ve K) toplam su emme yüzde oranları sırasıyla %26.94, %28.05, %27.33 ve %27.67 olarak belirlenmiştir. Ancak silika aerojel içeriği olmayan deney numunelerine kıyasla artan silika aerojel içeriğine bağlı olarak hazırlanan deney numunelerinde özellikle en yüksek silika aerojel içerikli deney numunelerinde (%11.63, %13.19, %14.54 ve %13.45) toplam su emme yüzdelerinde azalma olduğu tespit edilmiştir. Yapılan literatür araştırmaları neticesinde silika aerojel içerikli ve özellikle su emme analiz sonuçlarının yer aldığı deney sonuçlarına rastlanılmamıştır. Ancak su emme analiz çalışmaları açısından Gökçe ve Akçaözoğlu, diyotomit esaslı alçı katkılı hafif yapı elemanı üretimi üzerine yaptıkları çalışmada hazırladıkları karışımdaki alçı miktarı arttıkça numunelerin su emme oranlarının azaldığını ifade etmişlerdir (Gökçe ve Akçaözoğlu, 2017).

Koçak (2010) tarafından yapılan çalışmada ise, bor atığının alçı levha üretiminde kullanımı odaklı ve su emme analiz çalışmalarına yer verilmiştir. 1 kg alçıya ilave

edilen 0-0.6 g değişken oranlarında bor atığının, malzeme mukavemet değerlerini iyileştirirken toplam su emme yüzde değerlerinde azalma meydana getirdiğini vurgulamıştır. Yapılan çalışmalardan da anlaşılacağı üzere, gerçekleştirilen tez çalışması kapsamında kullanılan silika arojelinde, artan miktarına bağlı olarak toplam su emme yüzde değerlerinde azalma sergilediğı görülebilmektedir. Alçı esaslı ve diğer çalışma içeriklerinde de görüldüğü üzere, ilave olarak kullanılan katkı malzemelerinin toplam su emme yüzde değerlerine olumlu yönde katkı sağladığı düşünülebilir. Özellikle yapılan bu çalışmada, sentezlenen silika arojel malzemesinin süperhidrofobik özellik sergilediğı tespit edilmiştir. Böylece bu malzemenin alçı levha deney numunesi bünyesinde yer alması ve suyu iten özellik göstermesi, elde edilen toplam su emme yüzde değerlerinin azalmasında etkili olduğu belirtilebilir. Bu durumda suyun bir dış etken, malzeme davranışı üzerine çevre etkisi veya su ve nemin nüfuziyeti düşünüldüğünde, mimarlık malzeme uygulamalarında kullanılan süperhidrofobik silika arojellerin kullanımı açısından avantaj oluşturmaktadır.

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Malzeme insanların gereksinimlerini karşılamak ve bir amaç doğrultusunda ürün elde etmek için kullanılan her maddeye denir. Tasarım kavramı malzeme ile bir bütündür. Mimari yapıların tasarımlarında kullanılan yapı malzemeleri binalar için önemli bir bileşendir. Yapı malzemeleri tercih edilirken çevreyle uyumlu, insan sağlığına zarar vermeyen, daha az enerji gerektiren, kolay uygulanabilen malzemeler kullanılmaktadır. Bu özellikleri ile yapı endüstrisinde çok tercih edilen alçı levha yapı malzemeleri, binalarda birçok uygulama alanına sahip geleneksel malzemelerdir. Teknolojik gelişmeler malzeme bilimindeki ilerlemeler doğrultusunda istenilen özellikteki yeni yapı malzemeleri üretiminin sağlanması ile mimarlığın ve iç mimarlığın kabuk değiştirdiği gözlenmektedir. Bu değişimle birlikte geleneksel malzemelerin dışında, akıllı teknolojiler ile istenilen özellikte malzeme üretimi sağlanabilmiş yapı malzeme çeşitleri artmış ve yapılarda kullanılabilmiştir.

Diğer taraftan ülkemizde artan nüfus ile birlikte binalarda enerji tüketiminin giderek artmakta enerji verimliliği ve enerji tasarrufu konusu daha da önemli hale gelmektedir. Enerji tasarrufu konusu mimari yapılarda ısı yalıtımı uygulamaları gündeme getirmektedir. Isı muhafazası sağlama konusunda üstün yalıtım özelliği ile silika arojel malzemeler ilgi çekici gözenekli malzemeler arasında yer almaktadır. Bu nedenle silika arojel malzemelerin gün geçtikçe önemi ve tercih sebepleri artmaktadır. Mimari yapılarda ısı muhafazasının sağlanması düşüncesi, binaların hem tasarım ve yapım aşamasında hem de yeniden yapılanmış binaların yenileme çalışmalarında, yüksek performanslı teknolojik yapı malzemeleri aracılığıyla gerçekleştirilmesi yenilikçi bir uygulama olarak ortaya çıkmaktadır. Nitekim ileri teknoloji ürünü olarak silika arojellerin üretilebilirliği ve kullanımının yaygınlaşması, bilimsel ve teknolojik alanlarda ülkemizin gelişimi ve ilerleyişi açısından oldukça önemlidir. Bu sebeple tez çalışmasında; Konya ve çevresinden temin edilen yüksek silisyum içeriğine sahip silika kaynakları (döküm kumu, kuvars, radyolarit) ve atık malzemelerin yeniden ekonomik değeri olan faydalı ürünlere dönüştürülebilmesi için atık döküm kumundan, sol-jel yöntemi ile farklı parametrelerle silika arojellerin üretilebilirliği araştırılmıştır. Silika arojel sentezleme çalışmaları yapılırken üretim parametrelerinden özellikle pH'ın etkisi üzerine odaklanılmıştır. Deneysel çalışmaların devamında farklı takviye oranlarında

(%0, %0.5, %1, %2, %5) elde edilen süperhidrofobik silika aerogel katkılı alçı levha numunelerinin üretimi sonucu, süperhidrofobik silika aerogelin alçı levha numunelerinin mekanik ve fiziksel özellikleri üzerindeki etkisi değerlendirilmiştir.

Tez çalışmasında geleneksel bir malzeme olan alçı levha ile teknolojik ve yenilikçi bir malzeme olan silika aerogeller tek bir malzemede bir araya getirilerek hafif, üstün termal performansa sahip, suyu ve nemi bünyesinden iten (süperhidrofobik), mekanik özellikleri tatmin edici yeni nesil silika aerogel esaslı alçı levha üretimi başarılı bir şekilde gerçekleştirilmiştir. Binalarda ısıtma amaçlı enerji tüketiminin azaltılmasının önemli olması nedeniyle, tek bir malzemeye birden fazla özellik kazandırılarak yapı elemanlarının kalınlığını arttırmadan en az alanda maksimum performans sağlayan aynı zamanda enerji verimliliği yüksek, ısı geçişine karşı direnç gösteren, termal iletkenlik kat sayısı düşük silika aerogel katkılı alçı levha yapı malzemesi üretilmeye çalışılmıştır. Aynı zamanda tez çalışmasında düşük katkı oranlarında süperhidrofobik silika aerogel ilavesinin kullanılması, üretilen yeni nesil alçı levha yapı malzemelerini yüksek verimli ve ekonomik ürün haline getirmiştir.

Yapılan deneysel çalışmalar sonrasında elde edilen sonuçlar, aşağıda sırasıyla gösterilmiştir:

- ✓ Farklı başlangıç malzemelerine (ticari döküm kumu, atık döküm kumu, radyolarit ve kuvars) uygulanan XRF analizi sonucunda litertür ile uyumlu ticari döküm kumunda %97,8 oranında silisyum içeriği, atık döküm kumunda %70,4 oranında silisyum içeriği, radyolaritde %94,50 oranında silisyum içeriği, kuvarsda %99,80 oranında silisyum içeriği tespit edilmiştir.
- ✓ Farklı başlangıç malzemeleri sonrasında sentezlenen silika aerogelin XRD analizi sonucunda ortaya çıkan en yüksek/ana pik şiddetinin SiO₂ yapısını 2 θ = 27° mesafesinde ve amorf yapıda olduğu tespit edilmiştir.
- ✓ Dört farklı başlangıç malzemelerinden (ticari döküm kumu, atık döküm kumu, radyolarit ve kuvars) elden edilen sıvı sodyum silikat çözeltilerine uygulanan

ICP-OES analizi sonucunda ticari döküm kumunun NaOH ile reaksiyonu sonucu oluşan sodyum silikat çözeltisinin SiO₂ konsantrasyonu %14,04, atık döküm kumunun SiO₂ konsantrasyonu % 7,07, radyolaritin SiO₂ konsantrasyonu % 9,72, kuvarsın SiO₂ konsantrasyonu % 10,98 olarak tespit edilmiştir.

- ✓ Ticari döküm kumu, atık döküm kumu, radyolarit, kuvars için pH'nin etkisi 2, 4, 6, 8, 9 pH değerlerinde incelenerek sentezlenen numunelerin yoğunlukları ölçülmüştür. En düşük yoğunluk değerleri olarak TDK-pH-8 numunesinin 0.590 g/cm³, ADK-pH-8 numunesinin 0.390 g/cm³, R-pH-6 numunesinin 0.340 g/cm³ ve K-pH-6 numunesinin yoğunluk değeri 0.500 g/cm³ olarak elde edilmiştir.
- ✓ Modifiye işlemi uygulanmamış hidrofilik silika aerjel numunelerinin tamamında 4000-400 cm⁻¹ aralığının da gerçekleştirilen FT-IR analizi sonrasında, O-H, Si-O-Si ve C-H aralarındaki bağlanmalarının olduğu belirlenmiştir.
- ✓ 3400 cm⁻¹ ve 1600cm⁻¹ dalga boylarında O-H piklerinin, 1050-1060 cm⁻¹ ve 450-455 cm⁻¹ dalga boylu aralığında ise Si-O-Si piklerinin, 790 cm⁻¹ dalga boyunda da Si-O-Si absorpsiyon piklerinin, O-H ve Si-O-Si absorpsiyon bantlarının yanısıra 2950 cm⁻¹ dalga boyunda C-H bağına karşılık gelen absorpsiyon pik zirvesi tespit edilmiştir.
- ✓ Modifiye işlemi uygulanmış süperhidrofobik silika aerjel numunelerinin 4000-400 cm⁻¹ aralığında gerçekleştirilen FT-IR analizi sonrasında ise, 960cm⁻¹ dolaylarında Si-CH₃ grubundan, 800-850 cm⁻¹, 750-790 cm⁻¹ civarında TMCS'nin yapıya bağlanması sonrası ortaya çıkan Si-C absorpsiyon bantları gözlemlenmiştir.
- ✓ Yüzey modifikasyonu sonrasında deney numunelerinin düşük yoğunlukta olduğu ve özellikle radyolarit malzemesi ile sentezlenen silika aerjel malzemesinde diğer başlangıç malzeme içerikli silika aerjellerle kıyasla BET yüzey alanı 311,161 m²/g en yüksek olarak elde edilmiştir.

- ✓ Süperhidrofobik özellik kazandırılan silika arojel numunelerinin hidrofilik, hidrofobik veya süperhidrofobik derecelerinin belirlenebilmesi için temas açısı ölçümleri sonrası, bütün silika arojel malzemelerde 150° den büyük ve dolayısıyla süperhidrofobik olarak ölçülmüştür.
- ✓ FE-SEM mikroyapı incelemelerinde, farklı başlangıç silika içerikleri ile üretilen arojel toz malzemelerin neredeyse hepsinde çoğunlukla düzensiz ve karmaşık şekil morfolojisinde yer aldığı belirlenmiştir.
- ✓ Silika arojel tozların büyük bir çoğunluğunun neredeyse 10µm altında olduğu ve buna bağlı olarak azalan parçacık boyutu ve şekli açısından, tozlarda yüzey alanı kaynaklı olarak da toz boyutunu bazı bölgelerde iri parçacık boyutunda yer aldığı belirlenmiştir.
- ✓ Üç nokta eğilme analiz sonuçları incelemelerinde; farklı takviye oranlarında (%0, %0.5, %1, %2, %5) silika arojel malzemesi kullanılarak hazırlanan alçı levhalarda en yüksek dayanım değeri takviyesiz malzemelerde 5,6 MPa olarak ölçülmüştür.
- ✓ %0, %0.5, %1, %2, %5 takviye arojel oranları ile hazırlanan alçı levhalarda, takviye oranının artışı ile birlikte üç nokta eğilme dayanım değerlerinde azalma olduğu tespit edilmiştir.
- ✓ Hazırlanan alçı levha deney numunelerinde (R, ADK, TDK ve K) üç nokta eğilme dayanım değerleri azalma eğilimi sergilemesinin yanı sıra en düşük üç nokta eğilme dayanım değerleri sırasıyla 2,95 MPa, 2,08 MPa, 2,27 MPa ve 2,9 MPa tespit edilmiştir.
- ✓ Silika arojel içeriği olmadan hazırlanan deney numunesine nazaran farklı arojel takviye içeriği ile üretilen alçı levha numunelerinin basınç dayanımı

sonuçlarına göre, en yüksek basınç dayanım değeri 10,5 MPa olarak silika aerojel içeriği bulunmayan deney numunesinde ölçülmüştür.

- ✓ Artan düşük miktarlarda (%0, %0.5, %1, %2, %5) silika aerojel içeriğine bağlı olarak (R, ADK, TDK ve K) basınç dayanımı değerleri azalma sergilerken, elde edilen en düşük basınç dayanım değerleri sırasıyla 5,93 MPa, 4,09 MPa, 5,87 MPa ve 6,5 MPa olarak ölçülmüştür.
- ✓ Deney numunelerinin tamamında elde edilen termal iletkenlik katsayısı ölçüm aralığı incelendiğinde, yaklaşık olarak 0.29-0.48 W/mK aralığında sonuç elde edilmiştir.
- ✓ Artan aerojel takviye içeriği ile üretilen bütün deney numunelerinde termal iletkenlik katsayı değeri azalırken, en düşük termal iletkenlik katsayısı değeri 0.29 W/mK olarak tespit edilmiştir.
- ✓ Silika aerojel içerikli alçı levha uygulamaları açısından, düşük katkı oranlarında ilave edilen silika aerojel, deney numuneleri termal yalıtkanlık performansı üzerinde olumlu bir etkiye dönüşmüştür.
- ✓ Takviyesiz ve düşük miktarlardaki farklı silika aerojel içerikleri ile üretilen deney numunelerinin su emme analiz sonuçlarına göre, özellikle takviyesiz hazırlanan deney numunesine kıyasla toplam su emme yüzdelerinde azalma olduğu tespit edilmiştir.
- ✓ Artan silika aerojel içeriğine bağlı olarak hazırlanan deney numunelerinde özellikle en yüksek aerojel içerikli (%5) deney numunelerinde (%11.63, %13.19, %14.54 ve %13.45) toplam su emme yüzdelerinde azalma olduğu tespit edilmiştir.

Yapılan deneysel çalışmaların akabinde ortaya çıkan bulgulara ve ileride yapılabilecek çalışmalara öncülük etmesi kapsamında aşağıdaki öneriler sıralanabilir;

- ✓ Sol-jel yöntemi ile silika arojel sentezleme çalışmalarında, farklı üretim parametreleri ve kimyasallar kullanılarak sentezleme çalışmalarına yön verilebilir.
- ✓ Farklı silika içerikli başlangıç malzemeleri kullanılarak sentezleme ve karakterizasyon çalışmaları yapılabilir.
- ✓ Özellikle atık malzemelerin geri dönüşümü sağlanarak ekonomik değeri olan faydalı ve üstün özellikli girdilere dönüştürülebilmesi için farklı atık malzemeler silika arojel sentez çalışmalarında kullanılabilir.
- ✓ Farklı üretim parametreleri ile sentezlenen silika arojel malzemeleri ile farklı fiziksel ve mekanik özellikte alçı levha numuneleri hazırlanabilir.
- ✓ Silika arojel katkılı alçı levha numunelerinin akustik performans özellikleri ile ilgili çalışmalar yapılabilir.
- ✓ Silika arojel farklı yapı malzemeleri ile karıştırılarak malzeme, mikro yapı, mekanik ve fiziksel özellikleri değerlendirilebilir.
- ✓ Süperhidrofobik silika arojel toz malzemesi alçı ve cam elyaf ile bir bünyede buluşturularak kompozit malzeme çalışmaları yapılabilir.

Bu tez çalışmasının laboratuvar ölçeğinde üretim çalışmalarının yanı sıra ticari olarak silika arojel üretimi ve uygulamaları üzerine çalışmalara katkı sağlayacağı düşünülmektedir. Ayrıca mimarlık ve iç mimarlık alanında bina zarflarına (iç-dış

taşıyıcı olmayan duvar, tavan) akıllı ve teknolojik silika arojel malzemesinin alçı levha malzemesi ile birleştirilip yapı bileşeni olarak binaya entegre edilmesiyle sağlanan termal performans, gelecekte termal yalıtım davranışı geliştirilmiş silika arojel katkı alçı levha yapı malzemelerinin üretimi için yenilikçi bir tasarım fikrine veri oluşturulacağı düşünülmektedir.

Bu tez çalışmasında doğal ve atık kaynaklardan silika arojel sentezlenerek elde edilen süperhidrofobik silika arojel takviyeli alçı levha yapı malzemelerinin minimum kalınlıkta ve mümkün olan en az alanda yüksek ısı ve su (nem) yalıtımı konusunda performans sağlaması ve mimari yapılarda ısı ve su (nem) yalıtımı konusuna ilişkin çözüm önerileri sunması bakımından deneysel çalışmalar kapsamında elde edilen sonuçlar, diğer bilimsel çalışmalara veri-seti veya referans düzlemi oluşturması öngörülmüştür.

KAYNAKLAR

- 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.
- Achard, P., Arnaud, R., Echantillac, T., Bellet, A., Aulagnier, M., Daubresse, A. (2011). Insulating silica xerogel plaster. Patent.
- Adamczyk, J., Dylewski, R. (2017). The impact of thermal insulation investments on sustainability in the construction sector. *Renewable Sustainable Energy Reviews*, 80, 421-429.
- Aegerter, M. A., Leventis, N., Koebel, M. M. (2011). *Aerogels Handbook*. Springer, Science and Business Media.
- Agliata, R., Marino, A., Mollo, L., Pariso, P. (2020). Historic Building Energy Audit and Retrofit Simulation with Hemp-Lime Plaster. A Case Study. *Sustainability*, 12(11), 4620.
- Ahmad, D., Boogaert, I.V.D., Miller, J., Presswell, R., Jouhara, H. (2018). Hydrophilic and Hydrophobic materials and their applications. *Energy Sources*, 40, 2686-2725.
- Alharbi, A. R., Alarifi, I. M., Khan, W. S., Asmatulu, R. (2016). Highly hydrophilic electrospun polyacrylonitrile / polyvinylpyrrolidone nanofibers incorporated with gentamicin as filter medium for dam water and wastewater treatment. *Journal Membrane Separation Technological*, 5, 38-56.
- Alie, C., Pirard, R., Pirard, J. P. (2002). The role of the main silica precursor and the additive in the preparation of low-density xerogels. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 311, 304-313.
- Alptekin, H. (2015). Investigation of tunable wetting properties of modified natural mineral powders. İzmir Katip Çelebi University. Graduate School of Natural and Applied Sciences. Master Thesis. İzmir.
- Alptekin, H., Arkan, E., Özbek, C., Can, M., Farzaneh, A., Sütçü, M., Okur, S., Cobley, A. J. (2019). Water affinity guided tunable superhydrophobicity and optimized wettability of

- selected natural minerals. *Journal of Coatings Technology and Research* volume, 16, 199–211.
- Altın, M. (2014). Sürdürülebilir Yapılarda Aerojel Kullanımı. *Yalıtım Dergisi*, (123).
- Altun, D. (2007). Geleceğin Mimarlığı: Bilimsel-Teknolojik Değişimlerin Mimarlığa Etkileri. *DEÜ Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik*, 9(1), 77-91.
- Alnaief, M. & Smirnova, I. (2010). Effect of surface functionalization of silica aerogel on their adsorptive and release properties. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 356, 1644-1649.
- Al-Ajlan, S. A. (2006). Measurements of thermal properties of insulation materials by using transient plane source technique. *Applied thermal engineering*, 26(17-18), 2184- 2191.
- Al Zaidi, I. K. A. (2017). Nano SiO₂ – Aerojel Katkılı Süper Isıl Yalıtım Özelliğine Sahip Beton Blok Üretimi. Yüksek Lisans Tezi, Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri.
- Anderson, A. M. & Carroll, M. K. (2011). Hydrophobic Silica Aerogels: Review of Synthesis, Properties and Applications: *Aerogel Handbook, Advances in sol-gel derived materials and technologies* (M.A. Aegerter et al., Ed). Springer, 47-77.
- Arslan, M. A. ve AKTAŞ, M. (2018). İnşaat Sektöründe Kullanılan Yalıtım Malzemelerinin Isı ve Ses Yalıtımı Açısından Değerlendirilmesi. *Politeknik Dergisi*, 21(2), 299-320.
- Aydın, Ş. B., Oğuz, C. N., Gül, A. (2021). Düşük kalite kuvars kumlarının flotasyon ve oksalik asit liçi ile zenginleştirilmesi. *Madencilik*, 60(1), 7-20.
- Ayers, M. R. & Hunt, A. J. (1998). Molecular oxygen sensors based on photoluminescent silica aerogels. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 225, 343-347.
- Balkabak, D. (2009). Karbon Aerojel Üretimi ve Karakterizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Baetens, R., Jelle, B.P., Thue, J.V., Tenpierik, M.J., Grynning, S., Uvslokk, S., Gustavsen, A. (2010). Vacuum Insulation Panels for Building Applications: A Review and Beyond. *Energy and Buildings*, 42, 147-172.
- Baetens, R., Jelle, B.P. ve Gustavsen, A. (2011). Aerogel Insulation for Building Applications: A State-of-the-Art Review. *Energy and Buildings*, 43, 761–769.

- Baktır, S. (2006). Yapı Malzemelerindeki Teknolojik Gelişmelerin Mimari Biçimlenmeye Etkileri. Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Ankara.
- Barbero S., Marco D., Ferrua C., and Pereno A. (2014). Analysis on existent thermal insulating plasters towards innovative applications: Evaluation methodology for a real cost-performance comparison. *Energy and Buildings*, 77, 40-47.
- Bayrakçı, H. C., DAVRAZ, M., Başpınar, E. (2011). Yeni Nesil Isı Yalıtım Malzemesi: Vakum Yalıtım Paneli. *SDU Teknik Bilimleri Dergisi*, 1(2), 1-12.
- Bechthold, M. & Weaver, J. C. (2017). Materials Science and Architecture. *Nature Reviews Materials*, 2, 1-20.
- Berardi, U. (2015). Development of glazing systems with silica aerogel. *Energy Procedia*, 78, 394-399.
- Berardi, U. (2017). The benefits of using aerogel-enhanced systems in building retrofits. *Energy Procedia*, 134, 626-635.
- Berardi U. ve Nosrati R. H. (2018). Long-term thermal conductivity of aerogel-enhanced insulating materials under different laboratory aging conditions. *Energy*, 147, 1188-1202.
- Berardi, U. (2019). Aerogel-enhanced insulation for building applications (2. Bs). In: *Nanotechnology in Eco-efficient Construction. Materials, Processes and Applications. Woodhead Publishing Series in Civil and Structural Engineering*, 395-416.
- Bhagat, S. D., Kim, Y. H., Suh, K. H., Ahn, Y. S. Yeo, J. G., Han, J. H. (2008). Superhydrophobic silica aerogel powders with simultaneous surface modification, solvent exchange and sodium ion removal from hydrogels. *Microporous and Mesoporous Materials*, 112, 504-509.
- Bostancı, L. (2020). Silika Aerojel katkılı Alkali-Aktive Edilmiş Uçucu Kül Harçlarının Mekanik, Por Yapısı ve Mikro Yapı Özellikleri. *BSEU Journal of Science*, 7(2), 588-608.
- Bostancı, L., (2021). Silika Aerojel Katkılı Hibrit Silis Dumanı Harçlarının Mekanik, Por Yapısı, Termal İletkenlik ve Mikro Yapı Özellikleri. *DÜMF Mühendislik Dergisi*, 12(1), 147-163.

- Bostancı, L., Ustundag, O., Sola, O. C., Uysal, M. (2019). Effect of various curing methods and addition of silica aerogel on mortar properties. *Gradevinar* 71(8), 651-661.
- Bostancı, L. (2017). Alkali aktive edilmiş cüruf harcının mekanik ve durabilite özellikleri üzerinde aerogel katkısının etkisi. Doktora Tezi, İstanbul Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Brown J., R. (2000). *Foseco Ferrous Foundryman's Handbook*. Chapter 14- Sodium silicate bonded sand, Cilt 11, 204-215.
- Buğdaycı, İ. (2008). Dünyanın En İyi Katısı Aerogel, *Bilim ve Teknik Dergisi*.
- Buratti, C., Moretti, E., Belloni, E., Agosti, F. (2014). Development of Innovative Aerogel Based Plasters: Preliminary Thermal and Acoustic Performance Evaluation. *Sustainability*, 6(9), 5839-5852.
- Buratti, C., Moretti, E., Belloni, E. (2016). Aerogel plasters for energy building efficiency: Nano and Biotech Based Materials for Energy Building Efficiency (Pacheco, vd., Ed.). Springer International Publishing, 17-40.
- Calisesi, M. (2017). Aerogel Incorporated Plasters and Mortars: the case study of precast panels. Tesi di laurea in. Alma Mater Studiorum Università Di Bologna, İtalya.
- Chandradass, J., Kang, S., Bae, D. S. (2008). Synthesis of silica aerogel blanket by ambient drying method using water glass based precursor and glass wool modified by alumina sol. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 354(34), 4115-4119.
- Çakmak, A. (2021). Yapı malzemesinin tarihsel gelişimi ve mimarlığa etkileri. *ATA Planlama ve Tasarım Dergisi*, 5(1), 41-54.
- Çelik, M. H., Orhan, M., Uğurlu, A. H. (2005). Bölme Duvar Amaçlı Alçı Panellerin Bazı Özelliklerinin Deneysel Olarak Belirlenmesi. *Politeknik Dergisi*, 8(3), 301-309.
- Çimen, A. E., Toplan, N. (2020). Döküm Kumu Ve Atık Döküm Kumundan Silika Esaslı Aerogel Toz Eldesi. *Metal dünyası dergisi*, 329, 1-8.
- Çimen, A. E. (2021). Döküm kumu ve atık döküm kumundan silika esaslı aerogel üretimi ve karakterizasyonu. Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.

- Crick, C. R. & Parkin, I. P. (2010). Preparation and Characterisation of Super-Hydrophobic Surfaces. *Chemistry A European Journal*. 16(12), 3568-3588.
- Cuce, E., Cuce, P. M., Wood, C. J., Riffat, S. B. (2014). Toward aerogel based thermal superinsulation in buildings: A comprehensive review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 34, 273–299.
- Cuce, E., Cuce, P. M., Wood, C. J., (2014). Riffat, SB., Optimizing insulation thickness and analysing environmental impacts of aerogel-based thermal superinsulation in buildings. *Energy Build*. 77, 28–39.
- Curto, D., D. & Cinieri, V. (2020). Aerogel-Based Plasters and Energy Efficiency of Historic Buildings. Literature Review and Guidelines for Manufacturing Specimens Destined for Thermal Tests. *Sustainability*, 12, 9457.
- Deconinck, A. H. (2014). Comparative assessment of in-situ thermal characterisation techniques. In *Proceedings of the 10th Nordic Symposium on Building Physics*. NSB, Lund, Sweden, 525–532.
- Dong, W., Faltens, T., Pantell, M., Simon, D., Thompson, T., Dong, W. (2009). Acoustic properties of organic/inorganic composite aerogels (Y. Brechet, J.D. Embury, P.R. Onck, Eds). *Materials Research Society Symposium Proceedings*, 1188.
- Dorcheh, A. S. ve Abbasi, M. S. (2008). Silica aerogel; synthesis, properties and characterization. *Journal of Materials Processing Technology*, 199(1-3), 10-26.
- Du, A., Zhou, B., Zhang, Z., Shen, J. (2013). A special material or a new state of matter: A review and reconsideration of the aerogel. *Materials*, 6, 941-968.
- Ebert, H.,P. (2015). Functional materials for energy-efficient buildings. *EDP Sciences*, 08001.
- El Rassy, H., Pierre, A. C. (2005). *Journal of Non-Crystalline Solids*, 351, 1603–1610.
- Elvin, G. (2014). *Nanotechnology For Green Building*. <http://greenforumtech.net>.
- Emmerling, A., Petricevic, R., Beck, A., Wang, P., Scheller, H., Fricke, J. (1995). Relationship between optical transparency and nanostructural features of silica aerogels. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 185(3), 240-248.

- Enes, A. (2019). Silika aerogel sentezinde farklı katalizör kullanımının etkisi ve adsorpsiyon kapasitesinin belirlenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Eriç, M. (1978). Yapı Malzemeleri, Cilt II, Kazmaz Matbaası, İstanbul, 367.Ü
- Fantucci, S. (2018). Tecniche di misura della trasmittanza. Master's Thesis, Polytechnic of Torino, Italy.
- Fricke, J., Tillotson, T. (1997). Aerogels: Production, characterization, and application. *Thin Solid Film*, 297(1-2), 212- 223.
- Garnier, C., Muneer, T., McCauley, L. (2015). Super Insulated Aerogel Windows: Impact on Daylighting and thermal performance. *Building and Environment*, 94, 231-238.
- Gao, T., Jelle, B. P., Gustavsen, A., Jacobsen, S. (2014). Aerogel-incorporated concrete: An experimental study. *Construction and Building Materials*, 52, 130-136.
- Gao, T., Jelle, B. P., Gustavsen, A. (2016). Building integration of aerogel glazings. *Procedia Engineering*, 145, 723-728.
- Gao, T., Ihara, T., Grynning, S., Jelle, B. P., Lien, A. G. (2016). Perspective of aerogel glazings in energy efficient buildings. *Building and Environment*, 95, 405-413.
- Geçim, M. (2017). Organik inorganik lif katkılı yeni nesil alçıpan üretimi. Yüksek Lisans Tezi, Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kahramanmaraş.
- Getir, Ş. (2019). Monolitik silika aerogel eldesi ve karakterizasyonu. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Gezer, H. (2012). Malzemenin Gizil Güçlerinin Mimariye Katkısı. İstanbul Ticaret Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, 20, 97-118.
- Gomes, G. M., Colen, I. F., Silva, F. D., Pedroso, M. (2018). Thermal conductivity measurement of thermal insulating mortars with EPS and silica aerogel by steady-state and transient methods. *Construction and Building Material*, 172, 696-705.
- Gökçe, V. M., Akçaözoğlu, S. (2017). Alçı katkısının diatomit esaslı hafif yapı elemanının mekanik özelliklerine etkisi. Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 6(1), 283-289.

- Gönel, A., G. (2016). Making Materials Which Feel Warm to the Touch by Incorporation of Aerogels. Yüksek Lisans Tezi, Koç Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Gurav, J. L., Jung, I. K., Park, H. H., Kang, E. S., Nadargi, D.Y. (2010). Silica Aerogel: Synthesis and Applications. Journal of Nanomaterials, 11.
- Güler, D. (2012). Silis kumu, feldspat ve tetraetil orto silikattan soljel yöntemi ile silika aerojel sentezi ve karakterizasyonu. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Gürdal, E. (1976). Kuzey ve Orta Anadolu Alçıları Üzerinde bir Araştırma, Doktora Tezi, İTÜ Mimarlık Fakültesi, İstanbul.
- Gürdal, E. Ve Acun, S. (2003). Alçı malzemenin taşıyıcılık özellikleri. TMH – Türkiye Mühendislik Haberleri, 427, 63-70.
- Gürdal, E. (2010). Bir yapı elemanı olarak alçı. Restorasyon ve Konservasyon Çalışmaları Dergisi, 4, 37-43.
- Haştemoğlu, H.Ş. (2006). 1960’larda Sürdürülebilirlik ve Kentleşme; Isparta, İstasyon Caddesi Örneği. SDÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 107., Isparta.
- Hrubesh, L., W. (1998). Aerogel Applications. Journal of Non-Crystalline Solids. 225, 335-342.
- Huang, S., Shen, Y. J., Chen, H. (2009). Study on the hydrophobic surfaces prepared by two-step sol-gel process. Applied Surface Science, 255, 7040–7046.
- Huang, L. (2012). Feasibility of using silica aerogel as insulation for buildings. Master of Science Thesis, KTH School of Industrial Engineering and Management, Stockholm.
- Huang, Y., Niu, J. L. (2015). Energy and visual performance of the silica aerogel glazing system in commercial buildings of Hong Kong. Construction and Building Materials, 94, 57-72.
- Hüsing, N., Schwertfeger, F., Tappert, W., Schubert, U. (1995). Influence of supercritical drying fluid on structure and properties of organically modified silica aerogels. Journal of Non-Crystallin Solids, 186, 37-43.
- Hwang, S., W. & Hyun, S., H. (2004). Capacitance control of carbon aerogel electrodes. Journal of Non-Crystallin Solids, 347(1-3), 238-245.

- Ibrahim, M., Wurtz, E., Achard, P., Biwole, P. H. (2015). Fostering Energy Efficiency in Buildings through Aerogel-Based Renders. *ICAE: Donostia San Sebastián*, 369–378.
- Karayılan, M. (2014). Investigations of Sol-Gel Parameters, Thermal and Optical Properties of Silica Aerogels for Large Scale Production. Yüksek Lisans Tezi, Koç Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Kariper, İ. A. (2018). Isı ve ses yalıtımı için esnek grafen ve silika aerojellerin üretimi. Bilimsel Araştırma Projesi Erciyes Üniversitesi.
- Kantarçeken, Y., Çizmecioglu, Z. (2021). Smoky (dumanlı) kuvars mineralinin gemolojik özellikleri. *İstanbul Ticaret Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 20(40), 285-296.
- Kayır, M. (2021). Aerogel yalıtım malzemesi üretimi ve karakteristik özelliklerinin belirlenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Batman Üniversitesi. Batman Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Batman.
- Kesik, A. M. (2019). Hidrofobik silika aerogel eldesinde kullanılan kimyasalların etkisi. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Khamidi, M. F., Glover, C., Farhan, S. A., Puad, N. H. A., Nuruddin, M. F. (2014). Effect of silica aerogel on the thermal conductivity of cement paste for the construction of concrete buildings in sustainable cities. *High Performance and Optimum Design of Structures and Materials*, 137, 665-674.
- Kıbar, A. (2016a). Süperhidrofobik ve hidrofobik yüzeyler üzerinde sıvı damlası gaz kabarcığı ve sıvı jeti dinamiğinin incelenmesi. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilim Dergisi*, 22(7), 613-619.
- Kıbar, A. (2016b). Experimental and numerical investigations of the impingement of an oblique liquid jet onto a superhydrophobic surface: energy transformation. *Fluid Dynamics Research*, 48, 015501.
- Kistler, S. S. (1931). Coherent expanded aerogels and jellies. *Nature*, 127, 741.
- Koçak, H., Ş. (2010). Kütahya Emet borik asit işletmesi bor atıklarının alçı levha üretiminde kullanılması. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

- Koçer, Ş. Ş. (2019). Alümina esaslı hammadde ve atıklardan alümina esaslı aerojel toz üretimi ve karakterizasyonu. Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.
- Kumar, A., Gaurav, Malik, A. K., Tewary, D. K., Singh, B. (2008). A review on development of solid phase microextraction fibers by sol–gel methods and their applications. *Analytica Chimica Acta*, 610, 1-14.
- Lefebvre, J., Leblanc, A., Genestie, B., Chartier, T., Lavie, A. (2016). Acoustic properties of aerogel encapsulated by macroporous cellulose. 23rd International Congress On Sound And Vibration, Athens, 7.
- Leydecker, S. (2008) *Nanomaterials in Architecture, Interior Architecture and Design*, Birkhauser Verlag AG. Almanya.
- Liu, M., Yang, D. (2008). Preparation of super hydrophobic silica aerogel and study on its fractal structure. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 354, 4927- 4931.
- Li, J., Cao, J., Huo, L., He, X. (2012). One-step synthesis of hydrophobic silica aerogel via in situ surface modification. *Materials Letters*, 87, 146-149.
- Lin, J., Li, G., Liu, W., Qiu, R., Wei, H., Zong, K., Cai, X. (2021). A review of recent progress on the silica aerogel monoliths: synthesis, reinforcement, and applications. *Journal of Material Science*, 56, 10812-10833.
- Linhares, T., Amorim, M. T. P., Duraes, L. (2019). Silica aerogel composites with embedded fibres: a review on their preparation, properties and applications. *Journal of Materials Chemistry A*, 7, 22768-22802.
- 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*, 356(43), 2241-2246.
- Mahadik D. B., , Rao A. V., Rao A. P., Wagh, P. B., Ingale S. V., Gupta S. C. (2011). Effect of concentration of trimethylchlorosilane (TMCS) and hexamethyldisilazane (HMDZ) silylating agents on surface free energy of silica aerogels. *Journal of Colloid and Interface Science*, 356(1), 298-302.

- Masera, G., Ghazi Wakili, K., Stahl, T., Brunner, S., Galliano, R., Monticelli, C., Aliprandia, S., Zanelli, A., Elesawye, A. (2017). Development of a super-insulating, aerogel-based textile wallpaper for the indoor energy retrofit of existing residential buildings. *Procedia Engineering*, 180, 1139-1149.
- Maynes D, Johnson M, Webb B. W. (2011). Free-surface liquid jet impingement on rib patterned superhydrophobic surfaces. *Physics of Fluids*, 23(5), 52104.
- Medina, M., Tapia, J., Pacheco, S., Espinosa, M., Rodriguez, R. (2010). Adsorption of lead ions in aqueous solution using silica–alumina nanoparticles. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 356,383-387.
- MEGEP, (2007). Meslekî Eğitim Ve Öğretim Sisteminin Güçlendirilmesi Projesi, İnşaat Teknolojisi, Yalıtım, Ankara.
- Mendes, A. L., Girão, A. V., Silva, R. F., Durão, L. (2019). Polysilsesquioxanebased silica aerogel monoliths with embedded CNTs. *Microporous and Mesoporous Materials*, 288.
- Merli, F., Anderson A. M., Carroll M. K., Buratti C. (2018). Acoustic measurements on monolithic aerogel samples and application of the selected solutions to standard window systems. *Journal Applied Acoustics*, 142, 123-131.
- Mermer, N. K. (2018). Silika temelli aerojellerin sol-jel yöntemi ile sentezi ve yapısal özelliklerin incelenmesi. Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Mermer, N. K., Pişkin, S. (2019) Synthesis of aerogel usage of sand by ultrasonically assisted sol-gel method, characterization and thermal insulation plaster application. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 34(3), 1253-1263.
- McNeil, S., Gupta, H. (2022). Emerging applications of aerogels in textiles. *Polymer Testing*, 106, 107426.
- Moretti, E., Merli, F., Cuce, E., Buratti, C. (2017). Thermal and acoustic properties of aerogels: preliminary investigation of the influence of granule size. *Energy Procedia*, 111, 472-480.

- Muliawan, A., Jumardi, R., Fernando, R., Lutfi, M. (2019). Comparison analysis of Kanaan Sand, Loktunggul Sand, and Sambera Sand using the methods of XRD and XRF. *Journal of Physics: Conference Series*, 1277, 1-5.
- Muller, M. F., Esmanioto, F., Huber, N., Loures, E. R., Junior, O. C. (2019) A systematic literature review of interoperability in the green Building Information Modeling lifecycle. *Journal of Cleaner Production*, 223, 397-412.
- Nanba, T., Hagiwara, T., Miura, Y. (2003). Chemical bonding state of sodium silicates. In *Advances in Quantum Chemistry*, 42, 187-198.
- Nayak, J. P. ve Bera, J., (2009). Preparation of Silica Aerogel by Ambient Pressure Drying Process using Rice Husk Ash as Raw Material. *Transactions Indian Ceramic Society* ,68 (2), 1-4.
- Neugebauer, A., Chen, K., Tang, A., Allgeier, A., Glicksman, LR., Gibson, L. J.(2014). Thermal conductivity and characterization of compacted, granular silica aerogel. *Energy and Buildings*, 79, 47-57.
- 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*, 77, 307-316.
- Nguyen, T. H., Mai, N. T., Reddy, V. R. M., Jung, J. H., Truong, N. T. N. (2020). Synthesis of silica aerogel particles and its application to thermal insulation paint. *Korean Journal of Chemical Engineering*, 37(10), 1803-1809.
- Nosratia, R. H. ve Berardia, U. (2017). Long-term performance of aerogel-enhanced materials. *Energy Procedia*, 132, 303-308.
- Nosratia, R. H. ve Berardia, U. (2018). Hygrothermal characteristics of aerogel-enhanced insulating materials under different humidity and temperature conditions. *Energy and Buildings*, 158, 698-711.
- Nuckols, M. L., Chao, J. C., Swiergosz, M. J. (2005). Manned Evaluation of a Prototype Composite Cold Water Diving Garment Using Liquids and Superinsulation Aerogel Materials. Technical Report NEDU-05-02, United States Navy Experimental Diving Unit.

- Ngu, C. N. (2004). Calcination of Gypsum Plasterboard Under Fire Exposure, Fire Engineering Research Report 04/6, 1-127.
- Ogihara, H., Xie, J., Okagaki, J., Saji, T. (2012). Simple Method for Preparing Superhydrophobic Paper: Spray-Deposited Hydrophobic Silica Nanoparticle Coatings Exhibit High Water-Repellency and Transparency. *American Chemical Society*, 28(10), 4605-4608.
- Öz, D. C., Öz, B., Kaya, N. (2018). Alümina aerojellerin fiziksel özellikleri üzerine yaşlandırma ve kurutma süresinin etkisi. *BAUN Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 20(1), 198-211.
- Özdoğan, H., A. (2020). Yapım şantiyesinde alçı levha kullanımı ve oluşan atıkların geri dönüşüm potansiyelinin araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Gebze Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Gebze.
- Poco, J. F., Satcher Jr, J. H., Hrubesh, L. W. (2001). Synthesis Of High Porosity, Monolithic Alumina Aerogels. *Journal Of Non-Crystalline Solids*, 285(1-3), 57-63.
- Prince, J. F, Maynes, D., Crockett J. (2015). On jet impingement and thin film breakup on a horizontal superhydrophobic surface. *Physics of Fluids*, 27(11), 112108.
- Ramamoorthy, M., Pisal, A. A., Rengasamy, R. S., Venkateswara Rao, A. (2018). In-situ synthesis of silica aerogel in polyethylene terephthalate fibre nonwovens and their composite properties on acoustical absorption behavior. *Journal of Porous Materials*, 25, 179-187.
- Rao, A. V. & Haranath, D. (1999). Effect of methyltrimethoxysilane as a synthesis component on the hydrophobicity and some physical properties of silica aerogels. *Microporous Mesoporous Mater*, 30(2-3), 267-273.
- Rao, A. V, Kulkarni, M. M., Amalnerkar, D. P., Seth, T. (2003) Surface chemical modification of silica aerogels using various alkyl-alkoxy/chloro silanes. *Applied Surface Science*, 206(1-4), 262-270.
- Rao, A.V., Kulkarni, M. M., Pajonk, G. M., Amelnarkar, D. P., Seth, T. (2003). Synthesis and characterization of hydrophobic silica aerogels using trimethylethoxysilane as a co-precursor. *Journal of Sol-Gel Science and Technology*, 27(2), 103-109.

- Rao, A.V., Kalesh, R.R., Pajonk, G. M. (2003). Hydrophobicity and physical properties of TEOS based silica aerogels using phenyltriethoxysilane as a synthesis component. *Journal of Materials Science*, 38(21), 4407-4413.
- 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} . *Journal of Non-Crystalline Solids*, 350, 216–223.
- Rao, A.V., Bhagat, S. D. (2004). Synthesis and physical properties of TEOS-based silica aerogels prepared by two step (acid–base) sol–gel process. *Solid State Science*, 6(9), 945-952.
- Rao, A. V., Rao A. P., Kulkarni, M. M. (2004). Influence of gel aging and Na_2SiO_3/H_2O molar ratio on monolithicity and physical properties of water–glass-based aerogels dried at atmospheric pressure. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 350, 244-229.
- Rao, A. P., Pajonk, G. M., Rao, A. V. (2005). Effect of preparation conditions on the physical and hydrophobic properties of two step processed ambient pressure dried silica aerogels. *Journal of Materials Science*, 40, 3481-3489.
- Rao, A. P., Rao, A. V, Pajonk, G. M., Shewale, P. M. (2007). Effect of solvent exchanging process on the preparation of the hydrophobic silica aerogels by ambient pressure drying method using sodium silicate precursor. *Journal of Materials Science*, 42, 8418-8425.
- Rao, A.V. (2019). Elastic superhydrophobic and water glass-based silica aerogels and applications. *Journal of Sol-Gel Science and Technology*, 90, 28-54.
- Reim, M., Körner, W., Manara, J., Korder, S., Arduini-Schuster, M., Ebert, H. P., Fricke, J. (2005). Silica aerogel granulate material for highly thermal insulation and daylighting. *Solar Energy*, 79(2), 131–139.
- Ryan, J. V. (1962). Study of gypsum plasters exposed to fire. *Journal of Research of the National Bureau of Standards*. 66C(4), 373-387.
- Ryu J. (2000). Flexible aerogel superinsulation and its manufacture. Aspen Systems Inc.

- Pacheco Torgal, F., Buratti, C., Kalaiselvam, S., Granqvist, C.-G., Ivanov, V. (Eds.) (2016). Nano and Biotech Based Materials for Energy Building Efficiency. Springer: Cham, Switzerland.
- Pajonk, G. M., Elaloui, E., Chevalier, B., Begag, R. (1997). Optical Transmission Properties of Silica Aerogels Prepared from Polyethoxidisiloxanes. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 210, 224-231.
- Patel, R. P., Purohit, N.S., Suthar, A.M. (2009). An overview of silica aerogels. *International Journal Of Chemtech Research*, 1(4), 1052-1057.
- Patil, S. P., Parale, V. G., Park, H. H., Marker, B.(2021). Mechanical modeling and simulation of aerogels: A review. *Ceramics International*, 47, 3, 2981-2998.
- Pierre, A. C., Rigacci, A. (2011). *Aerogels Handbook*. Springer, 21-45.
- Prakash, S. S., Brinker, C. J., Hurd, A. J., Rao, S. M. (1995) Silica aerogel films prepared at ambient pressure by using surface derivatization to induce reversible drying shrinkage. *Nature*, 374(6521), 439-443.
- Santos, P., Martins, C., Silva, L. S. (2014). Thermal performance of lightweight steel-framed construction systems. *Metallurgical Research & Technology*, 111, 329-338.
- Santurde, R. A., Andrés, A., Viguri J. R., Raimondo, M., Guarini, G., Zanelli, C., Dondi, M. (2011). Technological behaviour and recycling potential of spent foundry sands in clay bricks. *Journal of Environmental Management*, 92, 994-1002.
- Saraç, N., Toplan, N. (2016). Dünyanın En Hafif Katı Malzemesi: Aerojeller. *Metal Dünyası*, 276, 68-72.
- Sarawade, P. B., Kim, J. K., Park, J. K., Kim, H. K. (2006). Influence of Solvent Exchange on the Physical Properties of Sodium Silicate Based Aerogel Prepared at Ambient Pressure. *Aerosol and Air Quality Research*, 6 (1), 93-105.
- Sebdani, Z. M., Begum, H., Schoenwald, S., Horoshenkov, K. V., Malfait, W. J. (2021). A review on silica aerogel-based materials for acoustic applications. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 562, 120770.
- Scherer, G.W., Smith, D.M., Qiu, X., Anderson, J.M. (1995). *Journal of Non-Crystalline Solids*, 186, 316-320.

- Schmidt, M., Schwertfeger, F. (1998). Applications for silica aerogel products. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 225, 364-368.
- Schneider, F. (2011). OKAGEL: High insulating day lighting systems (M.A. Aegerter, N. Leventis, M.M. Koebel, Ed.), *Aerogels Handbook*, Springer, 879-888.
- Schultz, J. M. & Jensen, K. I. (2008). Evacuated aerogel glazings. *Vacuum*, 82, 7, 723-729.
- Schwertfeger, F., Glaubitt, W., Schubert, U. (1992). Hydrophobic aerogels from Si (OMe)/MeSi (OMe) mixtures. *Journal of Non-Crystalline Solids*. 145, 85-89.
- Schwertfeger, F., Schmidt, M., Frank, D. (2003). Use of aerogels for deadening structureborne and/or impact sounds. US Patent 6598358B1.
- Shaid, A., Furgusson, M., Wang, L. (2014). Thermophysiological comfort analysis of aerogel, nanoparticle incorporated fabric for fire fighter's protective clothing. *Chemical and Materials Engineering*, 2(2), 37-43.
- Sıym, N. (2016). Yüksek sıcaklık ısı yalıtım uygulamalarına yönelik üstün performanslı aerogel şilte sentezi ve karakterizasyonu. Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Smitha, S., Shajesh, P., Aravind, P. R., Kumar, S. R., Pillai, P. K., Warriar, K. G. K. (2006). Effect of aging time and concentration of aging solution on the porosity characteristics of subcritically dried silica aerogels. *Microporous and Mesoporous Materials*, 91, 286-292.
- Stahl, T., Brunner, S., Zimmermann, M., Ghazi Wakili, K. (2012). Thermo-hygric properties of a newly developed aerogel based insulation rendering for both exterior and interior applications. *Energy Building*, 44, 114-117.
- Strzałkowski, J. & Garbalinska, H. (2016). Thermal and strength properties of lightweight concretes with the addition of aerogel particles. *Advances in Cement Research*, 28(9), 567-575.
- Szczepaniak, R., Komorek, A., Przybyłek, P., Krzyzak, A., Roskowicz, M., Godzimirski, J., Pinkiewicz, E., Jaszczak, W., Kosicka, E. (2022). Research into mechanical properties of an ablative composite on a polymer matrix base with aerogel particles. *Composite Structures*, 280, 114855.

- Şansal, T., Üce, S. (2019). Duvarda Yüksek Teknolojik Çözümler. İstanbul Sabahattin Zaim Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 1(1), 15-20.
- Tadjarodi, A., Haghverdi, M., Mohammadi, V. (2012). Preparation and characterization of nano-porous silica aerogel from rice husk ash by drying at atmospheric pressure. Materials Research Bulletin, 47, 2584–2589.
- Toygun, Ş., Köneçoğlu, G., Kalpaklı, Y. (2013). General principles of sol-gel. Journal of Engineering and Natural Sciences Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi, 31, 456-476.
- TS EN 520 + A1 (2010). Alçı Levhalar - Tarifler, Gereklere ve Deney Yöntemleri. TSE, Ankara.
- TS 825 (2014). Binalarda Isı Yalıtımı Kuralları Standardı. TSE, Ankara.
- TS EN 1015-11. Deney metotları - Bölüm 11: Sertleşmiş Harcın Basınç ve Eğilme Dayanımının Tayini. TSE, Ankara.
- TS EN 13279-1 (2009). Yapı ve sıva alçıları - Bölüm 1: Tarifler ve gereklere. TSE, Ankara.
- TS EN 13279-2 (2014). Yapı ve sıva alçıları - Bölüm 2: Deney yöntemleri. TSE, Ankara.
- Turan, M. T. ve Kılıçkaya T. (2016). Dış Cephe Sisteminde Alçı Esaslı Levha Bileşeninin Kullanımı. 8. Ulusal Çatı & Cephe Sempozyumu. Mimar Sinan Güzel Sanatlar Üniversitesi, İstanbul.
- Ülker, Z. (2011). Preparation and characterization of silica aerogel polymer composites. Masters Thesis, Koç University, The Institute of Engineering and Sciences, İstanbul.
- Ülker, Z., Şanlı, D., Erkey, C. (2014). Applications of Aerogels and Their Composites in Energy-Related Technologies. Supercritical Fluid Technology for Energy and Environmental Applications, 157-180.
- Üstündağ, Ö. (2020). Durabilite ortamlarında kürlenmiş mineral katkılı harçların porozite özellikleri. Doktora Tezi, İstanbul Üniversitesi, Cerrahpaşa Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, İstanbul.
- Üstündağ, Ö., Sola, O. Ç. (2022). Effect of aerogel/silica fume under curing methods on properties of cement-based mortars. Journal of Construction, 21(2), 368-386.

- Vural, B. (2010). Nanoteknoloji ve Malzeme Bilimi İçerisindeki Yeri, Mimarlıkta Malzeme Dergisi, 2, 81-90.
- Yang, X., Wu, Z., Chen, H., Du, Q., Yu, L., Zhang, R., Zhou, Y. (2020). A facile preparation of ambient pressure dried hydrophilic silica aerogels and their application in aqueous dye removal. *Frontiers in Materials*, 7, 152, 1-10.
- Yılmaz, Y. (2013). Farklı başlangıç maddeleri kullanılarak sol-jel yöntemiyle monolitik silika aerojel ve silika aerojel sentezi ve karakterizasyonu. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Yaghoubi, E., Arulrajah, A., Yaghoubi, M., Horpibulsuk, S. (2020). Shear strength properties and stress–strain behavior of waste foundry sand. *Construction and Building Materials*, 249, 118761.
- Yang, H. S., Choi, S. Y., Hyun, S. H., Park, H. H., Hong, J. K. (1997). Ambient-dried low dielectric SiO aerogel thin film. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 221, 151-156.
- Zhu, J., Xie, J., Lü, X., Jiang, D. (2009). Synthesis and characterization of superhydrophobic silica and silica/titania aerogels by sol–gel method at ambient pressure. *Colloids and Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects*, 342(1-3), 97-101.
- Zu, G., Shen, J., Wei, X., Ni, X., Zhang, Z., Wang, J., Liu, G., (2011). Preparation and characterization of monolithic alumina aerogels. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 357, 2903-2906.
- Wagh, P. B., Ingale, S. V. (2002). Comparison of some physico-chemical properties of hydrophilic and hydrophobic silica aerogels. *Ceramics International*, 28, 43-50.
- Wagh, P. B., Kumar, R., Patel, R. P., Singh, I. K., Ingale, S. V., Gupta, S. C., Mahadik, D. B., Rao, A. V. (2015). Hydrophobicity Measurement Studies of Silica Aerogels using FTIR Spectroscopy, Weight Difference Method, Contact Angle Method and K-F Titration Method. *Journal of Chemical, Biological and Physical Sciences*, 5(3), 2350-2359.
- Westgate, P., Paine, K., Ball, R. (2018). Physical and mechanical properties of plasters incorporating aerogel granules and polypropylene monofilament fibres. *Construction and Building Materials*, 158, 472-480.

- Woignier, T. & J. Phalippou, J. (1987). Skeletal density of silica aerogels. *Journal of Non-Crystalline Solids* 93(1), 17-21.
- Wu, L., Huang, Y., Wang, Z., Liu, L., Xu, H. (2010). Fabrication of hydrophobic alumina aerogel monoliths by surface modification and ambient pressure drying. *Applied Surface Science*, 256, 5973-5977.
- Wu, X., Wu, D., Fu, R., Zeng, W. (2012). Preparation of carbon aerogels with different pore structures and their fixed bed adsorption properties for dye removal. *Dyes and Pigments*, 95, 689-694.

İnternet Kaynakları

- Url-1: <https://www.esnmetal.com/alcipan-nedir/> (Erişim Tarihi: 22.12.2022)
- Url-2: <https://vitrumlife.it/tr/90-y%C4%B1ld%C4%B1r-ancak-%C5%9Feffaf-veyenilik%C3%A7i-yal%C4%B1t%C4%B1m-aerjeli-onlar%C4%B1kan%C4%B1tlam%C4%B1yor/> (Erişim Tarihi: 04.12.2022)
- Url-3: <https://www.kalwall.com/wp-content/uploads/2022/04/spokaneprojectreport-2.pdf> (Erişim Tarihi: 06.12.2022)
- Url-4: <https://www.kalwall.com/wp-content/uploads/2022/03/Product-Overview.pdf> (Erişim Tarihi: 06.12.2022)
- Url-5: <https://www.kalwall.com/portfolio/> (Erişim Tarihi: 06.12.2022)
- Url-6: Okalux Glastechnik GmbH (Erişim Tarihi: 06.12.2022)
- Url-7: <https://www.birdair.com/> (Erişim Tarihi: 06.12.2022)
- Url-8: <http://amaaerogel.com/wp-content/uploads/2019/06/AEROPAN-TR-VERSIYON.pdf> (Erişim Tarihi: 04.12.2022)
- Url-9: https://www.archiproducts.com/en/products/ama-composites/aerogel-thermal-insulation-panel-aerogips_137878 (Erişim Tarihi: 04.12.2022)
- Url-10: <https://amaaerogel.com/thermogel-paint/> (Erişim Tarihi: 04.12.2022)
- Url-11: <https://amaaerogel.com/galeri/> (Erişim Tarihi: 04.12.2022)

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Tuba ARKAN DEMİRÖRS

EĞİTİM DURUMU

Lisans Öğrenimi : 2008, Abant İzzet Baysal Üniversitesi, Fen Edebiyat
Fakültesi, Biyoloji Bölümü (İngilizce)

Lisans Öğrenimi : 2016, KTO Karatay Üniversitesi, GSTF, İç Mimarlık ve
Çevre Tasarımı Bölümü

Yüksek Lisans Öğrenimi : 2011, Selçuk Üniversitesi, Fen Edebiyat Fakültesi,
Biyokimya

: 2011, Chalmers University of Technology (Sweden),
Biotechnology (Master of Science)

Bildiği Yabancı Diller : İngilizce

Bilimsel Faaliyetleri :

Yayımlar:

Arkan, T., Gökmeşe, H. (2021). Synthesis and Characterization of Industrial Casting Sand Based Silica Aerogel. International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology, 1254-1258.

Arkan, T., Gökmeşe, H. (2021). Synthesis and Characterization of Industrial Casting Sand Based Silica Aerogel. 7th International Mardin Artuklu Scientific Researches Conference.

Arkan, T., Gökmeşe, H. (2022). Atık Döküm Kum Geri Kazanımı ile Silika Aerogel Sentezi Ve Karakterizasyonu. Gazi Journal of Engineering Sciences, 8(3),439-446.

İŞ DENEYİMİ

Stajlar

:

Projeler


: 2017-2020, KTB Restorasyon ve Renevasyon Projesi

Çalıştığı Kurumlar

: 2018-2020, Şirket Sahibi İç Mimar, UNIQ interior
architecture design

2018-2023, KTO Karatay Üniversitesi GSTF İç Mimarlık
Bölümü, Misafir Öğretim Elemanı

Tarih: 19 Ocak 2023

	<p>TEZ/PROJE BAŐLIĐI</p> <p>Tuba ARKAN DEMİRÖRS</p> <p>2023</p>	<p> KTO Karatay Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Mimarlık Anabilim Dalı Mimarlık Bilim Dalı</p> <p>SİLİKA İÇERİKLİ AEROJELİN SOL-JEL YÖNTEMİ İLE SENTEZLENMESİ VE MİMARİ YAPI MALZEMESİNİN PERFORMANSININ GELİŞTİRİLMESİ</p> <p>Tuba ARKAN DEMİRÖRS</p> <p>Doktora Tezi</p> <p>KONYA Ocak 2023</p>
--	---	---



KTO KARATAY ÜNİVERSİTESİ
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Mimarlık Anabilim Dalı
Mimarlık Bilim Dalı
Doktora Programı

Silika İçerikli Aerojelin Sol-Jel Yöntemi İle Sentezlenmesi
21743409
Tuba ARKAN DEMİRÖRS
Danışman: Prof. Dr. Kerim ÇINAR
Referans Numarası:



KTO KARATAY ÜNİVERSİTESİ
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Mimarlık Anabilim Dalı
Mimarlık Bilim Dalı
Doktora Programı

Silika İçerikli Aerojelin Sol-Jel Yöntemi ile Sentezlenmesi ve Mimari Yapı
Malzemesinin Performansının Geliştirilmesi
21743409
Tuba ARKAN DEMİRÖRS
Danışman: Prof. Dr. Kerim ÇINAR
Referans Numarası: