TAŞ YÜNÜNE ALTERNATİF ISI VE SES YALITIMINA SAHİP YÜKSEK MUKAVEMETLİ ALÇI GELİŞTİRİLMESİ

Yüksek Lisans Tezi

Ebru CİCİ

Eskişehir 2025

TAŞ YÜNÜNE ALTERNATİF ISI VE SES YALITIMINA SAHİP YÜKSEK MUKAVEMETLİ ALÇI GELİŞTİRİLMESİ

Ebru CİCİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Servet TURAN

Eskişehir

Eskişehir Teknik Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Nisan 2025

JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI

Ebru CİCİ'nin TAŞ YÜNÜNE ALTERNATİF ISI VE SES YALITIMINA SAHİP YÜKSEK MUKAVEMETLİ ALÇI GELİŞTİRİLMESİ başlıklı çalışması 16/04/2025 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından değerlendirilerek "Eskişehir Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliği"nin ilgili maddeleri uyarınca, Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Anabilim dalında Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri	**Unvan Adı Soyadı**	**İmza**
Üye	: Prof. Dr. Servet TURAN	
Üye	: Prof. Dr. Mehmet Uğur TOPRAK	
Üye	: Dr.Öğr.Üyesi Emrah DÖLEKÇEKİÇ	

Prof. Dr. Harun BÖCÜK

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü

16/04/2025

DANIŞMAN ONAYI

Danışmanlığını yürüttüğüm Yüksek Lisans öğrencisi Ebru CİCİ, TAŞ YÜNÜNE ALTERNATİF ISI VE SES YALITIMINA SAHİP YÜKSEK MUKAVEMETLİ ALÇI GELİŞTİRİLMESİ başlıklı tez çalışmasını tamamlamıştır. Hazırlamış olduğu tez tarafımca incelenmiş ve öğrencinin tez savunma sınavına alınması bilimsel ve etik açıdan uygun görülmüştür.

Tez Danışmanı

Prof. Dr. Servet TURAN

ÖZET

TAŞ YÜNÜNE ALTERNATİF ISI VE SES YALITIMINA SAHİP YÜKSEK MUKAVEMETLİ ALÇI GELİŞTİRİLMESİ

Ebru CİCİ

Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Anabilim Dalı

Eskişehir Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Nisan 2025

Danışman: Prof. Dr. Servet TURAN

Bu çalışma, yapı malzemelerinde sürdürülebilir ve yenilikçi alternatiflerin geliştirilmesini hedeflemektedir. Taş yününe alternatif ve üstün özelliklere sahip bir malzeme üretmek amacıyla, alçı bazlı karışımlara cam küre ve granül ve sodyum lauril sülfat (SLS) gibi katkılar eklenmiştir. Malzemenin termal, akustik ve mekanik performansı, bu katkıların farklı oranlarda (10%, 20%, 30%, 40%) ve kombinasyonlarında kullanılmasıyla değerlendirilmiştir. Ayrıca, %1, %2 ve %3 oranlarında SLS ilavesiyle köpüklenme ve gözeneklilik artırılmıştır. Termal iletkenlik ölçümleri sabit 50°C sıcaklıkta, standart kalınlık ve yüzey alanına sahip numunelerle gerçekleştirilmiştir. Akustik özellikler için empedans tüpü yöntemi, mekanik özellikler için ise basma dayanımı testleri uygulanmıştır.

Sonuçlar, cam küre, granül ve SLS kombinasyonunun açık ve kapalı gözeneklilik yaratarak termal iletkenliği düşürdüğünü göstermiştir. Bu bulgular, alçı temelli malzemelerin yalıtım sektöründe sürdürülebilir, ekonomik ve yüksek performanslı bir alternatif olabileceğini ortaya koymaktadır.

Anahtar Sözcükler: Alçı, Cam küre, Granül, Termal iletkenlik, Akustik performans

ABSTRACT

DEVELOPMENT OF HIGH-STRENGTH GYPSUM WITH THERMAL AND ACOUSTIC INSULATION AS AN ALTERNATIVE TO ROCK WOOL

Ebru CİCİ

Department of Material Science and Engineering

Eskişehir Technical University, Institute of Graduate Programs, April 2025

Supervisor: Prof. Dr. Servet TURAN

This research focuses on the development of sustainable and innovative alternatives in the field of construction materials. Aiming to produce a material with superior properties as a substitute for rock wool, various additives, including glass spheres, granules, and sodium lauryl sulfate (SLS), were incorporated into gypsum-based formulations. The thermal, acoustic, and mechanical properties of the material were systematically evaluated by employing these additives at different ratios (10%, 20%, 30%, 40%) and in various combinations. Furthermore, the inclusion of SLS at concentrations of 1%, 2%, and 3% was utilized to enhance foaming and porosity. Thermal conductivity measurements were conducted at a fixed temperature of 50°C using specimens with standardized thickness and surface area. Acoustic properties were analyzed through the impedance tube method, while mechanical performance was assessed via compressive strength testing.

The findings revealed that the combination of glass spheres, granules, and SLS resulted in the formation of open and closed porosity, thereby reducing thermal conductivity. These results indicate that gypsum-based materials have the potential to serve as a sustainable, cost-effective, and high-performance alternative within the insulation sector.

Keywords: Gypsum, Glass sphere, Granule, Thermal conductivity, Acoustic performance

TEŞEKKÜR

Bu tezin hazırlanmasında, bilgi ve deneyimleriyle beni her zaman destekleyen, yol gösteren, en zor anlarımda bile beni sabırla dinleyen ve kapısını her zaman bana açarak tüm sorularıma içtenlikle cevap veren değerli danışman hocam Prof. Dr. Servet TURAN'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Akademik yolculuğum boyunca bana ışık tutan ve vizyon katan rehberliğiniz, bu çalışmayı gerçekleştirmemde büyük bir rol oynamıştır.

Ayrıca, çalışmalarım boyunca bilgi birikimlerini benimle paylaşarak bana her türlü yardımı sunan Eskişehir Teknik Üniversitesi ve Seramik Araştırma Merkezi çalışanlarına gönülden teşekkür ederim. Varlığınız ve sunduğunuz değerli katkılar, bu sürecin daha verimli ve anlamlı bir şekilde tamamlanmasına olanak sağladı.

İlkokuldan bu yana, her zorluğumda yanımda olan, mutluluğumu ve heyecanımı paylaşan dostlarım Ezgi MEŞE ve Çağla BİNGÜL'e en içten teşekkürlerimi sunarım. Onlar olmasaydı akademide bu kadar özveriyle ilerleyemezdim. Zor zamanlarımda yanımda olan, varlıklarıyla bu süreci kolaylaştıran ve beni akademiye yönlendiren iki özel arkadaşla karşılaştığım için çok mutluyum.

Her daim yanımda olarak desteğiyle bana güç veren, zor zamanlarımda motivasyonumu kaybetmememi sağlayan sevgili Onur Özgür ERKARSLAN'a çok teşekkür ederim. Varlığıyla, bu yoğun ve yorucu süreci daha huzurlu ve kolay bir şekilde tamamlamamda büyük bir katkı sağladığı için kendimi şanslı hissediyorum.

En özel teşekkürlerimi ise sevgili anneme sunmak istiyorum. Maddi ve manevi olarak her zaman yanımda olan, bana koşulsuz destek veren anneme çok teşekkür ederim. Her zaman bana inandığın, beni cesaretlendirdiğin ve kalbinle yanımda olduğun için teşekkür ederim.

Bu tez, hayatıma dokunan her birinizin katkısıyla tamamlanmıştır. Hepinize en derin sevgilerim ve teşekkürlerimle.

Ebru CİCİ

16/04/2025

ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ

Bu tezin bana ait, özgün bir çalışma olduğunu; çalışmamın hazırlık, veri toplama, analiz ve bilgilerin sunumu olmak üzere tüm aşamalarında bilimsel etik ve kurallara uygun davrandığımı; bu çalışma kapsamında elde edilen tüm veri ve bilgiler için kaynak gösterdiğimi ve bu kaynaklara kaynakçada yer verdiğimi; bu çalışmanın Eskişehir Teknik Üniversitesi tarafından kullanılan "bilimsel intihal tespit programı"yla tarandığını ve hiçbir şekilde "intihal içermediğini" beyan ederim. Herhangi bir zamanda, çalışmamla ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun saptanması durumunda, ortaya çıkacak tüm ahlaki ve hukuki sonuçları kabul ettiğimi bildiririm.

Ebru CİCİ

İÇİNDEKİLER

Sayfa

BAŞLIK SAYFASI……..……I

JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI……...……...II

DANIŞMAN ONAYI……...……..III

ÖZET……...……...IV

ABSTRACT……...…..V

TEŞEKKÜR……...……VI

ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ……...……VII

İÇİNDEKİLER……...…...……VIII

TABLOLAR DİZİNİ……...……XII

ŞEKİLLER DİZİNİ……..…….XIII

GÖRSELLER DİZİNİ……...……XVI

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ……XVII

1. GİRİŞ……1

2. ISI VE SES İLETİM MEKANİZMALARI……..4

2.1. Isı İletim Mekanizmaları……..4

2.2. Ses İletim Mekanizması…….……...5

2.3. Mekanik Dayanıklılık Mekanizması……6

3. ALÇI VE ALÇIPAN HAKKINDA GENEL BİLGİLER……..8

3.1. Alçı Hammaddesi Alçı Taşı……...8

3.1.1. Anhidrit…….……...8

3.1.2. Jips…….……...8

3.2. Alçı Kristal Yapısı……10

3.3. Alçı Tipleri……...12

3.3.1. Alfa tipi alçı…….……...13

3.3.2. Beta tipi alçı…….……..13

3.4. Alçının Özellikleri……...14

3.4.1. Alçının mekanik özellikleri……..…….……....14
3.4.2. Alçının ısı yalıtım özelliği……..…….……..15
3.4.3. Alçının ses yalıtımı özelliği……..……...……15
3.5. Alçının Avantajları……..15
3.6. Alçıpanlar Hakkında Genel Bilgiler…….16
3.6.1. Alçıpanın üretim aşamaları…….……17
3.6.2. Alçıpanın ısı yalıtımı özellikleri……18
3.6.3. Alçıpanın ses yalıtımı özellikleri……...19
3.6.4. Alçıpanın mekanik özellikleri……...19
3.7. Taş Yünü Hakkında Genel Bilgi ve Alçıpanın Tercih Edilmesinin Avantajları ……20
3.7.1. Isıl iletkenlik karşılaştırılması……..21
3.7.2. Ses yalıtımı karşılaştırılması……21
3.7.3. Mekanik dayanıklılık karşılaştırılması……...21
4. ALÇI MALZEMESİ ÜZERİNE YAPILAN ÇALIŞMALAR……23
4.1. Termal Performans Üzerine Çalışmalar……23
4.2. Akustik Performans Üzerine Çalışmalar……..24
4.3. Mekanik Dayanım ve Mikroyapı Çalışmaları……...25
5. ÇALIŞMANIN AMACI……29
6. MATERYAL VE YÖNTEM……..31
6.1. Çalışmada Kullanılan Malzemeler ve Reçeteler……...31
6.1.1. Alçı…….……31
6.1.2. Cam küre……32
6.1.3. Granül……35
6.1.4. Sodyum lauril sülfat (SLS)……36
6.1.5. Reçeteler……37
6.2. Üretim Yöntemi……...38
6.2.1. Hammaddelerin karakterizasyonu……..39
6.2.2. Malzeme hazırlığı……..39
6.2.3. Karıştırma……39
6.2.4. Numune dökümü……...40
6.2.5. Kuruma……41

6.3. Uygulanan Testler ve Karakterizasyon Teknikleri……...41
6.3.1. XRF (X-Ray floresans)……..42
6.3.2. SEM (Taramalı elektron mikroskobu)……42
6.3.3. Optik mikroskop……...43
6.3.4. Helyum piknometresi……44
6.3.5. Tane boyut ölçüm cihazı……45
6.3.6. BET analizi……45
6.3.7. Termal iletkenlik ölçümü……..45
6.3.8. Akustik performans testi……..47
6.3.9. Basma mukavemet testi……48
6.3.10. Vakumlu su emme ile arşimet analizi……49
7. SONUÇLAR VE TARTIŞMA……...51
7.1. SLS (Sodyum Laureth Sülfat) Katkısının Alçı Matrisine Etkileri……...51
7.1.1. SLS katkısının porozite oluşumuna etkisi……...51
7.1.2. SLS katkısının yoğunluğa ve yüzey alanına etkisi……...52
7.1.3. SLS katkısının mukavemete etkisi……...55
7.2. Cam Küre Katkısının Alçı Matrisine Etkileri……...56
7.2.1. Cam küre katkısının mikroyapıya etkisi…….56
7.2.2. Cam küre katkısının yoğunluğa etkisi…….58
7.2.3. Cam küre katkısının ısıl iletkenliğe etkisi……63
7.2.4. Cam küre katkısının mekanik dayanıma etkisi……...63
7.3. Granül Katkısının Alçı Matrisine Etkileri…….64
7.3.1. Granül katkısının mikroyapıya etkisi……..64
7.3.2. Granül katkısının yoğunluğa etkisi…….66
7.3.3. Granül katkısının ısıl iletkenliğe etkisi……70
7.3.4. Granül katkısının mukavemete etkisi……..71
7.4. Cam Küre ve Granül Katkısının Alçı Matrisine Etkileri…….72
7.4.1. Cam küre ve granül katkısının yoğunluğa etkisi…….72
7.4.2. Cam küre ve granül katkısının ısıl iletkenliğe etkisi…….76
7.4.3. Cam küre ve granül kombinasyonunun mekanik dayanıma etkisi….76
7.5. Cam Küre, Granül ve SLS Katkısının Alçı Matrisine Etkileri…….77
7.5.1. Cam küre, granül ve SLS katkısının mikroyapı analizi……..77

7.5.2. Cam küre, granül ve SLS katkısının yoğunluğa etkisi……78
7.5.3. Cam küre, granül ve SLS katkısının ısıl iletkenliğe etkisi…….81
7.5.4. SLS katkısının ve kombinasyonların mekanik dayanıma etkisi……81
7.6. Üretilen Malzemelerin Akustik Performans Sonuçları……82
8. GENEL SONUÇLAR VE ÖNERİLER……85
KAYNAKÇA……..87
ÖZGEÇMİŞ

TABLOLAR DİZİNİ

Sayfa

Tablo 3.1. Anhidrit ile jibs minerallerinin özellikleri 9

Tablo 3.2. Taş yünü ve alçıpan malzemelerinin ısıl, akustik, mekanik özellikleri karşılaştırılması 20

Tablo 6.1. Alçı tozunun fiziksel ve teknik özellikleri 32

Tablo 6.2. K15 cam kürelerinin kimyasal bileşimleri..... 34

Tablo 6.3. K15 cam kürelerinin fiziksel ve teknik özellikleri 34

Tablo 6.4. Granül malzemeye ait BET ve t-plot analizi verileri 35

Tablo 6.5. Farklı katkı kombinasyonlarına sahip alçı numunelerinin numune kodları ve bileşen oranları 38

Tablo 6.6. Deneysel çalışmada kullanılan test yöntemleri ve amaçları 50

Tablo 7.1. Numunelere ait BET yüzey alanı sonuçları 55

Tablo 7.2. Cam küre katkılı numunelere ait BET yüzey alanı sonuçları 62

Tablo 7.3. Farklı katkı içeren numunelerin frekansa bağlı ses emme katsayısı değerleri 82

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 1.1. Ülkelere göre alçı ve sıva üretimi, 2015 2

Şekil 1.2. Cam küre ve granül takviyeli alçı malzemenin akustik ve termal performansı 3

Şekil 2.1. Kompozit Malzemelerde Isı Transfer Mekanizmaları 4

Şekil 2.2. Gözenekli kompozit malzemelerde ses dalgası sönümleme mekanizması 5

Şekil 2.3. Porlu malzemelerde çatlak ilerlemesi ve mikro çatlak etkileşimleri 6

Şekil 3.1. $CaSO_4xH_2O(x = 0.0\text{-}2.0)$'un farklı modifikasyonları 11

Şekil 3.2. Alçının hidrasyon süreci 12

Şekil 3.3. Sertleşmiş alçıların SEM görüntüleri: (a) α-alçısı, (b) β-alçısı 13

Şekil 3.4. Sıcaklık-zaman fonksiyonu ile hemihidrat hidrasyonu.....14

Şekil 6.1. Alçı tozu SEM görüntüsü 32

Şekil 6.2. K15 cam kürelerinin SEM görüntüsü 33

Şekil 6.3. K15 kırık cam küre SEM görüntüsü 34

Şekil 6.4. Granül SEM görüntüsü 36

Şekil 6.5. Sodyum lauril sülfat (SLS) kimyasal yapı görseli 37

Şekil 6.6. Numune hazırlık ve karakterizasyon akış şeması 42

Şekil 6.7. Termal kamera ve hot plate ile termal iletkenlik ölçümü deney düzeneği 46

Şekil 6.8. Empedans tüpünün şematik olarak gösterimi 48

Şekil 6.9. Basınç dayanımı testinin şematik gösterimi 49

Şekil 7.1. Kartonpiyer alçısı ve farklı oranlarda SLS katkısı içeren numunelerin sem görüntüleri. A) ticari kartonpiyer alçısı, b) %1 SLS katkılı numune, c) %2 SLS katkılı numune, d) %3 SLS katkılı numune 51

Şekil 7.2. SLS katkısının yoğunluğa etkisi 53

Şekil 7.3. SLS oranının malzeme yoğunluğuna etkisi 53

Şekil 7.4. SLS katkısının su emme oranına etkisi 54

Şekil 7.5. SLS katkısının hacim kütlesine etkisi 55

Şekil 7.6. SLS katkısının alçı malzemelerin maksimum basma dayanımına etkisi 56

Şekil 7.7. Cam küre katkılı numunelere ait SEM görüntüleri. A) %10 cam küre (CK10) katkılı numune, b) %30 cam küre (CK30) katkılı numune 57

Şekil 7.8. CK30 numunesine ait SEM görüntüsü ve Si ile S elementlerinin mikroyapıdaki dağılımını gösteren mapping analizi 58

Şekil 7.9. Cam küre (CK) katkısının yoğunluğa etkisi 59

Şekil 7.10. Cam küre oranının malzeme yoğunluğuna etkisi 60

Şekil 7.11. Cam küre katkısının su emme oranına etkisi 61

Şekil 7.12. Cam küre katkısının hacim kütlesine etkisi 62

Şekil 7.13. Cam küre (CK) katkısının sıcaklık dağılımına etkisi 63

Şekil 7.14. Cam küre katkısının alçı malzemelerin maksimum basma dayanımına etkisi 64

Şekil 7.15. Granül katkılı numunelere ait SEM görüntüleri. a) %10 granül (GN10) katkılı numune, b) %30 granül (GN30) katkılı numune 65

Şekil 7.16.GN30 numunesine ait SEM görüntüsü ve Si, Ca ile S elementlerinin mikroyapıdaki dağılımını gösteren mapping analizi 66

Şekil 7.17. Granül (GN) katkısının yoğunluğa etkisi 67

Şekil 7.18. Granül oranının malzeme yoğunluğuna etkisi 68

Şekil 7.19. Granül katkısının su emme oranına etkisi 69

Şekil 7.20. Granül katkısının hacim kütlesine etkisi 70

Şekil 7.21. Granül (GN) katkısının sıcaklık dağılımına etkisi 71

Şekil 7.22. Cam küre ve granül katkısının alçı malzemelerin maksimum basma dayanımına etkisi 72

Şekil 7.23. Cam küre ve granül katkısının yoğunluğa etkisi 73

Şekil 7.24. Cam küre-GN oranının malzeme yoğunluğuna etkisi 74

Şekil 7.25. Cam küre ve granül kombinasyonlarının su emme oranına etkisi 75

Şekil 7.26. Cam küre ve granül kombinasyonlarının hacim kütlesine etkisi 75

Şekil 7.27. Cam küre ve granül kombinasyonunun sıcaklık dağılımına etkisi 76

Şekil 7.28. Cam küre ve granül katkısının alçı malzemelerin maksimum basma dayanımına etkisi 77

Şekil 7.29. Cam küre ve granül kombinasyonu ile farklı SLS oranına sahip numunelere ait SEM görüntüleri. a) %40 cam küre, %20 granül ve %1 SLS (CK40-GN20-SLS1) katkılı numune, b) %40 cam küre, %20 granül ve %3 SLS (CK40-GN20-SLS3) katkılı numune 78

Şekil 7.30. SLS, cam küre ve granül katkısının yoğunluğa etkisi 79

Şekil 7.31. Cam küre, granül ve SLS kombinasyonlarının su emme oranına etkisi 80

Şekil 7.32. Cam küre, granül ve SLS kombinasyonlarının hacim kütlesine etkisi 80

Şekil 7.33. SLS ve Cam küre, granül ve SLS kombinasyonunun sıcaklık dağılımına etkisi 81

Şekil 7.34. Cam küre, granül ve SLS katkısının alçı malzemelerin maksimum basma dayanımına etkisi 82

Şekil 7.35. Cam küre, granül ve SLS katkısının alçı malzemelerin maksimum basma dayanımına etkisi 84

GÖRSELLER DİZİNİ

Sayfa

Görsel 3.1. Jibs alçı taşı görüntüsü 9

Görsel 3.2. Alçıpan görseli 17

Görsel 3.3. Alçıpan üretim aşamaları 18

Görsel 6.1. Alçı, cam küre ve granül karışımının hazırlanması için yapılan karıştırma işlemi..... 40

Görsel 6.2. Hazırlanan alçı karışımlarının döküm işlemi sonrası görünümü 40

Görsel 6.3. SEM analizinde kullanılan zeiss supra 50 vp cihazı 43

Görsel 6.4. Termal iletkenlik ölçümü için kullanılan test düzeneği görselleri 46

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

α	:	Alpha
β	:	Beta
SLS	:	Sodyum Lauril Sülfat
CK	:	Cam Küre
GN	:	Granül

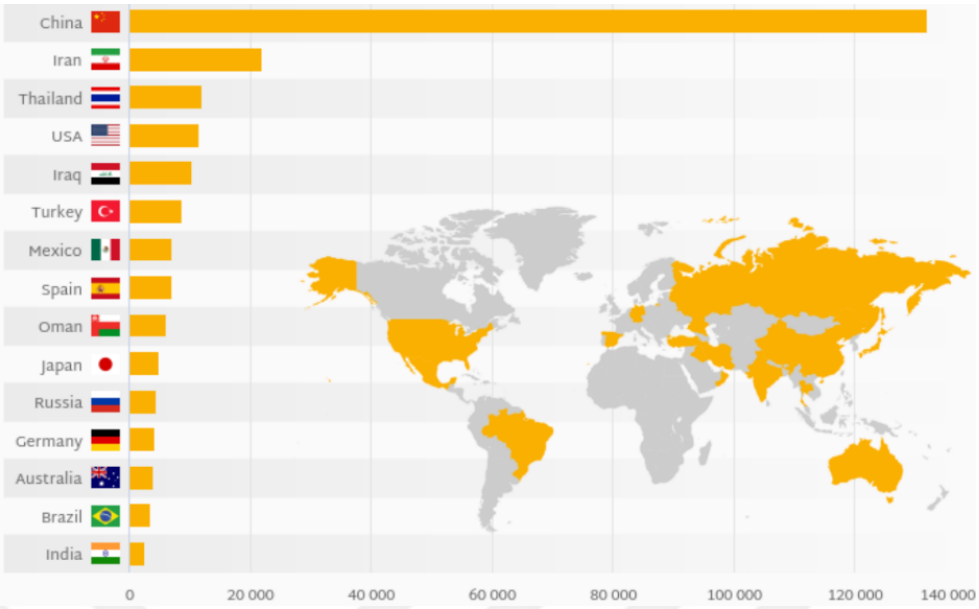
1. GİRİŞ

Artan nüfus ve kentleşme, enerji verimliliği sağlayan yapı malzemelerine olan ihtiyacı her geçen gün artmaktadır. Türkiye'de nihai enerji tüketiminin yaklaşık %31'i konutlarda kullanılmaktadır. Bu tüketimin önemli bir kısmı olan %40'ı, ısıtma için harcanmaktadır. Bu veriler, binalarda enerji tasarrufu sağlamak ve enerji verimliliğini artırmak amacıyla alınacak önlemlerin önemini açıkça göstermektedir. Yapılarda enerji tüketiminin azaltılması sadece ekonomik tasarruf sağlamakla kalmamakta aynı zamanda sürdürülebilir çevre politikalarına da katkıda bulunmaktadır. Bu kapsamda, özellikle ısıl konforun sağlanmasında kullanılan yalıtım malzemeleri büyük bir öneme sahiptir. Yalıtım malzemeleri sadece ısıyı değil aynı zamanda sesi ve nemi kontrol ederek binalara birçok fayda sağlamaktadır.

Türkiye'de binalarda enerji verimliliğini artırmak için sıklıkla iç ve dış yalıtımına başvurulur. Bu sayede enerji kayıpları %25 ile %50 arasında azalarak, ısıtma ve soğutma ihtiyacı düşmektedir [2]. Bu tür uygulamalar yalnızca enerji maliyetini düşürmekle kalmayıp aynı zamanda karbon salınımının azalmasına önemli ölçüde katkı sağlamaktadır. Enerji tüketimini düşürmek amacıyla geliştirilen yalıtım malzemeleri, yapısal özellikleri sayesinde sıcaklık dengesini koruyabilmektedir. Bununla birlikte, bu malzemeler inşaat sektöründe hem ekonomik hem de sürdürülebilirlik açısından önemli bir yere sahiptir.

Bu bağlamda, enerji tasarrufu ve sürdürülebilirlik hedeflerini gerçekleştirmek için yenilikçi yalıtım malzemelerinin geliştirilmesi ve etkin bir şekilde uygulanması gerekmektedir. Türkiye gibi enerji ithalatına bağımlı ülkelerde, bu tür malzemelerin kullanımı enerji güvenliği açısından bir öneme sahiptir. Yalıtım malzemelerinin sağladığı ekonomik ve çevresel faydalar, bu malzemelerin yapı sektöründeki vazgeçilmezliğini göstermektedir [1].

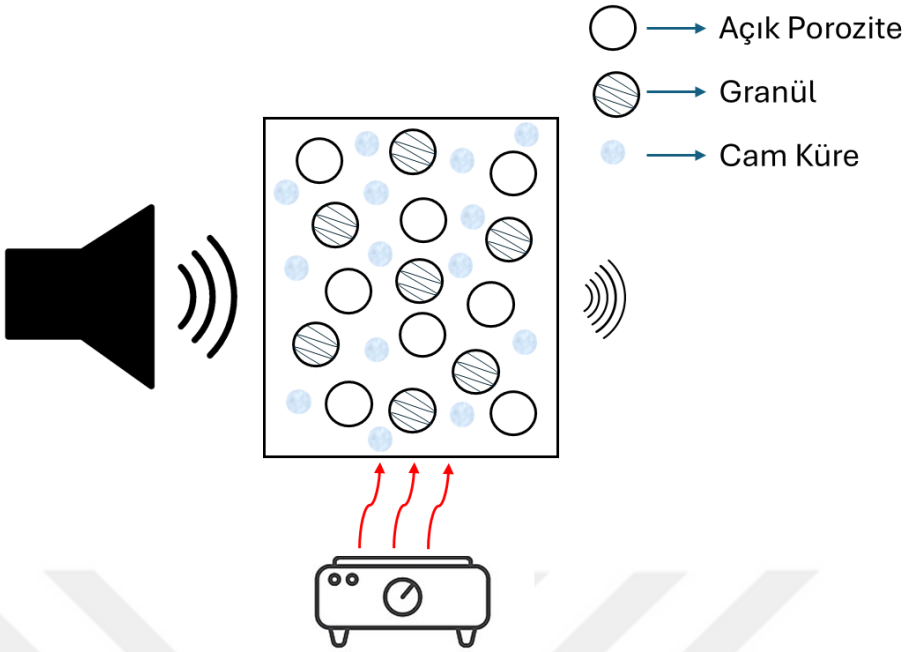
Türkiye, zengin alçı rezervleri ile dünya genelinde önemli bir konumdadır. Bu kaynaklar yüksek saflık oranlarıyla inşaat sektöründe geniş bir kullanım alanına sahiptir. Ülkemizdeki alçı yatakları %95-99 gibi yüksek saflık oranlarına sahiptir. Bu durum alçının yapı malzemesi olarak tercih edilmesine yol açmaktadır. Yalıtım malzemeleri, enerji tüketimini %30-50 oranında azaltarak ekonomik ve çevresel faydalar sunar ayrıca karbon emisyonlarını azaltarak çevreye de olumlu katkı sağlar [2].



Şekil 1.1. *Ülkelere göre alçı ve sıva üretimi, 2015 [3].*

Yalıtım malzemelerinde en çok aranan özellikler termal iletkenlik, ses yalıtımı, esneklik, mekanik dayanım, yangına karşı direnç, duman yayılımı, iklim koşullarına uyum sağlama, donmaya ve çözülmeye karşı direnç ve maliyettir. Ayrıca malzemenin üretimi sırasında harcanan enerji ve çevresel etkiler de yalıtım performansını değerlendirirken dikkate alınması gereken faktörler arasında yer almaktadır [4].

Bu özellikler göz önüne alındığında alçı malzemesi öne çıkmaktadır. Alçı, doğal gözenekli yapısı ve düşük termal iletkenlik özellikleriyle sadece sürdürülebilir bir yapı malzemesi olmasıyla beraber yangına karşı dayanıklılık, çevre dostu olma özellikleriyle de öne çıkarmaktadır. Alçı kompozitleriyle yapılan yalıtım çözümleri, enerji verimliliğini destekleyerek bina sektöründe maliyet etkinliği ve çevresel sürdürülebilirlik sağlar. Bu tür yenilikçi kompozit malzemeler, yapıların uzun vadeli enerji maliyetlerini düşürerek enerji kaynaklarının daha verimli kullanılmasına olanak tanır.



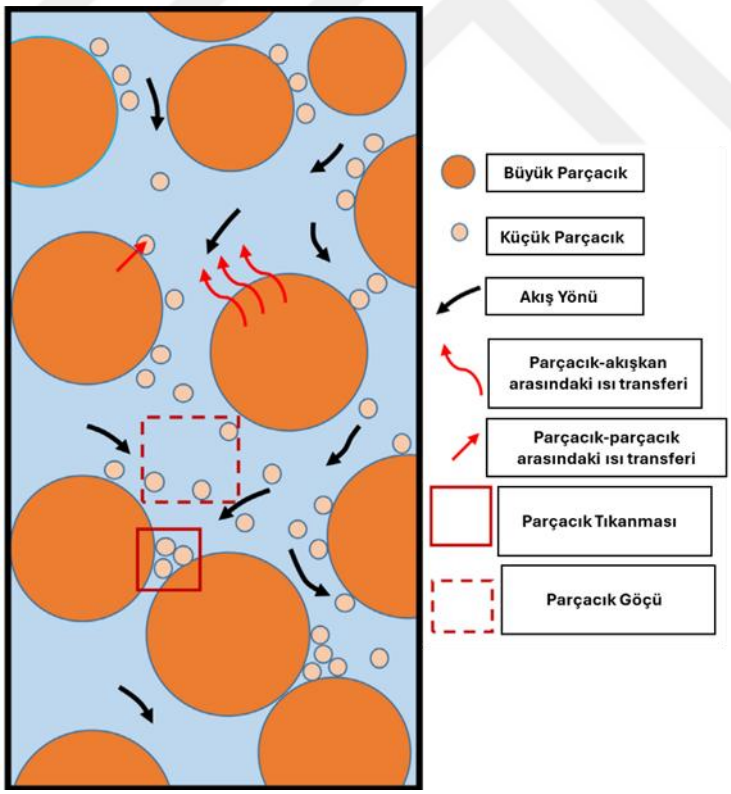
Şekil 1.2. *Cam Küre ve Granül Takviyeli Alçı Malzemenin Akustik ve Termal Performansı.*

Tezin amacı görsel 1.2, cam küreler ve granüllerle takviye edilmiş alçı esaslı bir malzemenin akustik ve termal performansını temsil etmektedir. Malzeme, ses dalgalarını emerek veya dağıtarak akustik yalıtımı artırmayı, aynı zamanda termal iletkenliği kontrol ederek yalıtım özelliği kazandırmayı amaçlamaktadır. Görselin merkezinde, malzeme yapısı cam küreler ve granüllerle birlikte alçı matrisi içinde gösterilmiş olup, cam küreler sesin malzeme içinde dağılmasını sağlarken granüller ses emilimini artırarak akustik performansa katkı sağlar. Ayrıca, granüller mekanik dayanımı desteklerken cam küreler malzemenin hafif yapısını korur. Alttan uygulanan sıcaklık, malzemenin termal yalıtım özelliklerini simgelerken ses dalgalarının malzeme üzerindeki etkisi görselde açıklanmıştır.

2. ISI VE SES İLETİM MEKANİZMALARI

2.1. Isı İletim Mekanizmaları

Isı iletimi, atomların titreşim enerjilerinin komşu atomlara aktarılmasıyla gerçekleşir. Bir malzemenin termal iletkenliğini belirler. Metal gibi kristal yapılı malzemelerde, serbest elektronlar bu enerjiyi çok hızlı bir şekilde taşır bu nedenle metaller yüksek termal iletkenlik değerlerine sahiptir [5]. Düzensiz veya amorf yapıya sahip malzemelerde ısı transferi daha yavaştır çünkü atomik titreşimler enerji aktarımını sınırlar. Ayrıca, malzeme içindeki gözenekler ve boşluklar, ısı transferini yavaşlatan bariyerler oluşturur. Isı iletimi mekanizması, yalnızca atom titreşimlerinden değil, aynı zamanda foton hareketlerinden ve malzemenin yapısındaki mikro seviyedeki heterojenliklerden de etkilenir [6]. Kompozit malzemelerde bu mekanizma daha karmaşık bir yapı sergiler. Matris fazı ile bu faz içinde homojen ya da heterojen şekilde dağılan takviye fazları, ısı transfer sürecini doğrudan etkiler.

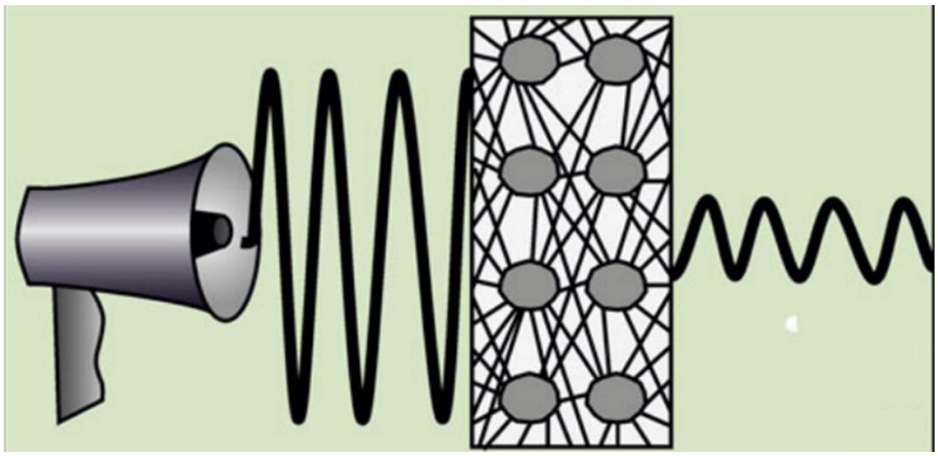


Şekil 2.1. *Kompozit Malzemelerde Isı Transfer Mekanizmaları [6].*

Şekil 2.1'de gösterildiği gibi ısı transferi hem parçacık-parçacık temasıyla hem de matris-akışkan arasında gerçekleşen enerji alışverişi yoluyla sağlanır. Kırmızı oklar, parçacık ve akışkan arasındaki enerji transferini gösterirken siyah oklar ise akışkanın hareket yönünü göstermektedir. Ayrıca, parçacık tıkanması (particle clogging) ve parçacık göçü (particle migration) gibi süreçler, ısı iletiminin homojenliğini etkileyen önemli faktörlerdir. Bu tür mekanizmaların anlaşılması, kompozit malzemelerin termal performansını optimize etmek ve enerji kaybını minimize etmek için kritik öneme sahiptir [6].

2.2. Ses İletim Mekanizması

Ses iletimi, bir malzeme içerisinde titreşimlerin dalga formunda yayılmasıyla gerçekleşir. Bu süreç, malzemenin yoğunluğu, elastik modülü ve iç yapısındaki homojenlik ile doğrudan ilişkilidir. Malzemelerde ses dalgalar moleküllerin titreşimiyle hareket eder ve bu dalgaların iletim hızı, malzemenin atomları arasındaki bağ kuvvetine bağlıdır. Yoğun ve homojen malzemeler, bu bağlar boyunca enerji aktarımını hızlı ve kesintisiz bir şekilde gerçekleştirir. Bu nedenle ses iletim hızları yüksektir fakat gözenekli veya lifli malzemelerde ise ses dalgaları, malzeme içindeki düzensizlikler ve boşluklarla karşılaşır, bu da enerjinin bir kısmının emilmesine veya dağılmasına neden olur. Bu tip malzemelerde yansıma, sönümleme ve saçılma mekanizmaları öne çıkar ve ses enerjisinin iletimi sınırlandırılır [8].



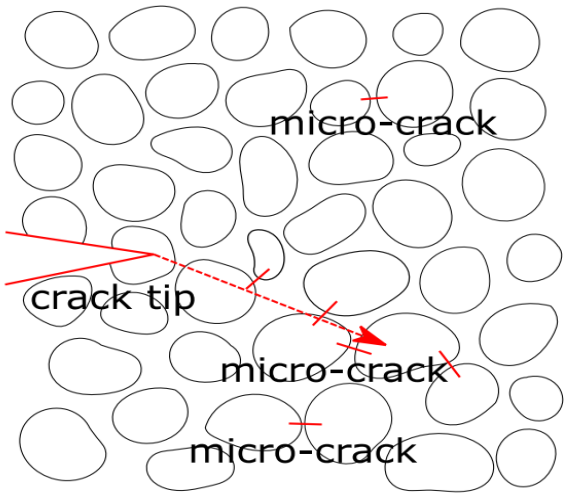
Şekil 2.2. *Gözenekli Kompozit Malzemelerde Ses Dalgası Sönümleme Mekanizması [7].*

Şekil 2.2, gözenekli kompozit malzemelerin ses dalgaları üzerindeki etkisini göstermektedir. Görselin sol tarafında malzeme ile etkileşime girmeden önceki ses

dalgası görülmektedir. Bu dalga, kompozit malzeme içerisinden geçerken enerji kaybına uğrar ve zayıflar. Bu süreç, malzeme içindeki açık ve kapalı gözenekler sayesinde gerçekleşir. Malzeme içindeki enerji sönümleme mekanizmaları, ses dalgasının enerjisini emerek çıkıştaki dalganın genliğini azaltır. Görselin sağ tarafında ise kompozit malzemeden çıkan ses dalgası görülmektedir. Kompozit malzemeden çıkan dalga malzemeye giren dalgaya göre hem genlik hem de enerji açısından azalmış durumdadır. Bu durum, kompozit malzemenin ses yalıtımı ve akustik kontrol uygulamalarında etkili bir şekilde kullanılabileceğini göstermektedir.

2.3. Mekanik Dayanıklılık Mekanizması

Mekanik dayanıklılık, bir malzemenin dış kuvvetler altında deformasyon veya kırılmaya karşı gösterdiği dirençtir ve malzemenin mikro yapısıyla doğrudan ilişkilidir. Katı bir malzeme üzerindeki kuvvet atomlar arasındaki bağlara aktarılır ve bu bağlar kuvveti dağıtarak deformasyonu sınırlandırır. Homojen ve yoğun malzemeler, atomlar arasındaki bağ kuvvetinin yüksek olması nedeniyle daha fazla dayanım gösterir. Ancak, malzeme içindeki boşluklar, çatlaklar ve düzensizlikler mekanik dayanıklılığı zayıflatır. Çatlaklar, genellikle stresin yoğunlaştığı noktalarda başlar ve uygun bir yapısal direnç sağlanmadığında hızla yayılır. Bir malzemenin mekanik dayanımı, çekme, basma ve eğilme gibi farklı yükleme türlerine karşı incelenir ve bu özellik, malzemenin mikro yapısındaki bağların kuvvetiyle belirlenir [9], [10].



Şekil 2.3. *Porlu malzemelerde çatlak ilerlemesi ve mikro çatlak etkileşimleri.*

Şekil 2.3 porlu malzemelerde çatlak ilerleme mekanizmasını ve mikro çatlakların bu süreçteki etkisini açıklamaktadır. Porlu malzemeler, iç yapılarında gözenekler ve mikro çatlaklar içeren özel bir mikro yapıya sahiptir ve bu özellikler mekanik dayanımlarını doğrudan etkiler. Şekil 2.3 ana bir çatlağın (crack tip) ilerlerken mikro çatlaklarla (micro-cracks) etkileşime geçtiği ve bu etkileşim sonucunda çatlak ucunun yön değiştirdiği veya enerjisinin dağıldığı gösterilmektedir. Mikro çatlaklar, çatlak ucunu saptırarak veya enerjiyi absorbe ederek çatlak ilerleme hızını yavaşlatır. Bu süreç, malzemenin kırılma direncini artıran ve enerji sönümleme kapasitesini yükselten bir mekanizma sağlar. Gözenekler ve mikro çatlaklar, çatlak enerjisinin malzeme içinde homojen bir şekilde dağılmasını sağlayarak mekanik dayanıklılığın artmasına katkıda bulunur.

3. ALÇI VE ALÇIPAN HAKKINDA GENEL BİLGİLER

3.1. Alçı Hammaddesi Alçı Taşı

Ca^{2+} ve SO_4^{2-} iyonlarının birleşimiyle oluşan ve bazen oluştuğu ortama göre su içerebilen mineral grubuna halk arasında veya ticarette, mineral farklılıkları göz önüne alınmaksızın genel olarak "alçıtaşı" adı verilmektedir [11]. Alçı, çoğunlukla jips adı verilen bir kayaç türünden elde edilirken, bazı özel alçı türleri ise anhidrit ($CaSO_4$) kayasından üretilir. Alçıtaşı terimi yaygın olarak jipsi ifade etmektedir. Jips ve anhidrit, aynı doğal ortamlarda bir arada bulunabilir ve ortamdaki basınç ve suyun etkisiyle birbirlerine dönüşebilirler [12].

3.1.1. Anhidrit

Anhidritler, yapısında su molekülü içermeyen kalsiyum sülfattan ($CaSO_4$) oluşan minerallerdir ve su molekülü içeren jipsten farklıdır. Anhidrit genellikle yüksek tuzluluk ve kuru koşulların kristalleşmesini sağladığı deniz havzaları gibi buharlaşmanın yoğun olduğu ortamlarda oluşur. Düşük çözünebilirliği sayesinde yapı sektöründe çeşitli uygulamalarda kullanılır. Örnek olarak çimento bileşeni ve kompozit malzemelerde dolgu maddesi olarak tercih edilmektedir. Jipsten farklı olarak anhidritler neme maruz kaldığında şişmez veya hacim değiştirmez. Bu da boyutsal kararlılık gerektiren uygulamalarda kullanılabilirliğini arttırmaktadır [13].

Anhidritin jipse dönüşme süreci, genellikle su ile meydana gelir ve jeolojik koşullar altında doğal olarak gerçekleşir. Bu dönüşüm, daha yoğun ve stabil bir malzeme oluşturur ve çeşitli endüstriyel uygulamalarda kullanılır. Anhidrit, sıklıkla halit, jips ve diğer evaporit mineralleriyle birlikte tortul kayaç oluşumlarında bulunur. Dayanıklılığı ve mekanik kararlılığı sayesinde zemin kaplamaları, duvar panelleri, inşaat ve tarım alanında kullanımları artmıştır [14].

3.1.2. Jips

Jips olarak da bilinen alçı, kalsiyum sülfat dihidrat ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$) içeren yumuşak bir sülfat mineralidir. Genellikle tuz düzlükleri, lagünler ve yüksek tuzluluğa sahip havzalar gibi buharlaşma ile oluşan tortul ortamlarda kristalleşir (Merrill, 2018). Jipsin sertliği Mohs ölçeğine göre 2'dir ve yoğunluğu yaklaşık olarak 2,2 ila 2,4 gr/cm³ arasında değişir. Jipsin susuz formu olan anhidrit ise ortorombik kristal yapıda bulunur ve daha

yüksek bir sertlik ve yoğunluk gösterir; Mohs sertlik değeri 3-3,5, yoğunluğu ise 2,7 ila 3 gr/cm³ arasındadır. Bu sertlik ve yoğunluk farkı, makroskopik incelemelerde jips ve anhidriti ayırt etmek için önemli bir kriter olarak kullanılır [17].

Modern ticari jipsler masif yapılı, ince kristalli, kompakt ya da taneli bir kaya özelliği gösterir. Saf durumda beyaz renkte görünür fakat içeriğindeki organik maddeler ve kil veya demir oksit bulunduğunda gri, mavimsi gri, pembe veya sarı renge dönüşebilir. Ekonomik açıdan değer taşıyan alçıtaşları genellikle 1-1,5 metreden başlayıp 100 metreye kadar ulaşabilen kalınlıklarda, sedimanter yapıdaki katmanlar halinde bulunur. Alçı üretimi için kullanılan jips, teorik olarak %32,5 CaO, %46,6 SO_3 ve %20,9 oranında kristal su içerirken; anhidrit %41,2 CaO ve %58,8 SO_3 içermektedir. Ancak, doğada bu saflıkta bulunmaları nadirdir ve çoğunlukla belirli miktarlarda yabancı maddelerle birlikte yer alır [15], [18].

Görsel 3.1 *Jibs alçı taşı görüntüsü [16].*

Tablo 3.1. *Anhidrit ile jibs minerallerinin özellikleri.*

Özellik	Anhidrat	Jips
Kimyasal Bileşimi	$CaSO_4$	$CaSO_4.2H_2O$
Kristal Sistemi	Ortorombik	Monoklinik
Kristal Biçimi	Masif, tanelsel, lifsi yapılı	İnce-kalın, kısa-uzun, iğnemsi, lifsi yapılı
Renk	Beyaz, gri, mavimsi	Renksiz beyaz, şeffaf
Sertlik	3,5 (Mohs)	2 (Mohs)

3.2. Alçı Kristal Yapısı

Alçı taşının temel bileşeni jips olarak bilinen kalsiyum sülfat dihidrat ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$) mineralidir. Bu mineralden kademeli olarak su uzaklaştırılabilir. Böylelikle uzaklaştırılan su tekrar alınarak katılaşır. Bu katılaşmaya kadar olan sürece prizlenme adı verilir. Alçının içeriğindeki suyun bir kısmı kaybedildiğinde hemihidrat, tamamı kaybedildiğinde ise anhidrit adı verilen yapı oluşur [19]. Formül 3.1 ve 3.2 de hemihidrat ve anhidrat oluşum dereceleri ve denklemleri verilmiştir [20].

Hemihidrat (120°C - 160°C)

$$CaSO_4 \cdot 2H_2O \rightarrow CaSO_4 \cdot \tfrac{1}{2} H_2O + 3/2\ H_2O \tag{3.1}$$

Anhidrit (190°C)

$$2(CaSO_4 \cdot \tfrac{1}{2} H_2O) \rightarrow 2CaSO_4(III) + H_2O \tag{3.2}$$

Alçı taşına kalsinasyon işlemi uygulandığında, belirli sıcaklıklarda yapısında değişiklikler meydana gelir. İlk olarak, alçı taşı yaklaşık 95°C'de bünyesindeki suyun üçte birini kaybederek yarı hidrat (hemihidrat) formuna geçer. Sıcaklık 160-165°C'ye yükseldiğinde bu dönüşüm endotermik bir tepkiyle devam eder ve 175°C'ye kadar çıkıldığında su kaybı olur. 175-230°C aralığında, alçı taşındaki su miktarı iyice azalır ve hekzagonal anhidrit (Anhidrit III) yapısına dönüşür. Bu aşamada, yapı oldukça az miktarda su içerir [22].

(Hekzagonal Anhidrit (Anhidrit III))

$$CaSO_4 \cdot 1/2\ H_2O \rightarrow CaSO_4(III) + 1/2\ H_2O\ (175 - 230\ ^\circ C) \tag{3.3}$$

(Rombohedral Anhidrit (Anhidrit II))

$$CaSO_4(III) \rightarrow CaSO_4(II)\ (340 - 440\ ^\circ C) \tag{3.4}$$

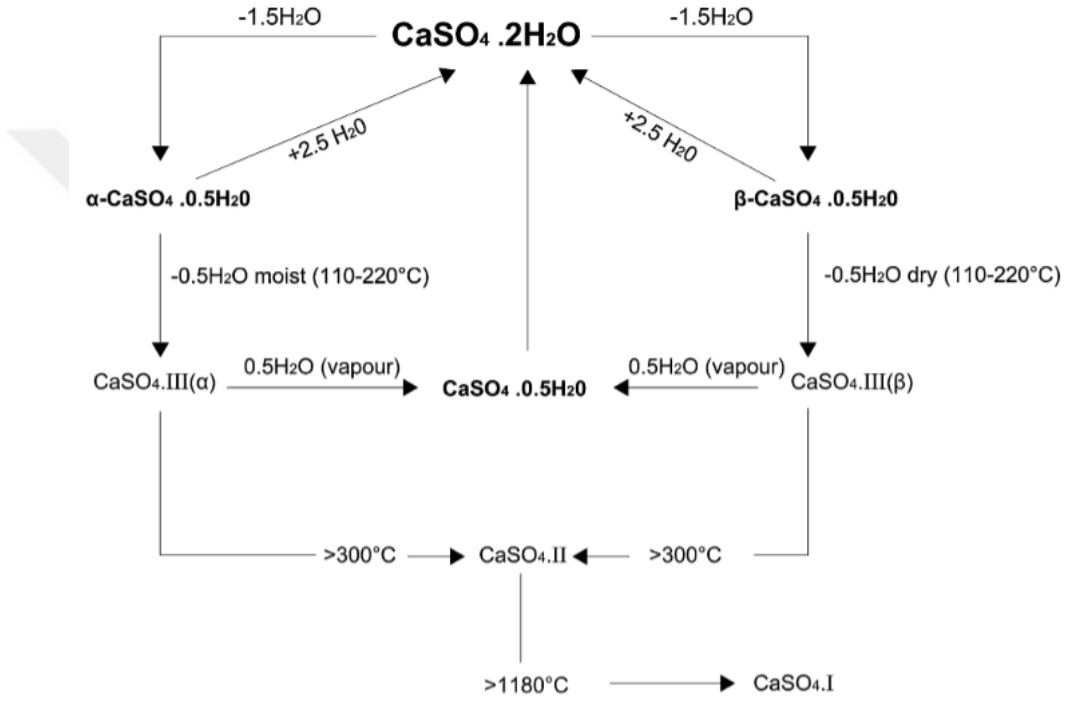
(Anhidrit I)

$$CaSO_4(II) \rightarrow CaSO_4(I)\ (850 - 900\ ^\circ C) \tag{3.5}$$

Sıcaklık 340-440°C'ye ulaştığında, bir diğer endotermik dönüşüm gerçekleşir. Yapı rombohedral anhidrit (Anhidrit II) formuna geçerek çözünmez bir yapıya bürünür. Bu aşamada, alçı ortorombik kristal yapısı kazanır ve çözünmez anhidrit olarak bilinir. Kalsinasyon sürecinde sıcaklık 850-900°C gibi yüksek değerlere ulaştığında ise alçı taşı

Anhidrit I yapısına dönüşür. Bu yüksek sıcaklık formu, alçının stabil yapılarından biridir [22]. Şekil 3.1'de $CaSO_4xH_2O(x = 0.0\text{-}2.0)$'un farklı modifikasyonları gösterilmiştir.

Kalsinasyon işleminin aşamalarındaki bu farklı sıcaklık aralıkları, alçı taşının iç yapısındaki değişimleri yönetir. Bu nedenle kalsinasyon sırasında uygulanan sıcaklık ve süreler alçının kullanılacağı alanlara göre özelleştirilir. Düşük sıcaklıklarda üretilen hemihidrat yapılar, döküm ve yapı malzemelerinde tercih edilirken daha yüksek sıcaklıklarda elde edilen anhidrit formlar daha dayanıklı ve kararlı yapılarda tercih edilir.



Şekil 3.1. *$CaSO_4xH_2O(x = 0.0\text{-}2.0)$'un farklı modifikasyonları [21].*

Alçının su ile reaksiyona girip katılaşma süreci olan hidratasyon, birkaç aşamadan oluşmaktadır. Bu süreçte alçının mikroyapısında önemli değişiklikler meydana gelir. Hidratasyon hızlı bir reaksiyon olarak başlar ve sürecin sonunda, hemihidrat yapının çözünmesi ile dihidratın kristalleşmesi gerçekleşir. Bu süreçte, hemihidrat su ile çözünür ve ardından dihidratın kristalleşmesiyle sert yapı oluşmaya başlar. Bu aşamada "çekirdeklenme" adı verilen süreç, alçının sertleşen yapısının temelini oluşturur [23].

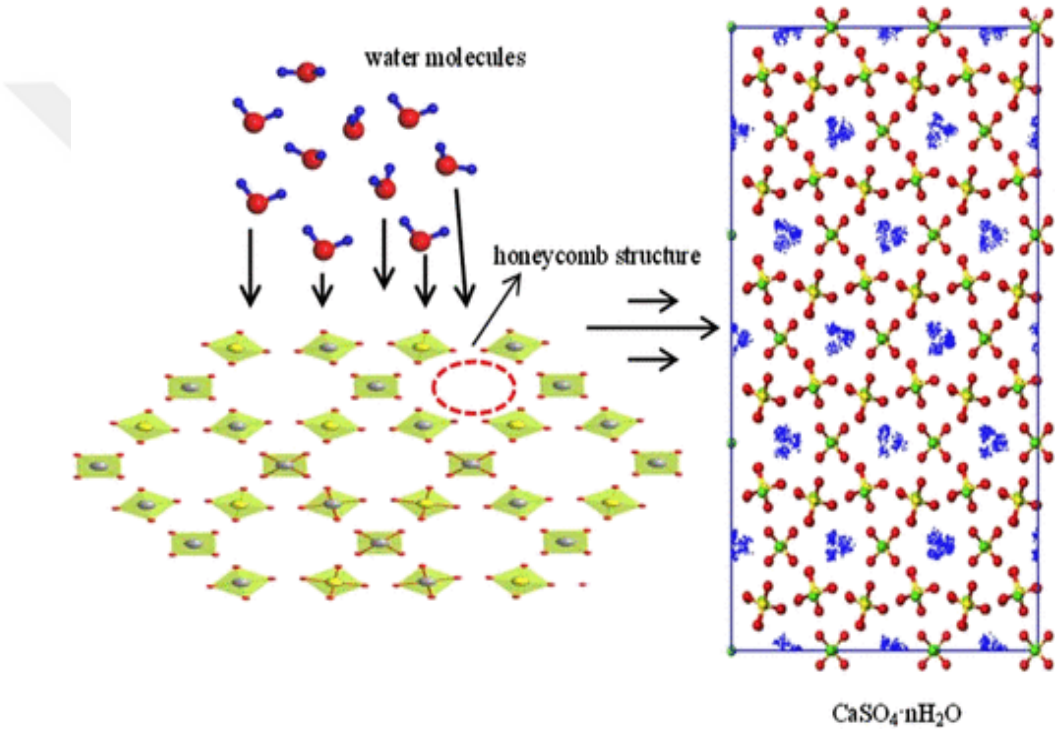
Hidratasyon süreci sırasında gerçekleşen reaksiyon:

$$CaSO4 \cdot 0.5H2O + 1.5H2O \rightarrow CaSO4 \cdot 2H2O \quad (3.6)$$

Şekil 3.2' te görüldüğü gibi alçının kullanılabilir hale gelmesi için su ile reaksiyona girmesi gerekir. Bu sırada kristal su alarak katılaşmaya başlar ve bu olay hidratasyon

sürecinin bir parçasını oluşturur. Bu reaksiyon sırasında, alçı su ile birleştiğinde sıvı hale gelir ve "priz başlangıcı" adı verilen aşamaya geçer. Katılaşma süreci tamamen sona erdiğinde "priz sonu" olarak adlandırılır ve bu noktada hidratasyon süreci tamamlanır. Reaksiyon sırasında açığa çıkan ısı nedeniyle sıcaklıkta hafif bir artış olur ve bu artış hidratasyonun sona erdiğini işaret eder [25].

Hidratasyon süreci, kullanılan su miktarına bağlıdır ve fazla su kullanımı alçının priz süresini uzatarak katılaşma hızını yavaşlatır. Süreç boyunca fazla suyun buharlaşmasıyla hacimde küçülme meydana gelir [28].



Şekil 3.2. *Alçının hidrasyon süreci [23].*

3.3. Alçı Tipleri

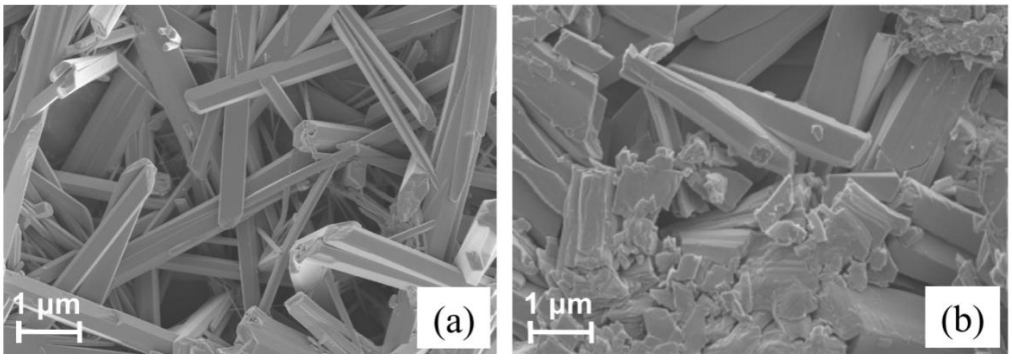
Alçı üretimi, alçı taşının kalsinasyon sürecinden geçirilmesiyle farklı özelliklere sahip ürünler elde edilerek yapılır. Bu süreçte, sıcaklık ve koşullara göre beta hemihidrat (β-HH) ve alfa hemihidrat (α-HH) alçı çeşitleri elde edilir. Bu iki farklı alçı türü, hem kristal yapıları hem de mekanik özellikleri açısından farklılık gösterir ve farklı kullanım alanlarına sahiptir [29].

3.3.1. Alfa tipi alçı

Alfa hemihidrat ise yüksek basınç altında, otoklav adı verilen kapalı sistemlerde üretilir. Bu yöntem, daha dayanıklı ve yoğun bir kristal yapının oluşmasını sağlar. Alfa hemihidrat, özellikle dayanıklılık gerektiren dental ve seramik kalıplarda tercih edilir. Üretim genellikle 180°C sıcaklıkta yapılır bu sayede sıkı ve düzgün bir iç yapı elde edilir. Alfa hemihidrat, dayanıklılık ve düşük gözeneklilik gibi özelliklere sahiptir. Bu nedenle daha spesifik uygulamalarda kullanılır [21].

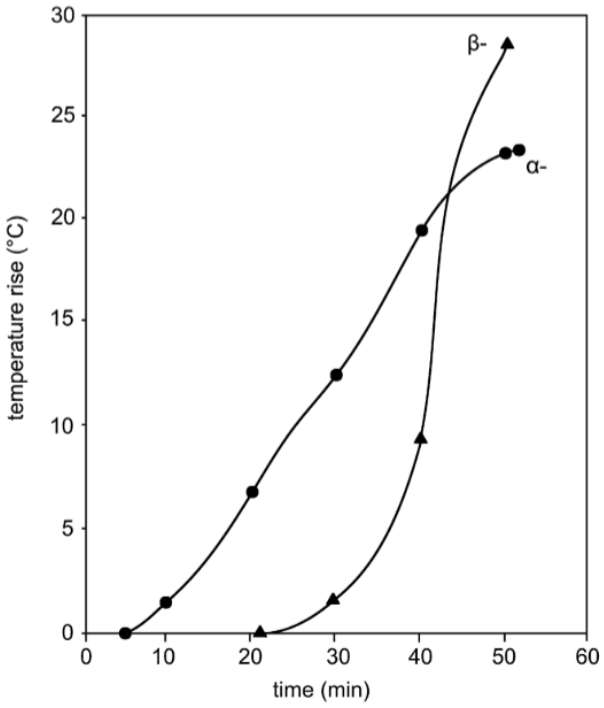
3.3.2. Beta tipi alçı

Genellikle açık sistemlerde daha düşük sıcaklık aralıklarında üretilen beta hemihidrat, kristal yapısının gözenekli yapısı nedeniyle suya karşı daha fazla geçirgenlik ve daha düşük mekanik dayanıklılık göstermektedir. Bu tür alçılar, yaklaşık 120°C sıcaklıkta üretilir. Yüksek yüzey alanı ve gözenekli yapısı nedeniyle beta hemihidrat tipi alçılar sıva ve döküm işleri gibi uygulamalarda yaygın olarak kullanılır. Üretimde kullanılan alçı taşının yapısına ve doğasına göre sıcaklık değişiklik gösterebilir [21].



Şekil 3.3. *Sertleşmiş alçıların SEM görüntüleri: (a) α-alçsıı,; (b) β-alçısı [26].*

İki hemihidrat formunun hidrolik aktivitesini karşılaştırmak amacıyla, Lewry ve Williamson farklı deneysel teknikler kullanarak hidratasyon sürecini araştırdılar [49]. Su/alçı (w/p = 0.6) karışımının sıcaklık değişimlerini zamanla ölçtüler ve iki hemihidrat yapısının bazı farklılıklarla benzer şekilde davrandığını buldular. Şekil 3.5'de alfa-hemihidratın hidratasyon indüksiyon süresi beta-hemihidrattan daha kısadır ancak daha sonra beta-hemihidrat daha hızlı hidrasyon gösterir. Bu durum, beta-hemihidratın, daha fazla kristalleşme çekirdeği sağlayan daha yüksek yüzey alanına sahip olmasından kaynaklanmaktadır [21].



Şekil 3.4. *Sıcaklık-zaman fonksiyonu ile hemihidrat hidrasyonu [21].*

3.4. Alçının Özellikleri

3.4.1. Alçının mekanik özellikleri

Alçı hafifliği ve poroziteye bağlı mekanik özellikleri ile dikkat çeken bir yapı malzemesidir. Alçı kristalleri genellikle kalsiyum sülfat dihidrat ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$) formunda, birbirine entegre olmuş iğne benzeri bir yapı oluşturur. Porozite oranı %70'e kadar çıkabilen bu malzeme, açık hücreli bir köpük olarak değerlendirilebilir. Araştırmalar, alçının elastik modülü, eğilme mukavemeti ve kırılma tokluğunun toplam porozite ile ters orantılı olduğunu göstermektedir. Ayrıca, kristal ağ yapısının homojenliği ve kristaller arası bağlanma, malzemenin mekanik özelliklerinde önemli iyileşmeler sağlayabilmektedir [24] [30]. Alçının mukavemetini etkileyen en önemli etmen su/alçı oranıdır. Alçıda su/alçı oranında su oranı ne kadar artarsa gözeneklilik artar ve suyun yüzeyden buharlaşarak çıkması sonucunda alçının yüzey gerilimi artar. Alçının yüzey gerilimi arttıkça mukavemeti düşer. Genellikle mukavemeti arttırmak için alçıya bazı katkılamalar yapılır. Çoğunlukla yapılan katkılamalarla alçının mukavemeti değişmektedir.

3.4.2. Alçının ısı yalıtım özelliği

Alçı, düşük ısıl iletkenlik değerleri sayesinde etkili bir ısı yalıtım malzemesidir. Gözenekli yapısı, ısı transferini engelleyerek iç mekânlarda sıcaklık dengesinin korunmasına katkıda bulunur. Bu özellik, enerji verimliliğini artırarak binalarda enerji maliyetlerinin azaltılmasını sağlar. Alçının ısıl iletkenlik değeri TS 825 standardına göre 0.18 ila 0.43 W/mK arasında değişmektedir. Bu değer alçıyı enerji tasarrufu sağlamak için uygun hale getirir [27]. Alçı kullanımı, kış aylarında sıcaklık kaybını azaltarak daha sıcak bir ortam yaratırken, yaz aylarında ise aşırı ısınmayı engeller. Böylece iç mekân konforuna katkı sağlar.

3.4.3. Alçının ses yalıtımı özelliği

Alçı, gözenekli yapısı sayesinde ses yalıtımına katkı sağlayan bir malzemedir. Gözenekli yapısı gelen ses dalgalarının bir kısmını soğurarak ses enerjisinin kaybolmasına neden olur. Ayrıca, alçının yoğunluğu ve uygulama kalınlığı ses yalıtımı performansını etkileyen önemli faktörlerdir. İnce ve homojen bir tabaka şeklinde uygulandığında, sesin yansımasını ve geçişini azaltarak akustik performansı artırabilir. Bununla birlikte, alçı doğrudan bir ses sönümleyici malzeme olmaktan çok sesin geçişini sınırlayan ve diğer yalıtım malzemeleriyle birlikte daha etkili sonuçlar veren bir yapıya sahiptir. Alçının bu özellikleri, özellikle duvar kaplamalarında ve tavan uygulamalarında kullanılmasını yaygın hale getirmiştir [23].

3.5. Alçının Avantajları

Alçı, inşaat sektöründe yaygın olarak kullanılan çok yönlü bir malzemedir ve sahip olduğu özellikler sayesinde yapı projelerine önemli avantajlar sağlar. Düşük pişirme sıcaklığı (90-200°C) ve kolay öğütülebilir olması sayesinde alçının üretimi çimento gibi diğer yapı malzemelerine kıyasla daha az enerji gerektirir. Örneğin bir ton alçı üretmek için yaklaşık 30 litre yakıt tüketilirken, aynı miktarda çimento için bu miktarın beş katına kadar enerji harcanır. Bu durum, enerji tasarrufunun yanı sıra sürdürülebilirliğe de katkıda bulunur. Ayrıca, doğada bol miktarda bulunması alçıyı ekonomik bir seçenek haline getirir [32].

Yangına karşı koruma sağlama alçının öne çıkan özelliklerinden biridir. Alçı, bünyesinde yüksek miktarda su barındırır ve yangın sırasında bu suyu buharlaştırarak

ortamdan ısı emer. Bu süreç sırasında alçının yüzeyinde kavrulmuş bir tabaka oluşur ve bu tabaka alttaki sıvanın ısınmasını engelleyerek ısı yalıtımı sağlar. Alçı A sınıfı yanmaz malzemeler grubunda yer alır. Böylece yangına dayanıklı yapılar oluşturmak için ideal bir seçenektir.

Isı ve ses yalıtım alçının etkili özelliklerindendir. Gözenekli yapısı sayesinde ses dalgalarını sönümler. Akustik kontrolün önemli olduğu büyük binalarda, konser salonları ve toplantı odaları gibi alanlarda tercih edilir. Alçı, yapısal olarak düşük ısı iletkenliğine sahip olduğu için iç mekânların sıcaklık düzenlemesine yardımcı olur.

Alçının nem düzenleyici özellikleriyle de dikkat çeker. Kapalı ortamlarda alçı, ortamın bağıl nem seviyesini dengeler. Nem fazla olduğunda bu nemi emer ve nem azaldığında ise bünyesindeki nemi ortama geri verir. Bu özelliğiyle alçı, binaların iç mekânlarında yoğuşma sorununu azaltır ve özellikle kaloriferli evlerde sağlıklı yaşam koşullarının sağlanmasına katkı sunar.

Alçının yapısal hafifliği, deprem gibi doğal afetlerde güvenliği artıran bir diğer avantajdır. Alçı diğer yapı malzemelerine göre daha düşük yoğunlukta olup, yapıların toplam ağırlığını azaltır. Örneğin, on katlı ve kırk daireli bir apartmanda alçı kullanılarak yapılan sıvalar binanın ağırlığını yaklaşık 450 ton azaltabilir. Bu durum, özellikle deprem bölgesinde bulunan Türkiye gibi ülkeler için önemli bir avantaj sağlar [35].

Son olarak, alçının uygulanması oldukça kolay ve ekonomiktir. Sadece suyla karıştırılarak uygulamaya hazır hale gelir. Alçı, çimento ve kum gibi malzemelere kıyasla %20 daha ekonomik bir çözüm sunar ve inşaat sürecini hızlandırarak maliyetleri düşürür. Bu nedenle alçı; dayanıklılık, ekonomik, uygulama kolaylığı, sağlığa uygunluk, yangın güvenliği ve enerji tasarrufu sağlama gibi birçok faydayı bir arada sunan etkili bir yapı malzemesi olarak inşaat sektöründe geniş bir kullanım alanı bulmaktadır [33].

3.6. Alçıpanlar Hakkında Genel Bilgiler

Alçıpan, iç mekanlarda kullanılan dayanıklı, hafif ve çok yönlü yapı malzemelerinden biridir. Görsel 3.2'deki görselde görüldüğü gibi iki karton yüzey arasına yerleştirilen alçıdan oluşur. Alçıpan üretiminde kullanılan alçı türü genellikle beta alçısı olarak bilinir [34].

Beta alçısı, su ile karıştırıldığında kısa sürede sertleşerek kolayca şekil alır ve dayanıklı bir yapı kazanır. Bu özellik, alçıpan panellerin seri üretimini kolaylaştırır ve iç mekan uygulamalarında tercih edilen bir malzeme haline getirir. Alçıpan paneller, iç

mekanlarda bölme duvarlar, asma tavanlar ve duvar kaplamaları gibi alanlarda kullanılmak üzere tasarlanır. Yapı içinde hafif bir yük taşıdığı için bina yapısına ekstra ağırlık katmaz. Beta alçısının bu özellikleri, alçıpan panellerin özellikle hafif yapı elemanları gerektiren projelerde ideal bir çözüm olarak kullanılmasına olanak tanır. [36].

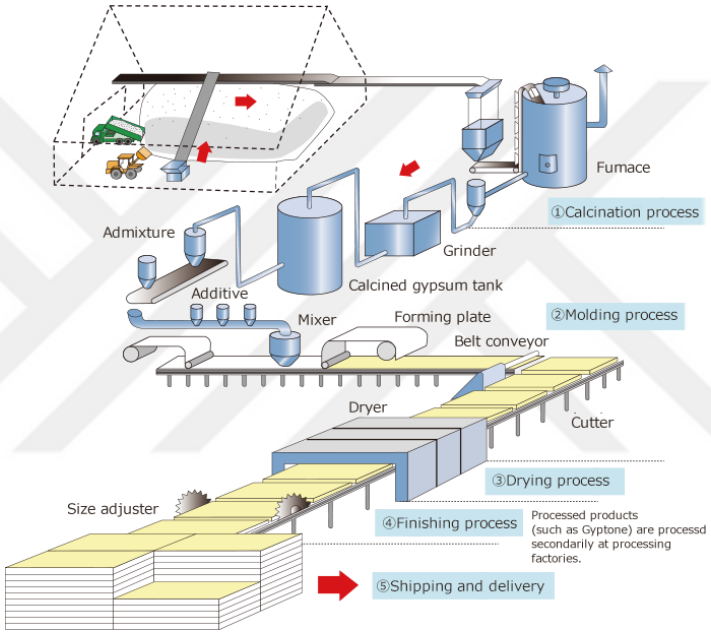
Görsel 3.2. *Alçıpan görseli.*

3.6.1. Alçıpanın üretim aşamaları

Alçıpan, alçı mineralinin ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$) iki kağıt tabaka arasına yerleştirilmesiyle üretilen bir panel olup, kartonpiyer, duvar panosu veya alçı levha gibi isimlerle de anılır. İç duvar ve tavan yapımında kullanılan alçıpan, geleneksel sıva yöntemlerine göre daha hızlı uygulanabildiği için yapı sektöründe yaygın bir tercih haline gelmiştir. Yıllık olarak dünya çapında milyonlarca metrekare alçıpanın kullanıldığı tahmin edilmekte olup, bu ürün inşaat sektöründe büyük bir pazar payına sahiptir. Alçıpan, kullanım ömrü sona erdiğinde inşaat ve yıkım atıklarının önemli bir bileşenini oluşturur.

Alçıpan üretimi, alçının kalsinasyon işlemine tabi tutulmasıyla başlar. Bu işlem sırasında alçının yapısındaki suyun bir kısmı uzaklaştırılarak $CaSO_4 \cdot 0.5H_2O$ formuna dönüştürülür. Ardından, alçı tekrar su ile karıştırılarak bir bulamaç elde edilir. Bu bulamaç, hareketli bir kağıt tabakası üzerine yayılır ve başka bir kağıt tabaka ile kaplanarak preslenir. İlk kurutma işleminden sonra alçıpan sertleşir ve son kurutma işlemi için paneller halinde kesilmeye hazır hale gelir. Alçıpan üretiminde kurutma, malzemenin dayanıklılığını artırmak ve stabilitesini sağlamak için iki ana aşamada yapılır. İlk kurutma

işlemi yaklaşık 50-60°C sıcaklıkta gerçekleşir; bu düşük sıcaklıkta kurutma, alçının yavaş ve kontrollü bir şekilde sertleşmesine yardımcı olur ve olası deformasyonları önler. İkinci aşamada, sıcaklık 100-130°C aralığına yükseltilir, böylece kalan nem tamamen uzaklaştırılır ve paneller kesime hazır hale gelir. Bu aşama, alçıpanın mekanik dayanımını artırarak daha kararlı bir yapı oluşturur. İki aşamalı kurutma süreci, alçıpanın nihai performansını iyileştirir ve kalite standartlarına uygun hale getirir. Alçıpan bu işlemlerden sonra, istenen boyutlarda kesilir, paketlenir ve piyasaya sunulur [41]. Görsel 3.3'de alçıpan üretim aşamaları gösterilmiştir.



Görsel 3.3. *Alçıpan üretim aşamaları.*

3.6.2. Alçıpanın ısı yalıtımı özellikleri

Alçıpan, düşük ısı iletkenliği sayesinde yapıda ısı yalıtımı sağlayarak enerji verimliliğine katkıda bulunur. Beta alçısından üretilen alçıpanın içeriğinde bulunan alçı, gözenekli yapısı sayesinde sıcaklığın yapının içine ve dışına geçişini sınırlandırır. Isı yalıtım değerleri, alçının gözenek yapısına ve alçı-su oranına bağlı olarak değişkenlik gösterir. Bu gözenekli yapı, alçıpanın ortam sıcaklığını dengede tutmasına yardımcı olarak ısı kaybını azaltır ve böylece enerji tasarrufuna katkıda bulunur. Alçıpan, özellikle kış aylarında iç mekân sıcaklığını muhafaza etme özelliğiyle binalarda enerji maliyetlerini düşürür. Türkiye'deki enerji verimliliği gerekliliklerini belirleyen TS 825

standardına göre, alçıpan panellerin ısı iletkenlik değerleri (0.18 - 0.43 W/mK) yapı içindeki yalıtım gereksinimlerini karşılamada uygun bir çözüm sunar.

3.6.3. Alçıpanın ses yalıtımı özellikleri

Alçıpan, iç mekanlarda ses yalıtımı sağlama kapasitesi ile bilinir. Beta alçısının gözenekli yapısı, ses dalgalarını emerek mekân içinde yankıyı azaltır ve ses geçişini sınırlar. Bu özellik, özellikle gürültü seviyesinin yüksek olduğu binalarda, ofislerde ve okullarda iç mekân akustiğinin düzenlenmesine yardımcı olur. Alçıpan panellerin ses yalıtımı sağlama kapasitesi, gözenekli yapısı sayesinde gelen ses dalgalarını yutma ve geri yansıtma özelliğine dayanır. Bu, alçıpanın toplantı salonları, sinema salonları ve diğer yoğun kullanılan mekânlarda tercih edilmesinin nedenlerinden biridir [37]. Ses yalıtım performansı, alçıpanın kalınlığına, yoğunluğuna ve katman sayısına bağlı olarak artabilir, bu da belirli projelerin ses yalıtım gereksinimlerine göre özelleştirilebilmesini sağlar.

Alçıpan panellerin ses yalıtım performansı, Ses İletim Sınıfı (STC) değeri ile ölçülür. Standart alçıpan panellerin STC değerleri, kalınlık ve katman sayısına göre değişiklik gösterir [38]. Tipik olarak 9.5 mm kalınlığında tek kat alçıpan panellerin STC değeri yaklaşık 30-34 dB arasındadır. 2.5 mm kalınlığında çift kat alçıpan panellerin STC değeri ise 40-45 dB civarındadır.

Bu değerler, alçıpanın iç mekânlarda orta düzeyde ses yalıtımı sağladığını gösterir. Özellikle çift katmanlı ve daha kalın alçıpan paneller, ofisler, toplantı salonları ve ev içi bölme duvarlarda istenen ses yalıtımını sağlamak için uygundur [39].

3.6.4. Alçıpanın mekanik özellikleri

Alçıpan, hafif bir yapı malzemesi olmasına rağmen sağlam ve dayanıklıdır, bu da onu mekanik dayanım gerektiren iç duvar uygulamaları için uygun hale getirir. Beta alçısı, su ile karıştırıldığında hızlıca priz alır ve sertleşir, böylece alçıpan panelin yüksek mukavemetli bir yapı oluşturmasını sağlar. İki karton tabaka arasında yer alan alçı çekirdek, alçıpan panellerin darbelere ve basınca karşı dayanıklı olmasına katkıda bulunur. Ayrıca alçıpanın hafifliği, yapı üzerindeki yükü azaltır; bu da özellikle deprem riski yüksek bölgelerde güvenlik açısından önemli bir avantaj sunar. Alçıpanın mekanik dayanımı, beta alçısının kristal yapısına bağlı olarak şekillenir ve bu da yapı malzemesi

olarak kullanılmasında uzun ömürlü bir performans sağlar. Alçıpan panellerin mekanik özellikleri, ek katkı maddeleriyle daha da güçlendirilebilir ve böylece dayanıklılık gerektiren projelerde geniş bir kullanım alanı bulur.

Alçıpan panellerin mekanik dayanımı, darbelere karşı direnci ve yüzey sertliği ile ölçülür. Bu değerler genellikle yoğunluğa ve kalınlığa bağlı olarak değişir. Standart alçıpan panellerin yoğunluğu genellikle 680-900 kg/m³ arasında değişir. Standart bir alçıpan panelin basınç dayanımı yaklaşık 4-6 MPa arasındadır.

Darbe dayanımı açısından, 9.5 mm kalınlığındaki standart bir alçıpanın darbe direnci daha düşüktür ve daha hafif yapısal uygulamalar için uygundur. 12.5 mm veya daha kalın alçıpan paneller ise, daha yüksek mekanik dayanım gerektiren uygulamalarda kullanılabilir. Bazı üreticiler, alçıpan panellerin darbe dayanımını artırmak amacıyla yüksek yoğunluklu alçı veya fiberglas katkılı paneller üretmektedir; bu tür paneller, daha dayanıklı yapı elemanları olarak kullanılır [31].

3.7. Taş Yünü Hakkında Genel Bilgi ve Alçıpanın Tercih Edilmesinin Avantajları

Taş yünü ve alçıpanın yapısal özellikleri yalıtım performansı ve dayanıklılık açısından birbirinden oldukça farklı iki yapı malzemesidir. Taş yünü, ısı ve ses yalıtımında üstün bir performans sağlamasıyla bilinir ancak bazı dezavantajlarından dolayı iç mekan uygulamalarında veya hafif yapı sistemlerinde sınırlı bir kullanıma sahiptir. Alçıpan ise hafif, işlevsel ve ekonomik bir alternatif olarak öne çıkar [47].Tablo 3.2 de taş yünü ve alçıpanın özelliklerini sunulmuştur.

Tablo 3.2. *Taş yünü ve alçıpan malzemelerinin ısıl, akustik, mekanik özellikleri karşılaştırılması.*

Özellik	Taş Yünü	Alçıpan
Isıl İletkenlik	- Düşük ısıl iletkenlik (0.035-0.040 W/mK)	- Taş yününe göre daha yüksek ısıl iletkenlik (0.17-0.25 W/mK)
	- Gözenekli yapısı ve içinde hapsolan hava nedeniyle iyi ısı yalıtımı sağlar	- İç mekan uygulamalarında yeterli düzeyde ısı yalıtımı sunabilir, ek yapısal yük oluşturmaz
Ses Yalıtımı	- Yüksek ses yalıtımı, özellikle orta ve yüksek frekansları iyi emer	- Orta düzeyde ses yalıtımı sağlar, yüksek frekansları sınırlamada etkilidir
	- Konser salonları, stüdyolar ve ofisler gibi gürültü kontrolü gereken alanlarda tercih edilir	- Çift katman veya taş yünü ile birlikte kullanıldığında ekstra ses yalıtımı sağlar
Mekanik Dayanıklılık	- Düşük mekanik dayanıklılık, darbelere karşı zayıf	- Orta düzeyde dayanıklılık; cam elyaf ile güçlendirilmiş çeşitleri daha yüksek dayanıklılık sağlar

3.7.1. Isıl iletkenlik karşılaştırılması

Taş yününün düşük ısıl iletkenlik değeri, onu güçlü bir yalıtım malzemesi yapar. Genellikle, taş yünü panellerinin ısıl iletkenlik katsayısı 0,035-0,040 W/mK arasında değişir. Bu düşük değer, taş yününün gözenekli yapısı ve içinde hapsolan havadan kaynaklanmaktadır. Durgun havanın ısıl iletkenliği düşük olduğu için taş yünü bir yüzeyden diğerine ısı geçişini etkili bir şekilde engeller. Bu nedenle taş yünü çatı, dış cephe yalıtımı ve yalıtım gerektiren alanlarda tercih edilir [40].

Alçıpanın ısıl iletkenliği taş yününden daha yüksektir. Alçıpan panellerinin ısıl iletkenlik değeri genellikle 0,17-0,25 W/mK civarındadır. Bu da onun taş yünü kadar etkili bir ısıl yalıtım sağlamadığını gösterir. Ancak alçıpan, iç mekanlarda belirli bir düzeyde ısıl yalıtım gerektiren bölme duvar veya tavan uygulamalarında etkileyici bir çözüm sunabilir. Hafif yapısı sayesinde taş yününe kıyasla termal yalıtım sağlamak için ek bir yapısal yük oluşturmadan kullanılabilir.

3.7.2. Ses yalıtımı karşılaştırılması

Taş yünü, ses yalıtımında üstün performans sağlayan bir malzemedir. Lifli yapısı, ses dalgalarını etkili bir şekilde emerek yankıyı azaltır. Taş yünü özellikle orta ve yüksek frekanslı sesleri emer, ortamın akustik özelliklerini iyileştirir ve gürültüyü önemli ölçüde azaltır. Bu nedenle taş yünü gürültü kontrolü gerektiren yapılarda, konser salonları, stüdyolar ve ofislerde genellikle tercih edilen bir yalıtım malzemesidir.

Öte yandan alçıpan, ses yalıtımı açısından orta düzeyde bir performans sunar. Tek katmanlı alçıpan paneller, yüksek frekanslı sesleri sınırlamada etkili olabilir. Ancak düşük frekanslı seslerin yalıtımında taş yünü kadar etkili değildir. Alçıpanların ses geçiş sınıfı (STC) değeri genellikle 30-45 dB arasında değişir. Ekstra ses yalıtımı gereken alanlarda alçıpan paneller çift katman olarak uygulanabilir veya taş yünü ile birlikte kullanılabilir. Bu sayede hem hafiflik hem de ses yalıtımı açısından dengeli bir çözüm sunar [47].

3.7.3. Mekanik dayanıklılık karşılaştırılması

Mekanik dayanıklılık açısından taş yünü, düşük yoğunluğu nedeniyle yüksek bir dayanıklılık sağlamaz. Gözenekli yapısı, taş yününü hafif ve esnek bir malzeme yapar ancak darbelere karşı dayanıklı değildir. Bu nedenle, mekanik dayanıklılığın önemli

olduğu yüzeylerde taş yünü tercih edilmez. Dış cephe uygulamalarında veya çatı kaplamalarında kullanıldığında ise üzerine koruyucu bir katman gerektirir.

Alçıpan ise hafif olmasına rağmen darbelere karşı belirli bir direnç sunar. Standart alçıpan paneller darbelere karşı sınırlı bir direnç sunarken, daha kalın veya cam elyafla güçlendirilmiş özel alçıpan çeşitleri daha yüksek mekanik dayanıklılık sağlar. Alçıpan, özellikle iç bölme duvarlar, tavan uygulamaları ve dekoratif duvar kaplamalarında yaygın olarak kullanılır. Yüzeyi taş yününe kıyasla sert, dayanıklıdır, boyanabilir ve kaplanabilir. Bu da malzemenin mekanik dayanıklılığını artırır [44].

4. ALÇI MALZEMESİ ÜZERİNE YAPILAN ÇALIŞMALAR

4.1. Termal Performans Üzerine Çalışmalar

Bumanis ve arkadaşları, geri dönüştürülmüş genişletilmiş polistiren (EPS) granüllerinin alçı ile kombinasyonunu kullanarak yeni bir kompozit yalıtım malzemesi geliştirmeyi amaçlamıştır. Çalışmada, EPS-alçı kompozitlerinin termal ve akustik performansları iki farklı üretim yöntemi, yani geleneksel döküm ve yarı kuru sıkıştırma yöntemleri ile karşılaştırılmıştır. Yarı kuru sıkıştırma yöntemiyle üretilen kompozitler, yüksek homojenlik ve düşük yoğunluk sağlarken, döküm yöntemiyle üretilenler nispeten yoğun ve sert yapıya sahip olmuştur. Termal testler, EPS granüllerinin alçı matrisine dahil edilmesinin ısı iletkenliğini önemli ölçüde düşürdüğünü; özellikle sıkıştırma yöntemi ile üretilen örneklerde termal iletkenlik değerlerinin 0.039 W/mK seviyelerine kadar indiğini göstermiştir. Yoğunluk açısından, kompozitlerin kütle yoğunluğu 48 kg/m³ ila 793 kg/m³ arasında değişkenlik göstermiştir. Akustik performans değerlendirmelerinde, sıkıştırma yöntemiyle üretilen örneklerin 600-700 Hz frekans aralığında 0.9 ve üzeri ses emme katsayısına ulaştığı; buna karşın dökümle üretilen örneklerin ses emme performansında yüksek bir değişkenlik gözlemlendiği rapor edilmiştir. Elde edilen bu sonuçlar, EPS granüllerinin alçı ile birleştirilmesinin kompozitlerin termal ve akustik yalıtım özelliklerini artırmada etkili olduğunu ve özellikle sıkıştırma yönteminin, daha düşük yoğunluklu ve homojen yapıda malzemeler elde edilmesini sağladığını ortaya koymaktadır. Böylece, geri dönüştürülmüş EPS kullanılarak çevre dostu ve enerji verimliliğini destekleyen bir yapı malzemesi geliştirilmesi, hem çevresel faydalar sağlamakta hem de yalıtım performansını iyileştirmektedir [42].

Buratti ve arkadaşları, binalarda enerji verimliliğini artırmak amacıyla geliştirilmiş aerogel bazlı alçı sıvaların termal ve akustik performanslarını detaylı bir şekilde incelemiştir. Bu çalışmada, doğal alçıya belirli oranlarda karıştırılan granüler silika aerogelin malzemenin ısı yalıtım özelliklerini nasıl etkilediği ve sıvanın ses yalıtımı üzerindeki rolü değerlendirilmiştir. Termal test sonuçları, aerogelin %80-99 oranında eklenmesiyle geleneksel sıvalarda 0.50 W/mK olan ısı iletkenliğinin, aerogel oranının yüksek olduğu karışımlarda 0.014-0.016 W/mK seviyelerine kadar düştüğünü göstermiştir; bu, yaklaşık %97 oranında bir iyileşme anlamına gelmektedir. Böylece aerogelin, yüksek gözenek yapısı sayesinde son derece düşük ısı iletkenliği sağlayarak sıvanın enerji tasarrufu potansiyelini artırdığı görülmüştür. Akustik performans

testlerinde ise aerogel tabakasının ses emilim katsayısına katkısının belirli bir seviyede kaldığı; ancak sıva kalınlığının arttırılmasıyla düşük frekanslarda ses emiliminin önemli ölçüde arttığı gözlemlenmiştir. Bu çalışmanın sonuçları, aerogel bazlı sıvaların hem yeni yapılarda hem de mevcut binaların yenilenmesinde kullanılabileceğini ve düşük kalınlıklarda bile ısı kayıplarını azaltarak enerji verimliliğine katkıda bulunabileceğini ortaya koymaktadır. Sonuç olarak, bu malzemenin mimari projelerde ekonomik ve sürdürülebilir bir yalıtım çözümü sunduğu anlaşılmıştır [43].

Cui ve arkadaşları, binalarda iç mekan sıcaklık dengesini artırmak amacıyla faz değişim malzemesi (PCM) içeren alçı panellerin performansını incelemiştir. Bu amaçla, laurik asit, miristik asit ve stearik asit kullanılarak oluşturulan PCM karışımı, genişletilmiş grafit (EG) ve diatomit (DE) katkı maddeleri ile stabilize edilip yüksek basınç altında sandviç yapısında faz değişim panellerine dönüştürülmüştür. Farklı sıcaklık koşullarında (37 °C, 40 °C, 45 °C ve 50 °C) test edilen panellerde, özellikle %16,7 oranında PCM içeren ve faz değişim tabakası iç yüzeyde konumlanan panellerin iç mekandaki sıcaklık dalgalanmalarını daha etkin şekilde dengelediği ve en uzun süreli sıcaklık stabilitesi sağladığı belirlenmiştir. PCM tabakasının iç yüzeyde yer alması, faz değişim sürecinin doğrudan iç mekanla temas eden bölgede gerçekleşmesini sağlayarak enerji verimliliğini artırmış ve sıcaklık kontrolünü iyileştirmiştir. Sonuç olarak, PCM içeren alçı panellerin binalarda enerji tüketimini azaltarak sürdürülebilir bir yalıtım çözümü sunduğu ve sıcaklık dengesini artırarak bina kullanıcılarının memnuniyetini yükseltebileceği ortaya konmuştur [49].

4.2. Akustik Performans Üzerine Çalışmalar

Bouzit ve arkadaşları, Fas'tan elde edilen doğal alçıya farklı çaplarda polistiren toplar ekleyerek alçı karışımlarının mekanik, termal ve akustik özelliklerini iyileştirmeyi amaçlayan bir araştırma yürütmüştür. Araştırmada, %5 ila %30 arasında değişen oranlarda 3, 4 ve 5 mm çapında polistiren topların alçının ısı yalıtımı, ses yalıtımı ve dayanıklılığı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar, %10 oranında polistiren eklenmesiyle ısı iletkenliğinin %27'ye kadar düştüğünü; en küçük çaplı topların %30 oranında kullanılmasıyla ise bu değerin %54 oranında azaldığını göstermiştir. Akustik performans testlerinde, polistirenin alçıya eklenmesiyle ses yalıtımında belirgin bir artış sağlanmış ve küçük çaplı topların daha yüksek yalıtım verimliliği sunduğu gözlenmiştir. Bununla birlikte, yoğunluğun azalmasıyla ses yalıtım performansında

küçük bir düşüş meydana gelmiştir. Mekanik analizlerde ise polistiren eklenmesi alçının dayanım özelliklerini bir miktar azaltmış; %20 oranında 3 mm toplar kullanıldığında en yüksek eğilme dayanımına ulaşılırken, oran arttıkça mukavemetin düştüğü gözlemlenmiştir. Enerji simülasyonları, %10 oranında 3 mm polistiren toplar içeren 3 cm kalınlığındaki alçı kaplamanın, ısıtma ve soğutma enerji taleplerini %13-15 oranında azaltabileceğini göstermiştir. Bu çalışma, alçı bazlı izolasyon malzemelerinde polistiren topların enerji verimliliği açısından potansiyelini vurgulayan önemli bir katkı sunmaktadır [45].

Samková ve Kulhavý, alçı esaslı kompozit malzemelerde farklı fiber takviyelerin akustik yalıtım performansını artırma potansiyelini detaylı bir şekilde incelemiştir. Çalışmada, alçı, çimento ve kireç-çimento bazlı yapı malzemelerine cam ve bazalt fiberler eklenmiş ve bu takviyelerin malzemelerin akustik sönümleme özellikleri üzerindeki etkisi değerlendirilmiştir. Kullanılan fiberlerin uzunlukları 8.5 mm ve 12 mm olarak belirlenmiş ve her bir malzeme karışımında %1 oranında fiber eklenmiştir. Akustik testler, ISO 10534-2 standardına uygun empedans tüpü yöntemiyle gerçekleştirilmiş ve malzemelerin ses yutma katsayıları farklı frekans aralıklarında ölçülmüştür. Elde edilen bulgular, bazalt fiber içeren termo-izolasyon alçısının, diğer karışımlara kıyasla en yüksek akustik sönümleme katsayısına ulaştığını göstermiştir. Bazalt fiberlerin gözenekli yapıyı destekleyerek ses emilimini artırdığı, bu sayede düşük frekanslarda bile etkin yalıtım sağladığı tespit edilmiştir. Cam fiber içeren alçı örneklerinde ise ses yalıtım performansının fiberlerin karışım içindeki homojen dağılımına bağlı olarak değişkenlik gösterdiği belirlenmiştir. Çalışma, alçı bazlı yapı malzemelerine eklenen bazalt ve cam fiberlerin, akustik yalıtım özelliklerini geliştirdiğini ve bu tür takviyeli malzemelerin özellikle ses yalıtımı gereksinimi olan yapı uygulamalarında kullanılabileceğini ortaya koymaktadır. Ayrıca, fiber uzunluğu ve dağılımının malzemenin performansında kritik bir rol oynadığı vurgulanmıştır [46].

4.3. Mekanik Dayanım ve Mikroyapı Çalışmaları

Lewry ve Williamson, alçının priz sürecini ve bu süreçte gelişen mikroyapının mekanik özelliklere olan etkisini kapsamlı bir şekilde incelemiştir. Araştırmada, alçı esaslı malzemelerin priz sürecinin üç temel aşamada gerçekleştiği belirtilmiştir. İlk aşamada, kalsiyum sülfat hemihidratın hidratasyonu sırasında dihidrat kristalleri oluşur ve bu kristaller, malzemenin ilk dayanımını sağlayan bir matris oluşturur. İkinci aşamada,

kristallerin büyümesi sırasında iç gerilmeler serbest bırakılır ve bu süreçte geçici bir dayanım kaybı yaşanabilir. Üçüncü ve son aşamada ise fazla suyun buharlaşmasıyla kristaller arasında çimentolaşma gerçekleşir ve yapı dayanıklı hale gelir. Çalışma, α-hemihidratın β-hemihidrata göre daha kısa sürede priz alarak daha yoğun bir kristal yapısı oluşturduğunu ve bu sayede başlangıç ve nihai dayanımının daha yüksek olduğunu ortaya koymuştur. Mikroyapı analizleri, α-hemihidratın kısa ve yoğun bağlanan kristal yapılar oluşturduğunu, buna karşın β-hemihidratın daha uzun ve dallanmış kristaller meydana getirerek mekanik dayanımı düşürdüğünü göstermiştir. Ayrıca, su/alçı oranının (W/P) alçının porozitesini önemli ölçüde etkilediği ve düşük su oranlarının daha yoğun, daha az gözenekli ve daha yüksek dayanımlı yapılar sağladığı tespit edilmiştir. Bu sonuçlar, alçının mikroyapısını kontrol ederek mekanik dayanım ve dayanıklılık özelliklerinin optimize edilebileceğini ortaya koymaktadır [47].

Başpınar ve Aytekin, 1200 °C'de genişletilen makroporoz silika granüllerinin alçı bazlı kompozitlerde dolgu malzemesi olarak kullanımını araştırarak, bu katkının malzemenin mekanik ve yalıtım özelliklerini nasıl geliştirdiğini incelemiştir. %10, %20 ve %30 oranlarında eklenen granüllerin alçının yoğunluk ve termal iletkenlik üzerindeki etkileri ayrıntılı bir şekilde analiz edilmiştir. Çalışmanın bulguları, %30 oranında granül eklenmesiyle kompozitin yoğunluğunun %30 oranında azalarak hafif bir yapı sağladığını ve termal iletkenliğin 0.35 W/mK'den 0.14 W/mK'ye düşerek %60'lık bir iyileşme sunduğunu göstermiştir. Akustik testlerde, gözenekli yapının düşük frekanslarda ses yutma katsayısını %15 oranında artırdığı gözlemlenmiştir, bu da kompoziti ses yalıtımı gereken ortamlarda uygun hale getirmektedir. Ayrıca, silika granülleri kompozitin kırılganlığını azaltarak daha dayanıklı ve stabil bir yapı sunmuştur. Çalışma, silika granülleri ile takviye edilen alçı kompozitlerin enerji verimliliği sağlayan, çevre dostu ve düşük maliyetli bir yapı malzemesi olarak inşaat sektöründe geniş bir uygulama alanına sahip olduğunu vurgulamaktadır [18].

Kütahya-Emet borik asit fabrikasından elde edilen kalsiyum sülfat bazlı bor atıklarının alçı içinde kullanılarak geri dönüşüm potansiyelini araştırmıştır. Bu çalışmada, bor atıklarının şahit alçı içerisine belirli oranlarda eklenmesiyle, atığın alçının mekanik, fiziksel ve çalışabilirlik özellikleri üzerindeki etkileri analiz edilmiştir. Atığın mineralojik, termal ve kimyasal özellikleri incelenmiş; sabit sıcaklık olan 120°C'de farklı sürelerde (12 ve 24 saat) uygulanan kalsinasyon işlemleri sayesinde bor atığının hemihidrat yapıya dönüşüm süreci gözlemlenmiştir. Çalışmada hem işlenmemiş hem de

kalsinasyon uygulanmış atıkların, şahit alçının mukavemeti, yoğunluğu ve hidratasyon sürecine olan etkileri ayrıntılı olarak değerlendirilmiştir. Ayrıca, kısmi kalsinasyon işlemi geçirmiş bor atığının hidratasyon hızını yavaşlatmak amacıyla sitrik asit, malik asit ve tartarik asit gibi farklı katkı maddeleri ilave edilmiştir. Sitrik ve malik asit, alçının çalışabilirlik özelliklerini iyileştirirken mekanik dayanıklılıkta düşüşe yol açmıştır. Buna karşın, tartarik asit katkısı, alçının çalışabilirlik değerlerini artırırken mukavemette olumsuz bir etki yapmamıştır. Sonuçlar, işlenmemiş ve kısmi kalsineli atık eklemeleriyle alçının bulk yoğunluğunda ve mukavemetinde azalma gözlenmiş, ancak tartarik asit ilavesiyle bu olumsuzlukların kısmen giderilebileceği ortaya koyulmuştur. Çalışma, bor atığının alçı içinde değerlendirilmesiyle, bu tür atıkların endüstriyel ölçekte kullanımı açısından sürdürülebilir bir yaklaşım sunduğunu ve tartarik asit katkısıyla olumlu özelliklerin korunabileceğini vurgulamaktadır [18].

Agossou ve Amziane, keten lifiyle takviye edilen alçı panellerin hem mekanik hem de termal performans özelliklerini artırmaya yönelik bir çalışma yapmış ve bu tür panellerin çevresel etkilerini incelemiştir. Çalışmada, çeşitli uzunluklarda (12, 24 ve 36 mm) keten lifleri kullanılarak farklı oranlarda (%1, %2 ve %3) lif eklenmesi ile alçı panellerin dayanıklılığı, yalıtım kapasitesi ve karbon ayak izi üzerindeki etkileri analiz edilmiştir. Sonuçlar, 36 mm uzunluğunda keten liflerinin %3 oranında kullanılmasıyla panelin eğilme dayanımında çok büyük oranda bir artış sağlandığını ve bu kompozitlerin termal iletkenliğinde %47 oranında iyileşme kaydedildiğini ortaya koymuştur. Keten liflerinin mikroçatlakları köprüleyerek çatlak oluşumunu ve yayılımını kontrol ettiği, böylece malzemenin kırılganlık eğilimini azalttığı gözlemlenmiştir. Bu durum, kompozit malzemenin mekanik dayanımını artırarak özellikle eğilme yükleri altında daha dayanıklı bir yapı elde edilmesine olanak tanımaktadır. Termal performans açısından, keten liflerinin düşük termal iletkenliğe sahip olması, alçı panelin enerji tasarrufu sağlayan bir yapı malzemesi olarak kullanılabilirliğini artırmıştır. Çalışmada ayrıca, keten liflerinin karbon emilim kapasitesi sayesinde karbon ayak izinde de olumlu bir etki yaratıldığı; %3 oranında lif eklenmesiyle panelin karbon ayak izinde %29 oranında bir azalma sağlandığı belirlenmiştir. Elde edilen bu bulgular, keten lifiyle takviye edilen alçı panellerin sürdürülebilir yapı malzemeleri geliştirme açısından büyük bir potansiyele sahip olduğunu ve bu tür doğal liflerin çevresel ve mekanik avantajlar sunabileceğini göstermektedir [48].

Cui ve arkadaşları, desülfürizasyon alçı bazlı kompozitlerin mekanik dayanımını ve termal yalıtım özelliklerini geliştirmek amacıyla silika dumanı, mineral tozu ve uçucu kül gibi katkı maddelerinin etkilerini inceleyen kapsamlı bir çalışma gerçekleştirmiştir. Bu araştırmada, çeşitli katkı maddelerinin farklı oranlarda eklenmesiyle hazırlanan kompozitlerin dayanıklılık ve ısı iletkenliği performansları değerlendirilmektedir. Deney sonuçlarına göre, %35 oranında silika dumanı ilavesi, kompozitin basınç dayanımını 34.17 MPa seviyesine çıkarırken termal iletkenliğini 0.2146 W/mK seviyesine düşürerek en yüksek performansı sağlamıştır. Silika dumanının, kompozitin gözenek yapısını optimize etmesi ve hidrate kalsiyum silikat (C-S-H jel) gibi yoğun yapılar oluşturarak dayanıklılığı artırması bu olumlu sonuçların ana nedenidir. Gözeneklerin kapalı bir yapıya dönüşmesi, ısı iletiminin azaltılmasını sağlarken, kompozitin iç yapısındaki yoğunluğun artması da mukavemetini güçlendirmiştir. Mineral tozu ve uçucu kül gibi diğer katkılar da benzer iyileştirici etkilere sahipken, silika dumanının mikro-agrega etkisi ve güçlü volkanik kül aktivitesi sayesinde en iyi sonucu verdiği gözlemlenmiştir. Çalışmada ayrıca, doğrusal regresyon modelleri kullanılarak basınç dayanımı ve termal iletkenlik arasındaki ilişkinin yüksek doğrulukla öngörülebildiği belirlenmiştir. Bu modellerin, yalıtım performansını ve mekanik dayanıklılığı optimize etmek için kullanılabileceği vurgulanmıştır [49].

5. ÇALIŞMANIN AMACI

Bu tez çalışmasında taş yünü yerine kullanılabilecek, üstün ısı ve ses yalıtımı sağlayan, cam küre katkılı yenilikçi bir alçıpan malzemesi geliştirilmesi hedeflenmektedir. Taş yünü, yüksek yalıtım performansı sunmasına rağmen, ağır yapısı, zor montaj gereksinimleri ve kullanım sırasında sağlık açısından bazı dezavantajlara sahiptir. Ayrıca, özellikle iç mekânlarda uygulanması zorlayıcı ve maliyetli olabilir. Taş yününün performansını yakalayabilecek ancak daha hafif, kolay uygulanabilir, dayanıklı ve estetik bir malzeme oluşturmak, yapı sektörü için önemli bir ihtiyaca yanıt verecektir. Bu araştırma, alçıpanın termal ve akustik özelliklerini cam küreler gibi çeşitli katkılarla iyileştirme amacını taşımaktadır.

Bu çalışmada alçı levhalara cam küre gibi yenilikçi katkı malzemeleri eklenerek hem ısı iletkenliğinin azaltılması hem de ses yalıtımının artırılarak yenilikçi bir malzeme üretmek amaçlanmıştır. Cam küreler, iç yapılarında hapsedilmiş hava sayesinde oldukça düşük bir termal iletkenlik sunmaktadır ve alçı ile birleştiğinde malzemenin ısı iletimini sınırlandırarak iç mekânlarda enerji verimliliğini artırdığı önceki çalışmalarda görülmüştür. Bu özellik, alçıyı taş yünü seviyesine yaklaştıran bir yalıtım performansı sunmasını sağlar. Ek olarak, cam kürelerin katı ve dairesel yapısı ses dalgalarının içinde hapsedilerek enerjilerini kaybetmesine ve sönümlenmesine neden olur. Böylece, cam küre katkılı alçıpan, yalnızca termal yalıtımı artırmakla birlikte aynı zamanda ses yalıtımı açısından üstün bir performans sergiler. Bu özellikleri ile çalışma, taş yünü performansına alternatif çok yönlü bir yalıtım çözümü sunmayı hedeflemiştir.

Cam küre katkısı, alçı levhanın ağırlığını artırmadan yapısını güçlendirerek dayanıklılık sağlar. Bu da malzemeyi hem hafif hem de mekanik dayanımı yüksek bir seçenek haline getirir. Özellikle iç mekan bölme duvarlarda, tavan kaplamalarında ve yüksek yalıtım gereksinimi olan özel yapılarda uygulanabilecek bu malzeme, dayanıklılık açısından üstün bir çözüm sunar. Elde edilen malzeme kolay montajı sayesinde projelerde hızlı uygulama imkânı tanır ve estetik görünümü ile dekoratif bir yüzey sunar. Hafifliği sayesinde bina yapısına ek yük getirmeden kullanılabilmesi, yapı güvenliği açısından da önemli bir avantajdır.

Cam küre katkılı alçıpanın geliştirilmesi, taş yününe kıyasla daha maliyetli bir süreç gerektirebilir. Ancak bu yenilikçi malzeme, yüksek yalıtım ve dayanıklılık gerektiren özel alanlarda kullanılabilecek nitelikte olup, yapı projelerinde enerji verimliliğini artırarak uzun vadede maliyet avantajı sağlayacaktır. Özellikle sağlık sektörü, akustik gereksinimi

olan ofisler, stüdyolar veya yüksek yalıtım performansı talep eden özel yapılar gibi alanlarda cam küre katkılı alçıpanın büyük bir potansiyel sunduğu düşünülmektedir. Bu çalışma, yalıtım performansının taş yünüyle yarışabilecek düzeye getirilmesi ve ek olarak hafiflik, dayanıklılık ve uygulanabilirlik avantajlarıyla sektörde yenilikçi bir çözüm sunmayı hedeflemektedir.

Çalışmanın bir diğer hedefi ise alçıpan malzemesine hem cam küre hem de granül ekleyerek akustik performansı ve termal özellikleri daha ileri seviyeye taşımak amaçlanmaktadır. Cam küreler, düşük yoğunlukları ve iç yapılarında hapsedilmiş hava nedeniyle etkili bir ısı yalıtımı sunarken, aynı zamanda ses dalgalarının malzeme içinde sönümlenmesine de katkıda bulunur. Bu özellikleri, cam küreleri yapı malzemelerinde tercih edilen bir dolgu malzemesi yapar. Ancak bu çalışmada ek olarak granül kullanımının ses yalıtım performansını daha da artırabileceği düşünülmektedir. Granüller, malzeme içinde ek boşluklu bir yapı oluşturarak ses dalgalarının daha fazla hapsedilmesini sağlar. Bu sayede, malzemeye gelen ses dalgaları hem cam kürelerin hem de granüllerin oluşturduğu boşluklu yapı içerisinde dağılarak enerjisini kaybeder. Özellikle orta ve yüksek frekanstaki ses dalgalarının bu boşluklarda emilmesi, yankıyı azaltarak iç mekânda daha sessiz ve konforlu bir ortam sağlar. Granüllerin ve cam kürelerin birlikte kullanımı, alçıpanın ses yalıtımı performansını artırırken, termal yalıtım özelliklerinin korunması hedeflenmiştir. Böylece, özellikle ofis, toplantı odaları, stüdyolar veya gürültü kontrolünün önemli olduğu diğer alanlar için güçlü bir yalıtım malzemesi elde edilmiş olur. Bu malzeme kombinasyonu, aynı zamanda yapı ağırlığını fazla artırmadan istenilen akustik konforu sağlamaya yardımcı olacağı düşülmüştür. Cam kürelerin düşük yoğunluğu ve granüllerin boşluklu yapısı, hafif fakat çok yönlü bir yapı malzemesi ortaya çıkaracağı düşünülmektedir.

Sodyum Lauril Sülfat (SLS) katkısının malzemeye eklenmesiyle malzeme içinde kontrollü porozite oluşturularak, termal ve akustik performansın daha da iyileştirilmesi hedeflenmiştir. SLS katkısı, hava boşluklarının homojen dağılımını sağlayarak ısı ve ses yalıtımını artırmak amaçlanmıştır.

Bu tez çalışmasıyla birlikte alçıpanın sadece termal özelliklerini değil aynı zamanda akustik özelliklerini ve mekanik özelliklerini de iyileştirerek yapı sektörü için değerli bir katkı sunmak amaçlanmıştır. Cam küre ve granül katkılı bu yeni nesil alçıpan, enerji verimliliği sağlarken, akustik konforu artırmasıyla da iç mekân tasarımlarında önemli bir yere sahip olabilir.

6. MATERYAL VE YÖNTEM

Deneysel çalışmalar kapsamında, temin edilen alçı bünyesine cam küre ve granül gibi katkı maddelerinin ilave edilerek bu katkıların özellikle termal, akustik ve mekanik performans üzerindeki etkileri incelenmiştir. Çalışmalar, kullanılan alçının ısı ve ses yalıtım özelliklerini iyileştirmek, aynı zamanda bu katkı maddelerinin malzeme içerisindeki homojen dağılımını sağlamak amacıyla gerçekleştirilmiştir. Cam küre ve granül katkılarının alçı matrisine entegrasyonu için uygun koşullar belirlenmiş ve bu katkıların malzemenin termal iletkenlik akustik ve bunlara bağlı olarak mekanik performansına olan katkıları detaylı bir şekilde değerlendirilmiştir.

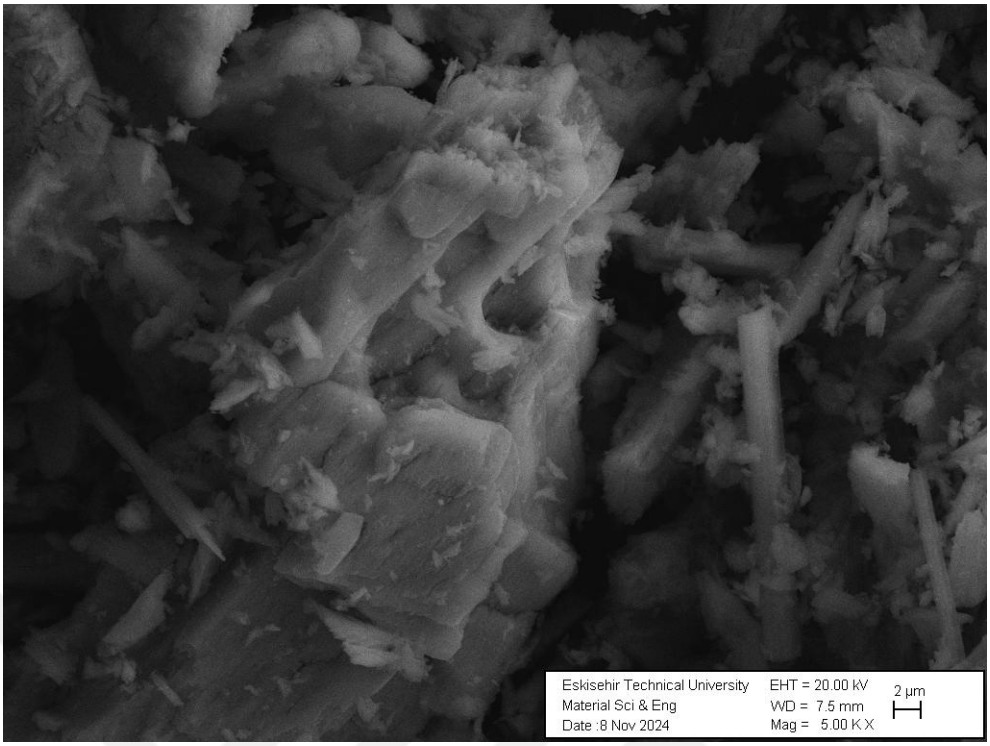
6.1. Çalışmada Kullanılan Malzemeler ve Reçeteler

6.1.1. Alçı

Cam küreler ve granüller gibi katkı maddelerinin alçı bünyesine ekleneceği deneylerde, malzeme özelliklerine daha yakın olduğu için referans alçı (şahit alçı) olarak kartonpiyer alçı kullanılmıştır. Şahit alçı, ana mineralojik bileşeni kalsiyum sülfat hemihidrat ($CaSO_4 \cdot 0{,}5H_2O$) olan bir malzeme olup, düşük katkı maddesi içeriği ve ince taneli yapısı sayesinde homojen karışımlar elde edilmesine olanak tanımaktadır. Bu özellikleri, cam küre ve granül gibi katkı maddelerinin alçı matrisi içinde düzgün bir şekilde dağılmasını sağlamaktadır.

Deneylerde kullanılan şahit alçının üretici tarafından önerilen su/alçı oranı 0,60 olarak belirtilmiştir. Bu oran, tüm çalışmalarda sabit tutularak karışımın kıvamının kontrol altına alınması ve deneylerin tekrarlanabilirliğinin sağlanması amaçlanmıştır. Su/alçı oranının sabit tutulması hem katkı maddelerinin dağılımı hem de karışımın mekanik ve fiziksel özelliklerinin standartlaştırılması açısından önemlidir.

Kartonpiyer alçı kullanımı, cam kürelerin hafiflik ve akustik performans iyileştirme gibi avantajlarını ve granüllerin bünyeye kazandırdığı yapısal destek özelliklerini daha etkili bir şekilde analiz etmeyi mümkün kılmıştır. Bu kapsamda, kartonpiyer alçı, katkı maddeleriyle birlikte alçının termal, akustik ve mekanik özelliklerinin optimize edilmesinde uygun bir şahit malzeme olarak seçilmiştir. Alçının şekil 6.1 de SEM görüntüsü ve tablo 6.1 de alçı tozunun fiziksel ve teknik özellik tablosu verilmiştir.



Şekil 6.1. *Alçı Tozu SEM Görüntüsü.*

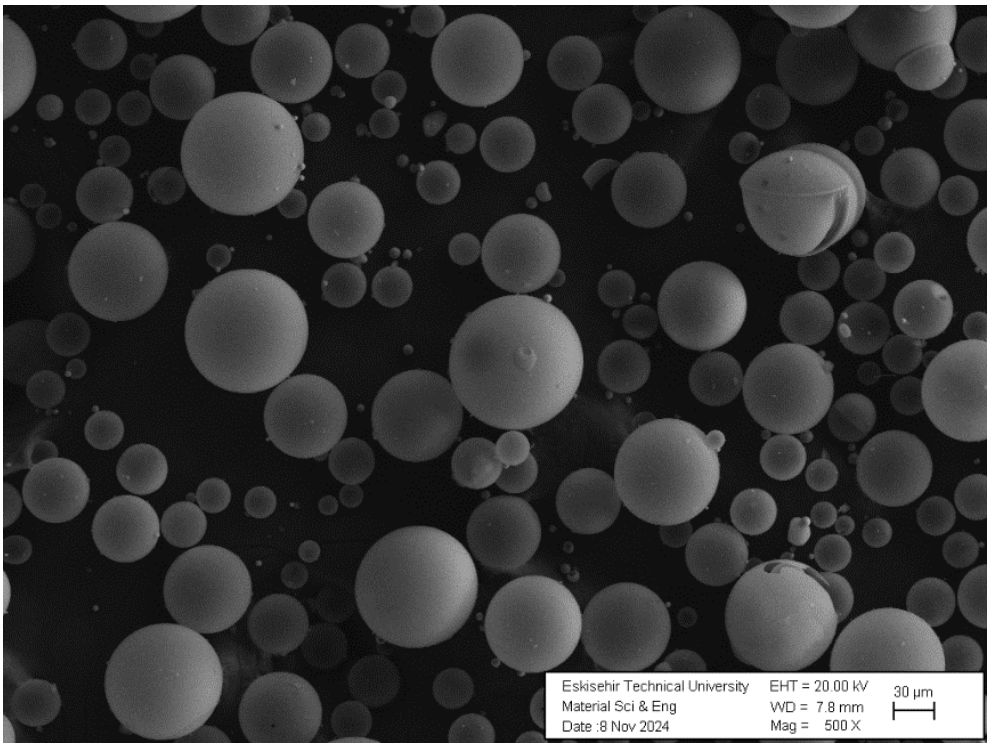
Tablo 6.1. *Alçı Tozunun Fiziksel ve Teknik Özellikleri.*

Teknik Özellik	Değer
Karışım Oranı	7 litre su / 10 kg alçı
Kullanılabilme Süresi	8 dakika
Donma Süresi	30 dakika
Yangına Tepki Sınıfı	A1
Standart	TS EN 13279
Yoğunluk	650-700 kg/m³ (gevşek birim hacim ağırlığı)
Tane Boyutu	160 mikron elekten geçen: %100; 100 mikron elekten geçen: <%10

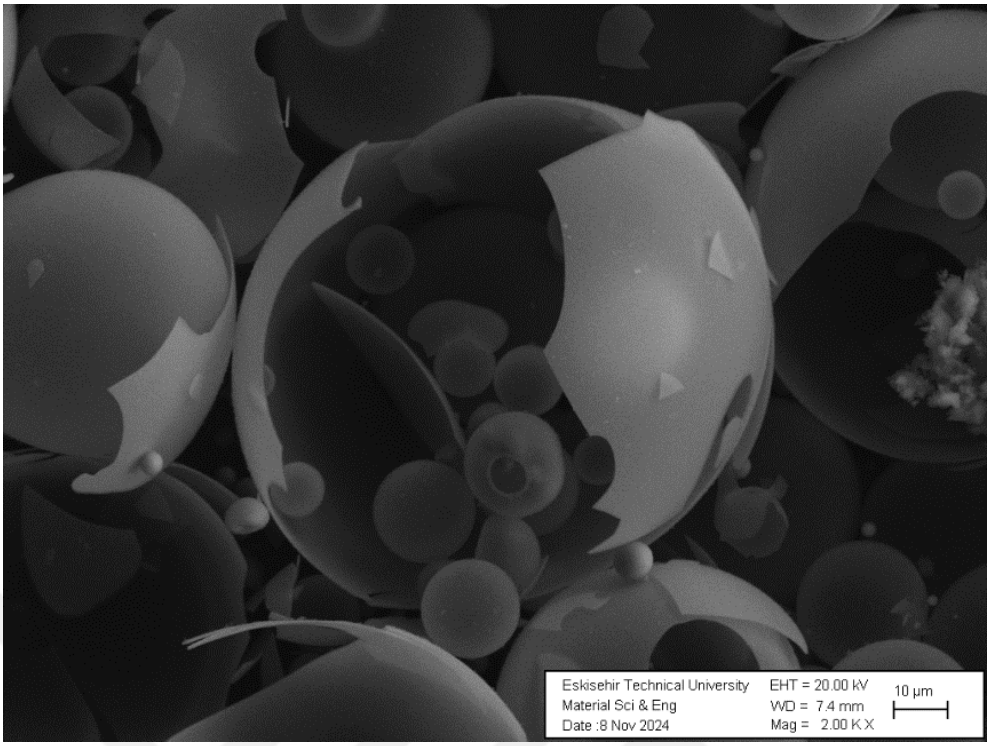
6.1.2. Cam küre

Hollow Glass Microsphere (HGM) olarak bilinen K15 cam küreler, ince ve hafif yapıları sayesinde alçı matrisine üstün özellikler kazandıran bir katkı malzemesidir. Kimyasal bileşimleri ağırlıklı olarak %72,23 oranında silika (SiO_2) içerirken, kalsiyum oksit (CaO) ve sodyum oksit (Na_2O) gibi bileşenler sırasıyla %13,98 ve %6,05 oranlarında bulunur. Ayrıca, %6,02 oranında bor trioksit (B_2O_3) içermesi, malzemenin

termal dayanımına ve yalıtım özelliklerine katkı sağlar. HGM'nin düşük yoğunluğu (~0.15 g/cm³) ve küresel yapısı, hem hafiflik sağlamakta hem de homojen bir dağılım ile mekanik performansı iyileştirmektedir. Yüksek basınç dayanımı (21 bar) ve düşük termal iletkenlik değeri (0.055 W/mK, 21°C'de) ile bu cam küreler, alçı bazlı kompozitlerde yalıtım, akustik ve mekanik özelliklerin optimize edilmesinde önemli bir rol oynar. Bu özellikler, alçı matrisine katkıda bulunarak hafif, dayanıklı ve fonksiyonel yapı malzemeleri elde edilmesini sağlar. Şekil 6.2 ve şekil 6.3 de cam kürelerin SEM görüntüleri verilmiştir. Tablo 6.2 de cam kürelerinin kimyasal bileşimleri ve tablo 6.3 de k15 cam kürelerinin fiziksel ve teknik özellikleri tablo şeklinde sunulmuştur.



Şekil 6.2 *K15 Cam Kürelerinin SEM Görüntüsü.*



Şekil 6.3. *K15 Kırık Cam Küre SEM Görüntüsü.*

Tablo 6.2. *K15 Cam Kürelerinin Kimyasal Bileşimleri.*

Bileşen	HGM(K15)(%)
SiO_2	72.23
Al_2O_3	0.12
CaO	13.98
Na_2O	6.05
B_2O_3	6.02
Diğerleri	0.63
LOI	1

Tablo 6.3. *K15 Cam Kürelerinin Fiziksel ve Teknik Özellikleri.*

Teknik Özellik	Değer
Malzeme Türü	K15 cam küresi
Yoğunluk (Gerçek)	0.15 g/cm³
Tane Boyut	D10:30 µm, D50:60 µm, D90:105 µm
Termal İletkenlik	0.055 W/mK (21°C)

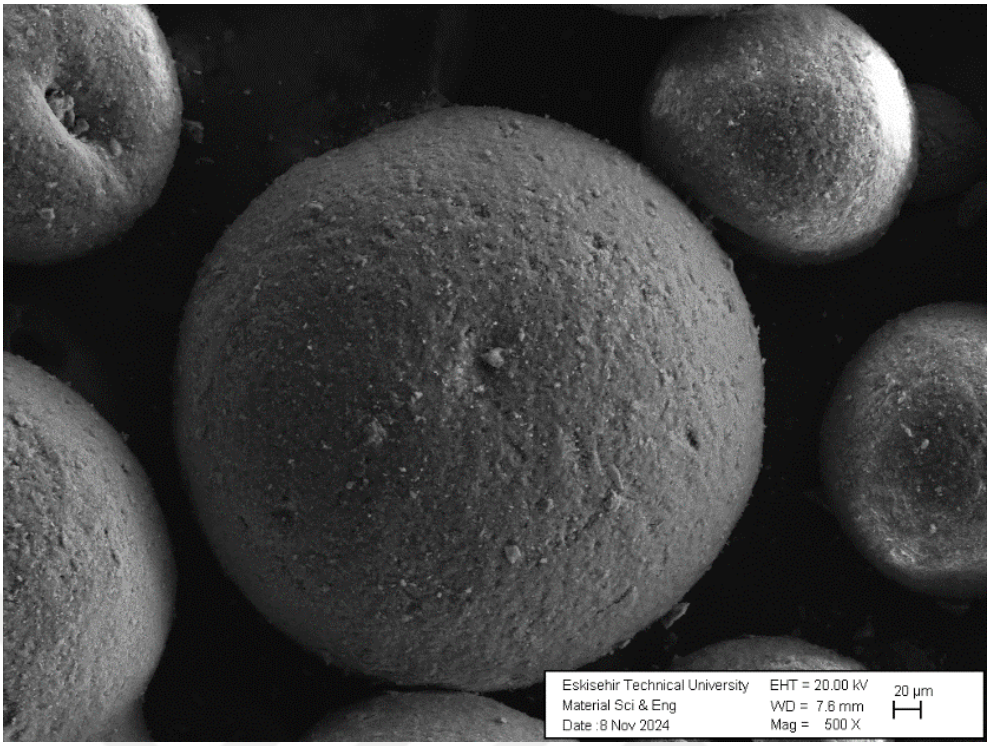
6.1.3. Granül

Porselen granüller, seramik bazlı yapıları sayesinde mekanik dayanım, kimyasal direnç ve termal stabilite gibi üstün özelliklere sahip malzemelerdir. Küresel veya düzensiz formlarda bulunabilen bu granüller (Şekil 6.4 de granülün SEM görüntüsü sunulmuştur.), kompozit malzemelerde dolgu olarak kullanıldığında, malzeme yoğunluğunu ve mekanik performansı optimize eder. Yüksek sıcaklıklara dayanabilme özelliği sayesinde, ısıya ve aşınmaya direnç gerektiren uygulamalarda tercih edilir.

BET analizi sonuçlarına göre, numunenin spesifik yüzey alanı 10.475 m^2/g olarak hesaplanmıştır. Bu değer, granül malzemenin oldukça geniş bir yüzey alanına sahip olduğunu ve gözenekli bir yapıya işaret ettiğini göstermektedir. Yüksek yüzey alanı, malzemenin ısı ve ses yalıtımı performansını iyileştirme potansiyeline sahip olduğunu düşündürmektedir. Analiz sırasında elde edilen BET izoterminin korelasyon katsayısı (r = 0.999908), verilerin yüksek bir doğrulukla BET modeline uyduğunu ve sonuçların güvenilir olduğunu ortaya koymaktadır. Ayrıca, t-plot analizi ile mikroporların yüzey alanı 1.799 m^2/g olduğu görülmüştür. Mikroporların varlığı, malzemenin ısı ve ses iletimi üzerindeki yalıtım etkisini artırmada önemli bir role sahiptir. T-plot analizi için hesaplanan korelasyon katsayısı (r = 0.998257), bu yöntemin de sonuçlarının güvenilir olduğunu doğrulamaktadır. Elde edilen bu sonuçlar, granüllü yapının hem termal hem de akustik performansını optimize etmek için uygun bir yapıya sahip olduğunu göstermektedir. Tablo 6.4 de granül malzemeye ait BET ve T-Plot analiz verileri tabloda verilmiştir.

Tablo 6.4. *Granül Malzemeye Ait BET ve T-Plot Analizi Verileri.*

BET		T-Plot	
Korelasyon Katsayısı (r)	Özgül Yüzey Alanı (m^2/g)	Korelasyon Katsayısı (r)	Mikropor Alanı (m^2/g)
0.999	10.475	0.998	1.799



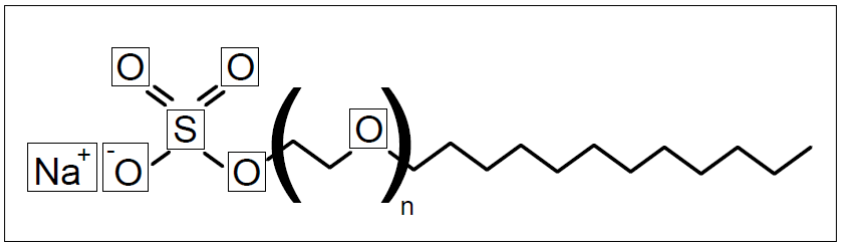
Şekil 6.4. *Granül SEM Görüntüsü.*

6.1.4. Sodyum lauril sülfat (SLS)

Sodyum lauril sülfat (SLS), kimyasal formülü $C_{12}H_{25}NaO_4S$ olan bir anyonik yüzey aktif maddedir. Yapısında bulunan uzun alkil zinciri ($C_{12}H_{25}$) hidrofobik özellik gösterirken, sülfat grubu (SO_4) hidrofilik özellik taşır. SLS, suyla karıştırıldığında yüzey gerilimini azaltarak köpük oluşturur ve bu özelliği nedeniyle çeşitli endüstriyel ve laboratuvar uygulamalarında kullanılmaktadır. SLS, alçı matrisine kontrollü bir porozite kazandırmak amacıyla kullanılan anyonik bir yüzey aktif maddedir. SLS alçı karışımda mikro ölçekte düzenli boşluklar oluşturur ve alçının gözenekli bir yapıya kavuşmasını sağlar. Açık porozite oluşturma kapasitesi, alçı karışımının yoğunluğunu düşürerek malzemenin hafifletilmesine katkıda bulunur. Aynı zamanda bu gözenek yapısı, termal ve akustik yalıtım özelliklerini iyileştirir. Bu bağlamda SLS, mekanik dayanımın yanı sıra diğer fonksiyonel özellikleri optimize etmek için etkili bir katkı maddesi olarak öne çıkar. Deneysel çalışmalarda, SLS'nin kullanılmasının bir diğer önemli amacı, üretici tarafından sağlanan alçı ile gözenek yapısı bakımından benzer bir ürün elde etmektir. Üretici alçısının mikro yapı özelliklerini taklit etmek, standartlara uygun malzemeler üretmek ve farklı bileşenlerin performansını bu yapı içerisinde değerlendirmek açısından kritik öneme sahiptir. Bu nedenle, SLS'nin porozite oluşturma kapasitesi, yalnızca

malzeme özelliklerini iyileştirmekle kalmaz, aynı zamanda deneysel sonuçların güvenilirliğini artırarak farklı katkı maddelerinin etkilerinin objektif bir şekilde değerlendirilmesine olanak tanır.

SLS'nin kullanımıyla elde edilen kontrollü porozite, malzeme matrisindeki boşlukların homojen bir şekilde dağıtılmasını sağlar. Bu, alçı bazlı kompozitlerin yoğunluk, termal iletkenlik ve akustik performans gibi özelliklerini iyileştirirken, hafif ve dayanıklı yapı malzemelerinin üretimine olanak tanır. Ayrıca, gözenekli yapının alçı içerisindeki katkı maddeleri ile etkileşimi de geliştirilir ve homojen bir matris oluşturulur. Bu özellikler, alçı karışımlarında istenilen mekanik ve fonksiyonel dengenin sağlanmasında SLS'nin önemli bir katkı maddesi olmasını sağlar. SLS ye ait kimyasal yapı görseli şekil 6.5 de sunulmuştur [50].



Şekil 6.5. *Sodyum lauril sülfat (SLS) kimyasal yapı görseli .*

6.1.5. Reçeteler

Tablo 6.5 de farklı oranlarda cam küre, granül ve SLS katkıları ile hazırlanmış alçı numunelerinin içerikleri detaylı bir şekilde sunulmuştur. TK (Ticari Kartonpiyer) ve K (Katkısız) numuneleri, referans değerleri temsil etmekte olup, katkı içermeyen alçıların özelliklerinin değerlendirilmesi için kullanılmıştır. Cam küre (%10-%40 arası), granül (%10-%30 arası) ve SLS (%1-%3 arası) gibi katkılar, numune içeriklerine kademeli olarak eklenmiş ve bu oranların malzemenin termal, akustik ve mekanik performans üzerindeki etkileri incelenmiştir.

Özellikle CK15-GN15, CK20-GN20 ve CK40-GN20-SLS3 gibi karma içeriklere sahip numuneler, birden fazla katkının aynı anda alçı matrisine etkisini değerlendirmek amacıyla hazırlanmıştır. Bu kombinasyonlar, malzemenin porozite, termal iletkenlik, mekanik dayanım ve ses yutma katsayısı gibi özelliklerinin optimize edilmesinde önemli

bilgiler sağlamıştır. Tabloda yer alan su/alçı oranı (0.7) sabit tutulmuş ve tüm numuneler bu oran doğrultusunda hazırlanmıştır.

Tablo 6.5. *Farklı katkı kombinasyonlarına sahip alçı numunelerinin numune kodları ve bileşen oranları.*

Numune Koduları	Su/Alçı Oranı	Cam Küre Miktarı (wt%)	Granül Miktarı (wt%)	Sodyum Lauril Sülfat (SLS) Miktarı (wt%)
TK (Ticari Kartonpiyer)	0.7	x	x	X
K (Katkısız)	0.7	x	x	X
CK10	0.7	10	x	X
CK15	0.7	15	x	X
CK20	0.7	20	x	X
CK30	0.7	30	x	X
CK40	0.7	40	x	X
GN10	0.7	x	10	X
GN15	0.7	x	15	X
GN20	0.7	x	20	X
GN30	0.7	x	30	X
SLS1	0.7	x	x	1
SLS2	0.7	x	x	2
SLS3	0.7	x	x	3
CK15-GN15	0.7	15	15	X
CK20-GN20	0.7	20	20	X
CK30-GN20	0.7	30	20	X
CK40-GN20	0.7	40	20	X
CK40-GN20-SLS1	0.7	40	20	1
CK40-GN20-SLS2	0.7	40	20	2
CK40-GN20-SLS3	0.7	40	20	3

6.2. Üretim Yöntemi

Deneysel çalışma, alçı, cam küre ve granül hammaddelerinin fiziksel, kimyasal ve mekanik özelliklerinin belirlenmesi ve bu özelliklerin katkı maddeleri ile nasıl iyileştirilebileceğini incelemek üzere tasarlanmıştır. Bu çalışma kapsamında, hammaddelerin karakterizasyonu ve katkı maddelerinin etkisini değerlendirmek amacıyla kapsamlı bir deney programı uygulanmıştır. Aşağıda deney programının aşamaları ayrıntılı bir şekilde sunulmuştur.

6.2.1. Hammaddelerin karakterizasyonu

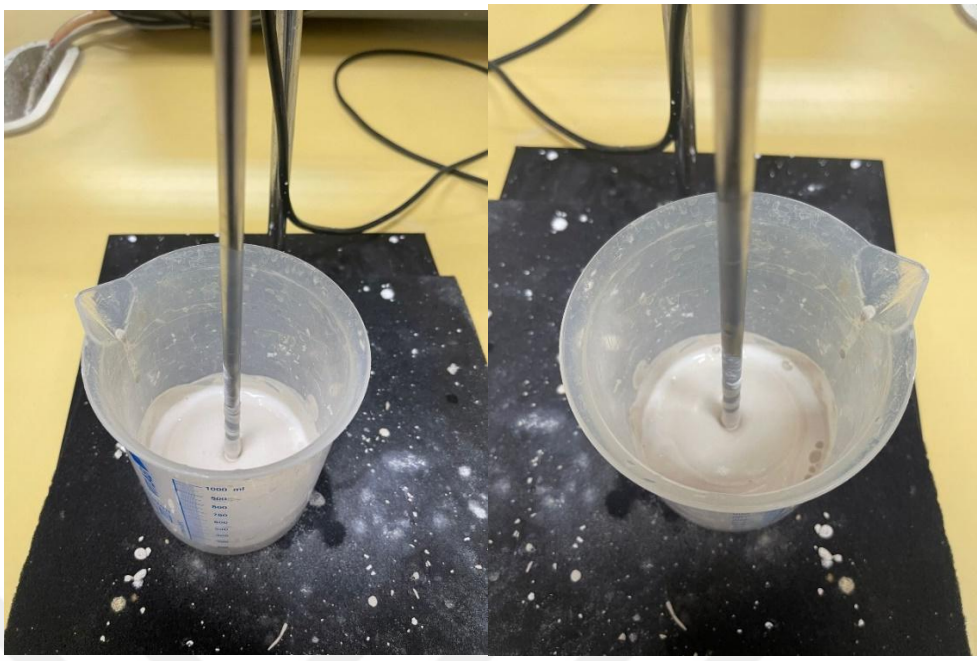
Bu aşamada, alçı, cam küre ve granül hammaddelerinin fiziksel ve kimyasal özelliklerini belirlemek üzere bir dizi analiz gerçekleştirilmiştir. XRF analizi kimyasal bileşimlerini ortaya koymuştur. Granül ve cam kürelerin mikro yapı ve yüzey morfolojileri SEM analizi ile gözlemlenmiştir. Granül numuneleri ayrıca BET analiziyle spesifik yüzey alanı ve gözenek yapısı açısından değerlendirilmiş, tane boyut analizi ile cam küre ve granüllerin boyut dağılımı belirlenmiştir. Ayrıca, helyum piknometresi kullanılarak alçı, cam küre ve granüllerin gerçek yoğunlukları ölçülmüştür. Bu analizler, katkı maddelerinin alçı matrisine entegrasyonu ve etkilerinin anlaşılması için temel bilgiler sağlamıştır.

6.2.2. Malzeme hazırlığı

Bu aşamada, belirli oranlarda alçı, cam küre ve granül kullanılarak karışımlar hazırlanmıştır. Cam küre %10, %15, %20, %30 ve %40 oranlarında, granül ise %10, %15, %20 ve %30 oranlarında volümce tartılmış, ayrıca cam küre ve granül kombinasyonları (%15-%15, %20-%20, %30-%20) belirlenmiştir. Alçı matrisine %0,70 oranında su eklenmiş ve karışımlar işleme hazır hale getirilmiştir.

6.2.3. Karıştırma

Malzeme karışımlarının homojen bir yapıya ulaşması için karıştırma işlemi uygulanmıştır. Suyun üzerine sırasıyla cam küre, granül ve gerekiyorsa belirli oranlarda SLS katkısı eklenmiş ve bu karışım 300 rpm hızında karıştırılmıştır. Daha sonra alçı eklenerek karıştırma işlemi 2-3 dakika boyunca devam ettirilmiştir. Bu sürecin sonunda homojen bir karışım elde edilmiştir. Görsel 6.1 de alçı, cam küre ve granül karışımının hazırlanması için yapılan karıştırma işlemi gösterilmiştir.



Görsel 6.1. *Alçı, Cam Küre ve Granül Karışımının Hazırlanması için Yapılan Karıştırma İşlemi.*

6.2.4. Numune dökümü

Homojen karışım, önceden hazırlanan kalıplara dökülmüştür. Döküm işlemi, numunelerin şekil ve boyutunun testlere uygun şekilde olmasını sağlamak üzere dikkatle gerçekleştirilmiştir.

Görsel 6.2. *Hazırlanan Alçı Karışımlarının Döküm İşlemi Sonrası Görünümü.*

6.2.5. Kuruma

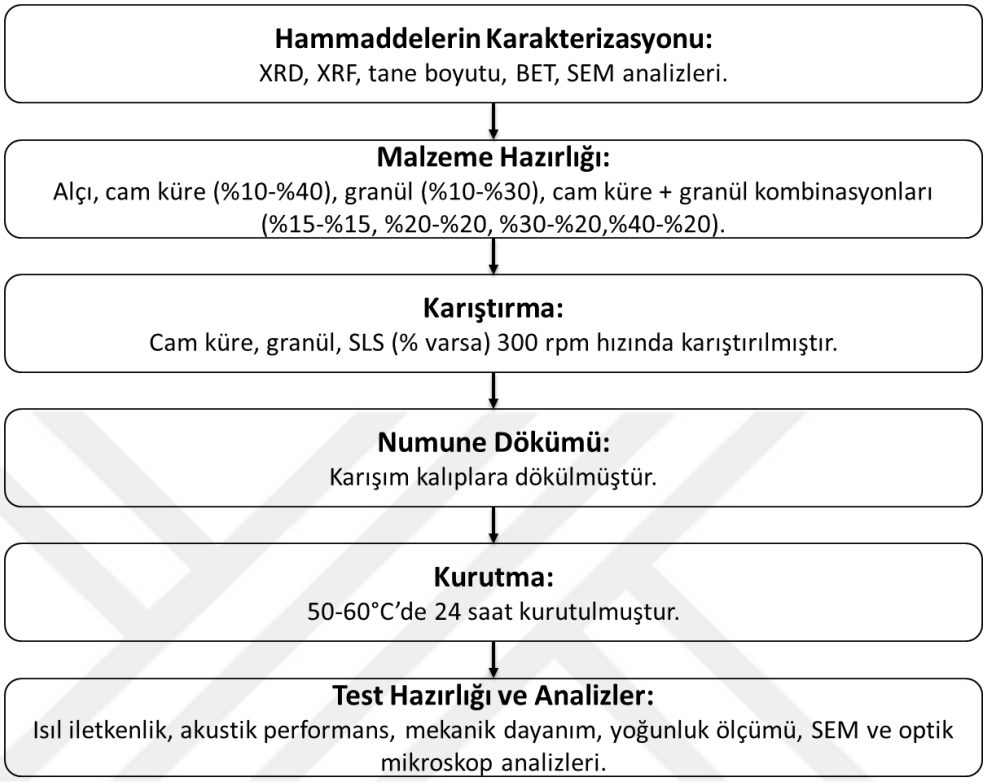
Kıvamına ulaşan numuneler, 50-60°C sıcaklıkta 24 saat boyunca kurutulmuştur. Bu süreçte, numunelerin nemden arındırılarak test için uygun dayanıklılığa ulaşması sağlanmıştır. Kurutma tamamlandıktan sonra numuneler kalıplardan dikkatlice çıkarılmıştır.

6.3. Uygulanan Testler ve Karakterizasyon Teknikleri

Bu tez çalışmasında alçı matrisine eklenen cam küre, granül ve SLS katkılarının malzeme özellikleri üzerindeki etkilerini değerlendirmek amacıyla çeşitli karakterizasyon yöntemleri uygulanmıştır. Şekil 6.6 da şematik olarak gösterildiği gibi numunelere hammadde karakterizasyonundan başlanılarak tüm numune hazırlama aşamaları ve testler sırasıyla uygulanmıştır. XRF (X-Ray Floresans) analizi, hammaddelerin kimyasal bileşimlerini belirlemek ve katkıların elementel içeriklerini değerlendirmek amacıyla gerçekleştirilmiştir. BET analizi, granüllerin yüzey alanı ve gözenek yapısını inceleyerek malzemenin termal ve akustik performansı üzerindeki etkilerini anlamak için kullanılmıştır. Ayrıca, SEM (Taramalı Elektron Mikroskobu) ve optik mikroskop yöntemleri, katkı maddelerinin homojen dağılımını ve yüzey morfolojisini detaylı bir şekilde incelemek amacıyla uygulanmıştır. Helyum piknometresi ile numunelerin gerçek yoğunlukları belirlenirken, tane boyut ölçüm cihazı ile katkı maddelerinin boyut dağılımları analiz edilmiştir. Bu yöntemler, malzemenin termal, akustik ve mekanik performansını etkileyen fiziksel ve kimyasal özelliklerin detaylı bir şekilde incelenmesini sağlamıştır.

Numunelere uygulanan testler, alçı matrisine eklenen katkı maddelerinin termal, akustik ve mekanik özellikler üzerindeki etkilerini kapsamlı bir şekilde değerlendirmek amacıyla gerçekleştirilmiştir. Isıl iletkenlik testi, alçı numunelerinin termal performansını belirlemek için yapılmış olup, ısı transfer özellikleri ve katkı maddelerinin ısı yalıtımı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Akustik performans testi, katkı maddelerinin alçı numunelerinin ses emilimi ve yansıma özellikleri üzerindeki etkilerini analiz etmek amacıyla gerçekleştirilmiştir. Mekanik testlerde basma dayanımı ölçülerek katkı maddelerinin alçı numunelerinin mekanik dayanımını nasıl etkilediği belirlenmiştir. Ayrıca, SEM ve optik mikroskop analizleriyle yüzey morfolojisi ve mikro yapısal

özellikler detaylı bir şekilde incelenmiştir. Şekil 6.6 da tüm numune hazırlama ve karakterizasyon akış şeması verilmiştir.



Şekil 6.6. *Numune hazırlık ve karakterizasyon akış şeması.*

6.3.1. XRF (X-Ray floresans)

XRF analizi, yalnızca alçı, granül ve cam küre hammaddelerinin kimyasal bileşimlerini belirlemek amacıyla Rigaku ZSX Primus cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu yöntemle, hammaddelerin elementel içerikleri analiz edilmiş ve kimyasal homojenlikleri değerlendirilmiştir. Elde edilen veriler, hammaddelerin alçı matrisindeki performansını anlamak için önemli bir temel oluşturmuştur.

6.3.2. SEM (Taramalı elektron mikroskobu)

SEM analizi, alçı numunelerinin yüzey morfolojisi ve mikro yapı özelliklerini detaylı bir şekilde incelemek amacıyla Zeiss Supra 50 VP cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu yöntemle, cam kürelerin ve granüllerin alçı matrisine

entegrasyonu, yüzeydeki dağılımları ve gözenek yapısına olan katkıları yüksek çözünürlükte gözlemlenmiştir.

Analiz sırasında, katkı maddelerinin alçı matrisindeki homojen dağılımı, yüzey etkileşimleri ve matrisle olan uyumu değerlendirilmiştir. Cam kürelerin ve granüllerin gözenek yapısına etkisi, hem porozite hem de mikro yapısal bağlanma açısından incelenmiştir. Ayrıca, katkı maddelerinin dağılımının alçı matrisindeki mekanik ve termal özelliklere nasıl katkı sağladığı detaylı şekilde analiz edilmiştir. SEM görüntüleri, katkıların homojen dağılımını kontrol etmek ve malzemenin mikroyapısal özelliklerini anlamak için önemli bir veri kaynağı sağlamıştır. Bu analizler, malzeme optimizasyonunda katkı maddelerinin rolünü değerlendirmek ve alçı matrisinin fiziksel performansını artırmaya yönelik stratejiler geliştirmek için kritik bir temel oluşturmuştur. Kullanılan SEM cihazı görseli görsel 6.3 de sunulmuştur.

Görsel 6.3. *SEM Analizinde Kullanılan Zeiss Supra 50 VP Cihazı.*

6.3.3. Optik mikroskop

Optik mikroskop, alçı ve katkı maddelerinin yüzey özelliklerini makro ve mikro seviyede analiz etmek amacıyla Zeiss Stemi 508 cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu yöntem, özellikle katkı maddelerinin alçı matrisindeki homojen dağılımını, bağlanma

yapılarının incelenmesini ve SLS katkısının porozite oluşumu üzerindeki etkilerini değerlendirmek için etkili bir şekilde kullanılmıştır. Optik mikroskop ile porozite çapları ve dağılımı detaylı bir şekilde analiz edilmiştir. Elde edilen optik görüntüler, SEM ile yapılan mikro yapısal analizleri destekleyici ve tamamlayıcı bir şekilde yorumlanmıştır. Bu analizler, alçı matrisindeki katkıların fiziksel özelliklerini daha iyi anlamak için kritik öneme sahiptir.

6.3.4. Helyum piknometresi

Numunelerin gerçek yoğunluklarının ölçülmesi amacıyla QuantaChrome MVP-4DC MultiPycnometer cihazı kullanılmıştır. Bu cihaz, helyum gazının düşük moleküler boyutu sayesinde numunenin en küçük gözeneklerine kadar nüfuz ederek numunenin toplam hacmini hassas bir şekilde ölçer. Gerçek yoğunluk, numunenin kütlesinin cihaz tarafından belirlenen toplam hacme oranlanmasıyla hesaplanır. Bu yöntemle, katkı maddelerinin alçı matrisindeki yoğunluk değişimlerine olan etkileri değerlendirilmiştir. Özellikle SLS, cam küre ve granül oranlarının artırılmasıyla alçı numunelerindeki yoğunluk değişimi incelenmiş ve elde edilen sonuçlar porozite ile ilişkilendirilmiştir. Bu analiz, alçı matrisindeki porozitenin malzemenin mekanik dayanımı ve termal özellikleri üzerindeki etkilerini anlamak ve bu özellikleri optimize etmek için kritik öneme sahiptir.

$$\rho = \frac{m}{V} \tag{6.1}$$

Yoğunluk, kütlenin hacme oranı olarak tanımlanır ve aşağıdaki formül ile ifade edilir. Burada; ρ gerçek yoğunluk (g/cm³), m numunenin kütlesi (g), V numunenin hacmidir (cm³).

Bu hesaplama yöntemiyle, alçı matrisindeki katkı maddelerinin (SLS, cam küre ve granül) yoğunluk ve porozite üzerindeki etkileri detaylı bir şekilde değerlendirilmiştir. Cihaz, helyum gazını kullanarak numunenin tüm boşluklarını doldurur ve hacim ölçümü sağlarken, yoğunluk verilerinin yüksek hassasiyetle elde edilmesine olanak tanır. Bu analiz, özellikle alçı matrisindeki porozite ile mekanik dayanım ve termal özellikler arasındaki ilişkiyi belirlemek için önemli bir veri sağlamıştır.

6.3.5. Tane boyut ölçüm cihazı

Cam küre ve granüllerin tane boyutu dağılımını belirlemek amacıyla Malvern Mastersizer 2000 cihazı kullanılmıştır. Bu yöntemle, kullanılan katkı maddelerinin tane boyutunun alçı matrisindeki homojen dağılıma ve matris özelliklerine olan etkileri analiz edilmiştir. Tane boyut dağılımı, özellikle alçının akışkanlık ve yoğunluk özelliklerinin anlaşılmasında önemli bir parametre olarak değerlendirilmiş ve katkı maddelerinin malzeme performansına olan etkilerini anlamak için kritik veriler sağlamıştır.

6.3.6. BET analizi

BET analizi, granülün boşluklu yapısını değerlendirerek ses ve ısı yalıtımı üzerindeki potansiyel etkilerini anlamak amacıyla Nova Touch BET Surface Area Analyzer cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu analiz, granülün yüzey alanı ve gözenek yapısı gibi özelliklerini belirlemek için uygulanmış ve bu özelliklerin alçı matrisindeki termal ve akustik performansı nasıl etkileyebileceği konusunda önemli bilgiler sağlamıştır. Gözenek boyutu ve yüzey alanı ölçümleri, granül katkısının malzemenin ses emme kapasitesi ve ısı iletkenliği üzerindeki etkilerini öngörmek açısından kritik verilere ulaşılmasını sağlamıştır. Numunelere yapılan BET analizi ise, farklı katkı maddelerinin (cam küre, granül ve SLS) alçı malzemenin yüzey alanına olan etkilerini ortaya koymuş ve bu değişimlerin termal iletkenlik ve ses yalıtımı gibi performans kriterlerine olan etkisini değerlendirmek için kritik veriler sunmuştur.

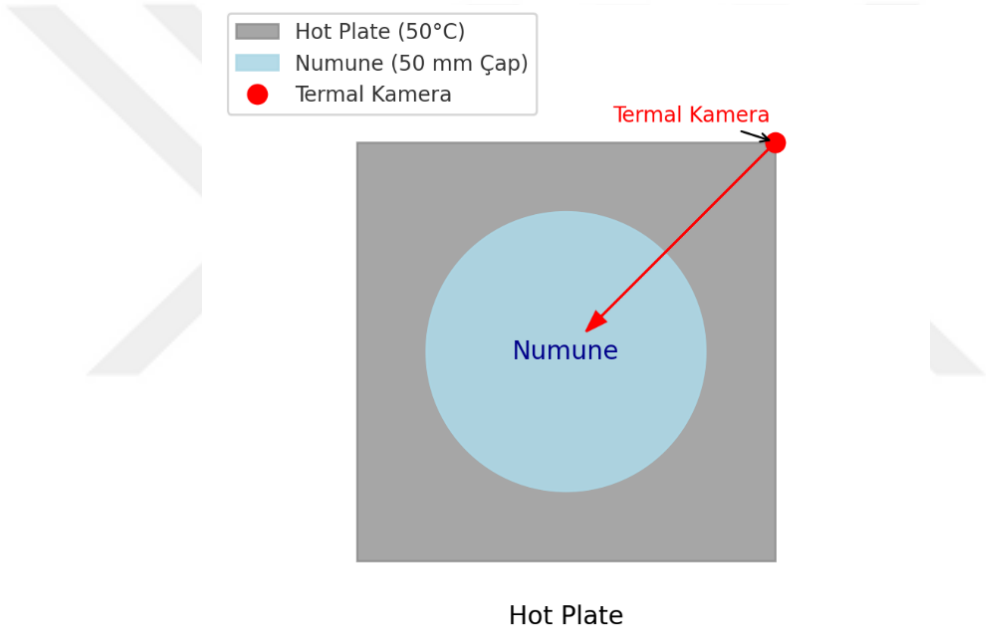
6.3.7. Termal iletkenlik ölçümü

Bu çalışmanın amacı, alçı bazlı numunelerin cam küre ve granül katkılarıyla çeşitli termal iletkenlik performanslarının karşılaştırmalı olarak değerlendirilmesidir. Deneylerde, hot plate üzerine yerleştirilen numunelerin alt yüzeyine sabit bir 50°C sıcaklık uygulanmış ve belirli zaman aralıklarında (örneğin, 1, 3, 5, 10 dakika) FLIR E6390 model termal kamera ile üst yüzey sıcaklıkları kaydedilmiştir.

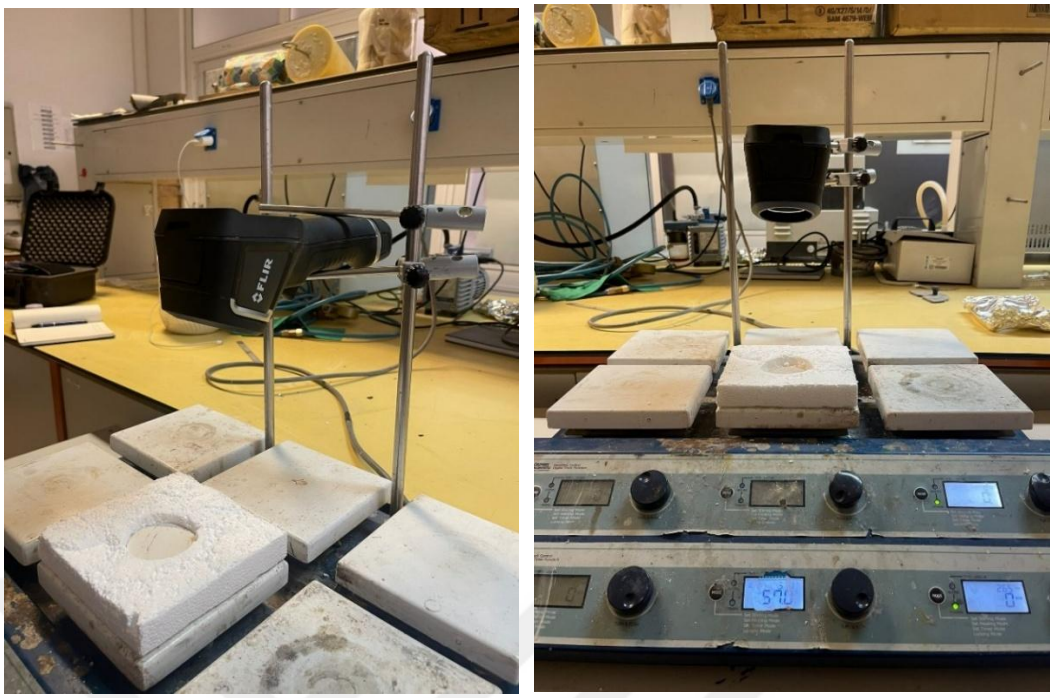
Deneyde kullanılan cihazlar, sıcaklık ölçüm prosedürü ve numune hazırlanış şekilleri detaylı olarak incelenmiştir. Hot plate, sabit sıcaklık sağlamak için kullanılmış ve termal kamera ile aynı mesafeden ve eş zamanlı olarak numunelerin üst yüzeyindeki sıcaklık değişimlerini hassas şekilde kaydetmiştir. Numuneler, standart boyutlarda ve alçı, cam küre, granül karışımları kullanılarak hazırlanmıştır. Numune kalınlıkları ticari

kartonpiyer alçısına uygun olacak şekilde 1 cm olarak ayarlanmış ve kullanılan malzemeler deneyin tutarlılığını sağlamak amacıyla özenle seçilmiştir.

Deneysel kurulumda, hot plate'in merkezi üzerine yerleştirilen yuvarlak numuneler, sabit sıcaklık kaynağıyla ısıtılmış ve çevredeki ısı kayıplarını en aza indirmek için dikkatlice düzenlenmiştir. Termal kamera, belirli bir mesafeden noktasal ölçümler alarak numunelerin termal performansını incelemiştir. Bu kurulum, numune ve cihazların doğru yerleşimini, numunenin çevresi strafor ile kaplanım yanlardan gelecek sıcaklıklar engellenmiş ve güvenilir veri toplanmasını sağlamıştır. Şekil 6.7 ve görsel 6.4 de yapılan ısıl iletkenlik deneyinin şekil ve görseli sunulmuştur.



Şekil 6.7 *Termal kamera ve hot plate ile termal iletkenlik ölçümü deney düzeneği.*



Görsel 6.4. *Termal İletkenlik Ölçümü İçin Kullanılan Test Düzeneği Görselleri.*

Bu yöntemin avantajları arasında, deneysel kurulumun basitliği ve farklı numunelerin termal performanslarının karşılaştırılabilir olması yer almaktadır. Ancak, ısı kayıpları ve homojen olmayan katkı dağılımları gibi sınırlamalar hata kaynakları oluşturabilir.

Alçı ısıl iletkenlik ölçümleri için yapılan çalışmalarda kullanılan diğer yöntemlerle kıyaslandığında, bu yaklaşım farklı katkı malzemelerinin etkisini incelemek için uygun bir çözüm sunmaktadır. Özellikle cam küre ve granül katkılarının termal özelliklere olan etkisi, bu yöntemle etkili bir şekilde değerlendirilmiştir.

6.3.8. Akustik performans testi

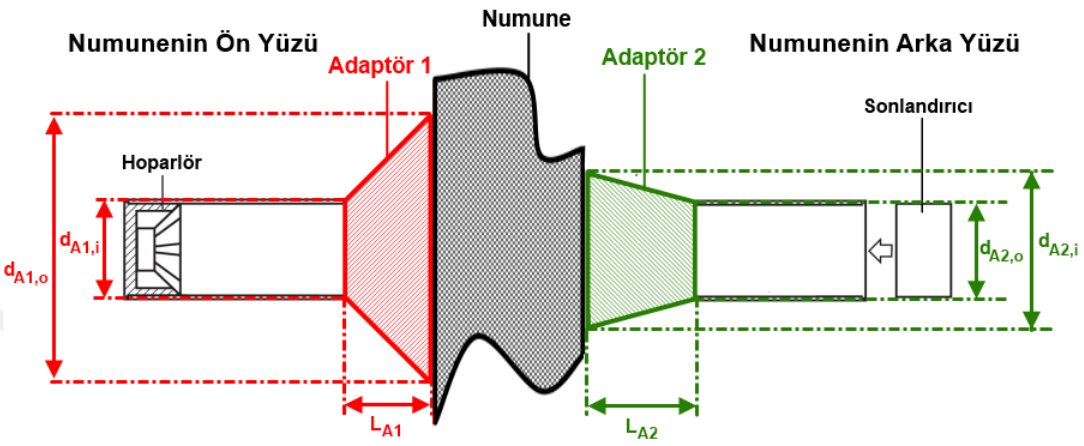
Alçının akustik performansını değerlendirmek için empedans tüpü kullanılacaktır. Bu yöntem, farklı katkı oranlarında hazırlanmış alçı numunelerinin ses emilimi ve yansıma özelliklerini belirlemeyi amaçlamaktadır. Katkıların alçı matrisine olan etkileri bu testlerle analiz edilerek, malzemenin akustik kalitesi ölçülmek istenmiştir. Testler, standartlara uygun koşullarda gerçekleştirilmiştir. Ses emilim katsayısı α, ses yansıma katsayısı ile ilişkili olarak formül 6.2 ile hesaplanmıştır [51].

$$\alpha = 1 - \left(\frac{P_r}{P_i}\right)^2 \tag{6.2}$$

α: Ses yutma katsayısı,

P_r: Yansıyan ses dalgasının gücü,

$P_İ$: Gelen ses dalgasının gücü.

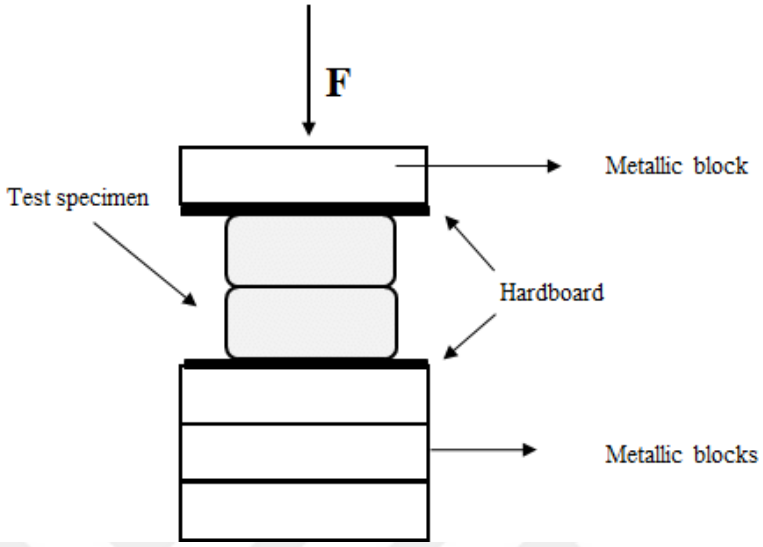


Şekil 6.8. *Empedans tüpünün şematik olarak gösterimi.*

6.3.9. Basma mukavemet testi

Alçı numunelerinin mekanik dayanımını belirlemek amacıyla Instron 5581 cihazı kullanılarak basma testi uygulanmıştır. Bu testte, farklı oranlarda cam küre, granül ve SLS katkıları içeren alçı numunelerinin mekanik performansları karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Test sırasında numuneler bir plaka üzerine dikkatlice yerleştirilmiş ve üst plakadan numuneye kontrollü bir kuvvet uygulanmıştır. Alt plaka sabit kalacak şekilde, üst plakadan uygulanan basınç kuvveti artırılarak, numunenin kırılmadan önce dayanabileceği maksimum mukavemet değeri belirlenmiştir. Basma mukavemeti hesaplaması, numuneye uygulanan maksimum kuvvetin, kuvvetin uygulandığı yüzey alanına oranı ile yapılmıştır. Bu süreçte, numunenin düzgün bir şekilde yerleştirilmesine ve doğru yüzey alanının ölçülmesine özen gösterilmiştir. Elde edilen veriler, alçı matrisine eklenen cam küre, granül ve SLS katkılarının malzemenin mekanik dayanımı üzerindeki etkilerini anlamak açısından kritik öneme sahiptir. Bu yöntem, katkı maddelerinin alçı matrisine olan etkilerini detaylı bir şekilde analiz etmeye olanak sağlamış ve alçının yük taşıma kapasitesi ile kırılma dayanımı gibi özelliklerin optimize edilmesi için değerli bilgiler sunmuştur. Test numunesinin ASTM C133-97 standartlarında, basınç dayanımını ölçmek amacıyla iki metal blok arasına yerleştirilip,

üzerine uygulanan kuvvet (Şekil 6.9) ile test edilmiştir. Numunenin basınç dayanımı, uygulanan kuvvetin kesit alanına oranı ile hesaplanmaktadır.



Şekil 6.9. *Basınç dayanımı testinin şematik gösterimi [63].*

$$\sigma_c = \frac{F}{A} \tag{6.3}$$

σ_c: Basma dayanımı (MPa),

F: Maksimum yük (N),

A: Numune kesit alanı (mm^2).

6.3.10. Vakumlu su emme ile arşimet analizi

Vakumlu su emme sistemi, alçı numunelerinin yoğunluk, gözeneklilik ve su emme kapasitelerinin belirlenmesinde kullanılmıştır. Bu yöntem, numunenin kuru, doygun ve su altındaki kütlelerini ölçerek hacimsel özelliklerini hesaplamak için Arşimet prensibine dayanmaktadır. Test sırasında, numuneler belirli bir süre vakum altında tutulmuş ve tüm gözeneklerin su ile dolması sağlanır. Daha sonra, suya doymuş numuneler tartılmış ve su altındaki ağırlıkları kaydedilir. Numunelerin porozite ve su emme oranı değerleri, aşağıdaki formüller kullanılarak hesaplanmıştır.

$$P = \frac{W_S - W_d}{W_S - W_w}.100 \tag{6.4}$$

P: Toplam gözeneklilik (%),

Ws: Doygun haldeki kütle (g),

Wd: Kuru kütle (g),

Ww: Su altındaki kütle (g).

$$S = \frac{W_S - W_d}{W_d} . 100 \tag{6.5}$$

S: Su emme kapasitesi (%),

Ws: Doygun haldeki kütle (g),

Wd: Kuru kütle (g).

Bu yöntem, alçı numunelerinin gözenek yapısını ve su emme davranışını detaylı bir şekilde incelemek için kullanılmıştır. Özellikle cam küre, granül ve SLS katkılarının bu özellikler üzerindeki etkilerini değerlendirmek amacıyla uygulanmıştır.

Tablo 6.6. *Deneysel çalışmada kullanılan test yöntemleri ve amaçları.*

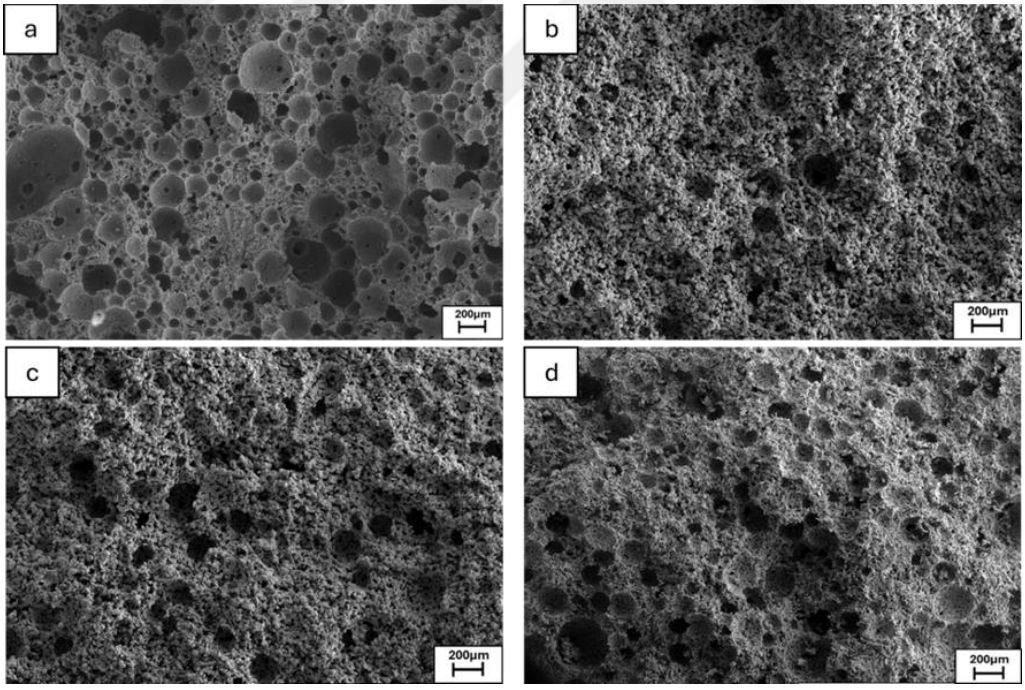
Test Yöntemi	Amaç
XRF (X-Ray Floresans)	Alçı, cam küre ve granül hammaddelerinin kimyasal bileşimlerini analiz etmek.
SEM (Taramalı Elektron Mikroskobu)	Alçı, cam küre ve granülün alçı matrisine entegrasyonunu ve yüzey morfolojisini incelemek.
Optik Mikroskop	SLS katkısının porozite oluşumu üzerindeki etkisini ve alçı, cam küre ve granül katkılarının dağılım homojenliğini değerlendirmek.
Helyum Piknometresi	Alçı, cam küre ve granül hammaddelerinin gerçek yoğunluklarını belirlemek.
BET Analizi	Granül numunelerinin spesifik yüzey alanını ve gözenek yapısını incelemek.
Tane Boyut Ölçüm Cihazı	Granül ve cam kürelerin tane boyut dağılımını analiz ederek homojen dağılımı değerlendirmek.
Termal İletkenlik Testi	Alçı, cam küre ve granül katkılarının alçı matrisindeki ısı transferi üzerindeki etkilerini incelemek.
Akustik Performans Testi	Alçı, cam küre ve granül katkılarının alçı matrisindeki ses emilimi ve yansıma özelliklerini değerlendirmek.
Basma Testi	Alçı, cam küre ve granül katkılarının alçı numunelerinin mekanik dayanımına etkisini belirlemek.
Vakumlu Su Emme ile Arşimet Analizi	Alçı numunelerinin yoğunluk, gözeneklilik ve su emme kapasitelerinin belirlemek.

7. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

7.1. SLS (Sodyum Laureth Sülfat) Katkısının Alçı Matrisine Etkileri

7.1.1. SLS katkısının porozite oluşumuna etkisi

Şekil 7.1a, ticari alçı numunesinin düzenli ve homojen bir kristal yapıya sahip olduğunu göstermektedir. Kristaller arasında doğal olarak oluşan küçük gözenekler gözlemlenmiştir. Bu yapı, alçının yoğun bir mikroyapıya sahip olduğunu göstermektedir. Buna karşılık, şekil 7.1d, %3 SLS katkılı numuneyi temsil etmektedir. Görselde, gözenek boyutlarının önemli ölçüde arttığı, yüzeyin daha düzensiz hale geldiği ve gözenek sayısının ticari alçı numunesine kıyasla benzer seviyede kaldığı gözlemlenmiştir. Bu durum, SLS'nin köpük oluşturma etkisiyle malzeme yapısındaki gözenek boyutlarının büyüdüğünü, ancak gözenek sayısının ticari numuneye benzer bir düzeyde korunduğunu göstermektedir. Bu yapı değişikliği, açık gözenek oluşumunun malzemenin termal ve akustik performansı üzerindeki olumlu etkisine işaret etmektedir.



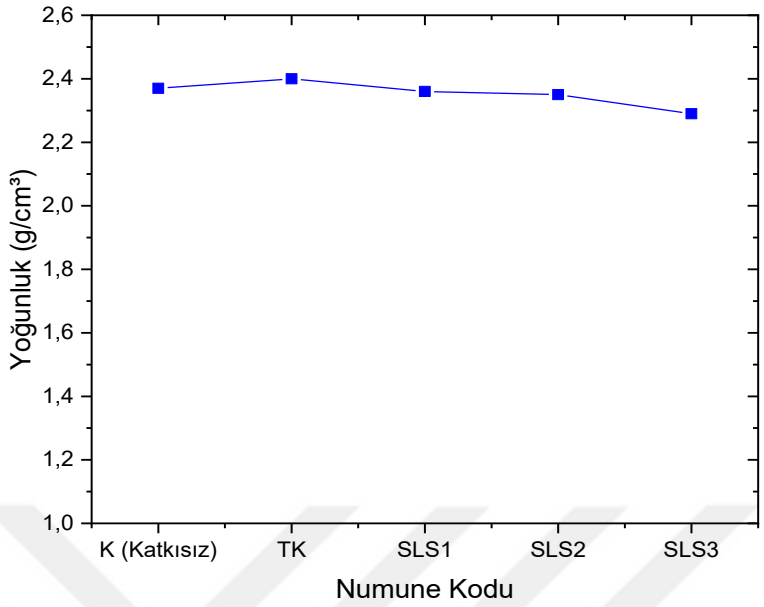
Şekil 7.1. *Kartonpiyer alçısı ve farklı oranlarda SLS katkısı içeren numunelerin SEM görüntüleri. a) Ticari kartonpiyer alçısı, b) %1 SLS katkılı numune, c) %2 SLS katkılı numune, d) %3 SLS katkılı numune.*

7.1.2. SLS katkısının yoğunluğa ve yüzey alanına etkisi

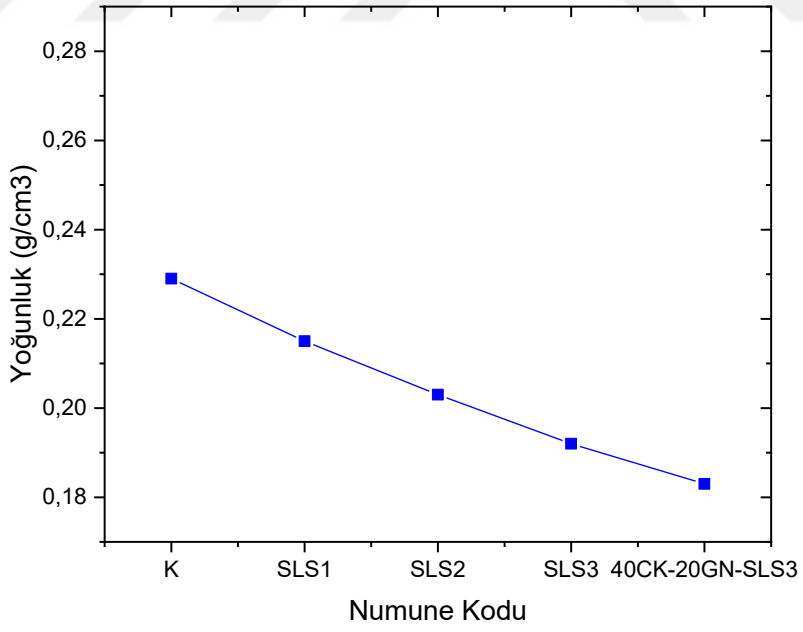
Şekil 7.2'de helyum piknometresi ile belirlenen gerçek yoğunluk değerleri verilmiştir. Helyum gazı, numunelerdeki en küçük açık gözeneklere dahi nüfuz edebildiğinden, bu yöntem yalnızca katı fazın yoğunluğunu ölçmektedir. K, TK ve SLS katkılı numuneler karşılaştırıldığında, SLS katkısının artmasıyla birlikte gerçek yoğunluk değerlerinde önemli bir değişim gözlemlenmemiştir. Bu durum, SLS katkısının malzemenin kimyasal yapısında ya da katı faz yoğunluğunda belirgin bir değişime yol açmadığını göstermektedir.

Şekil 7.3'te ise numunelerin hacim-tartım yöntemiyle belirlenen görünen yoğunluk değerleri sunulmuştur. Burada, SLS katkısı ile birlikte yoğunlukta belirgin bir azalma meydana geldiği görülmektedir. SLS oranının artmasıyla oluşan kapalı ve büyük gözenek yapısı, numunenin hacmini artırmış ancak kütlesinde kayda değer bir artış sağlamadığı için görünen yoğunluk düşmüştür. Bu sonuç, SLS katkısının mikroyapıda kapalı gözenekler oluşturarak yapının genel yoğunluğunu düşürdüğünü ve bu değişimin SEM görüntüleriyle desteklendiğini ortaya koymaktadır.

Elde edilen bulgular, SLS katkısının gerçek yoğunluk üzerinde etkili olmadığını, ancak makroskopik ölçekte gözenek yapısını değiştirerek malzemenin hafiflemesine katkı sağladığını göstermektedir.



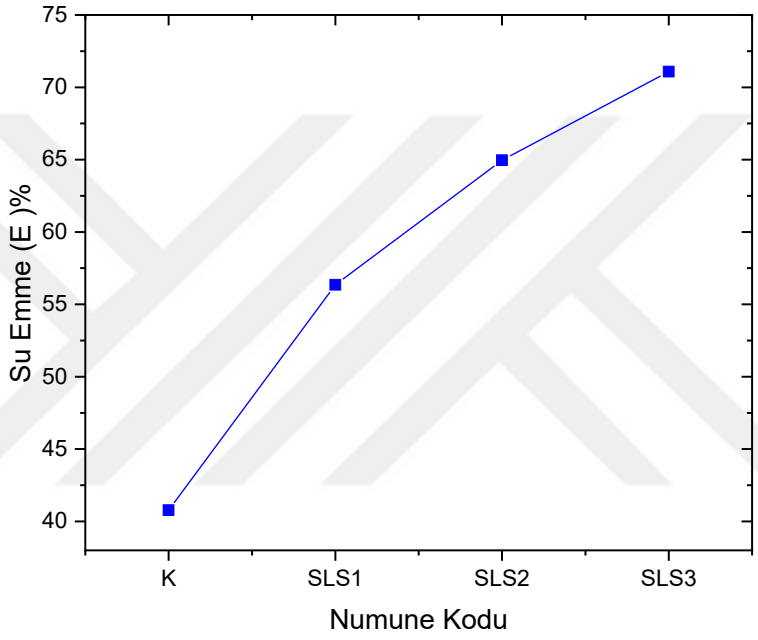
Şekil 7.2. *SLS katkısının yoğunluğa etkisi.*



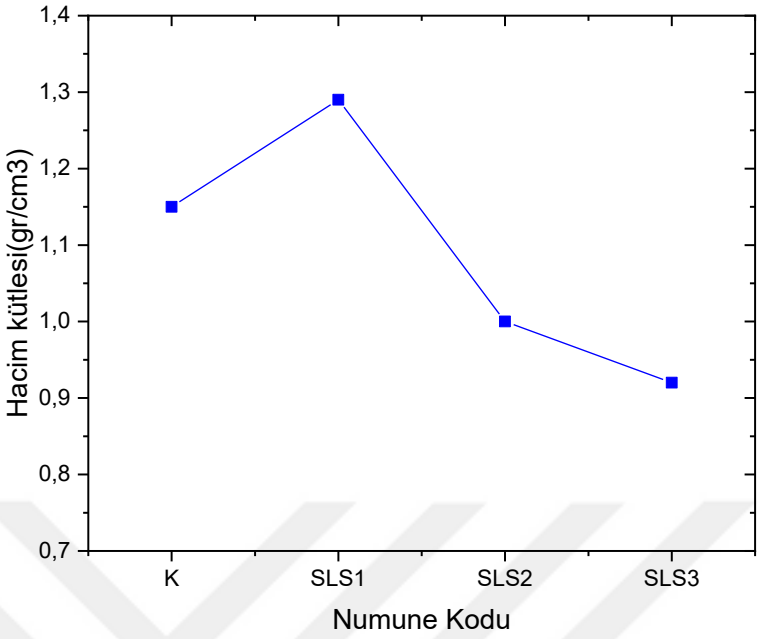
Şekil 7.3. *SLS oranının malzeme yoğunluğuna etkisi.*

SLS miktarının artışı (%1, %2, %3), numunelerin su emme oranında belirgin bir artışa neden olmuştur. Bu durum, SLS'nin köpük oluşturma özelliği ile mikroyapıda açık

gözeneklerin arttığını ve bu gözeneklerin suyu daha fazla tutabildiğini göstermektedir. Hacimsel yoğunluk grafiğine baktığımızda SLS miktarındaki artışla birlikte hacim kütlesinin düştüğü görülmektedir. Bu durum, SLS'nin malzemenin toplam yoğunluğunu azaltarak mikroyapıda boşluklu bir yapı oluşturduğunu işaret eder. Grafiklerden şekil 7.4 SLS katkısının su emme oranına etkisini ve şekil 7.5 SLS katkısının hacim kütlesine etkisini göstermektedir.



Şekil 7.4. *SLS katkısının su emme oranına etkisi.*



Şekil 7.5. *SLS katkısının hacim kütlesine etkisi.*

SLS katkısının malzemenin mikroyapısal özelliklerine etkisini belirlemek amacıyla BET yüzey alanı analizi gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar Tablo 7.1'de verilmiştir. Analiz sonuçlarına göre, SLS katkısı ile birlikte yüzey alanı ve toplam por hacminde artış gözlemlenmiştir. Bu durum, SLS katkısının numune içerisinde daha açık ve mikro boyutlu gözenek yapıları oluşturarak yüzey alanını artırdığını göstermektedir.

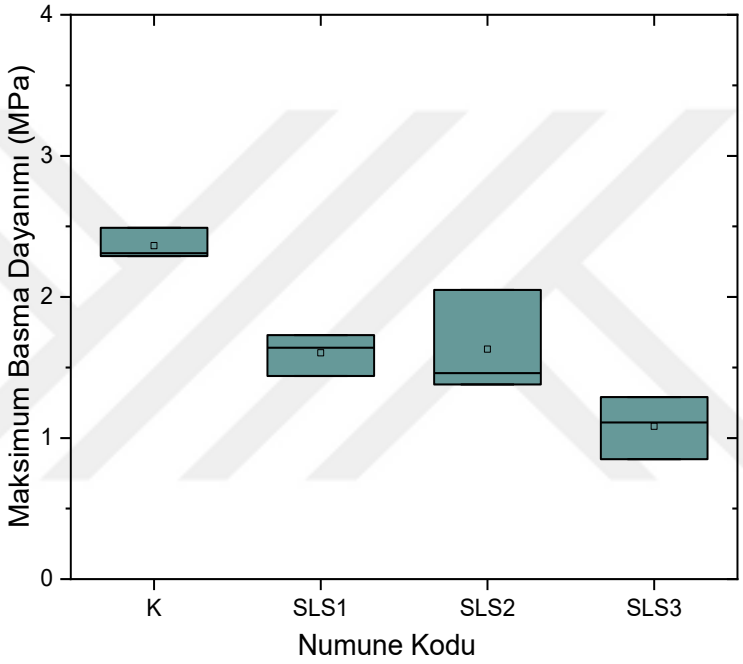
Tablo 7.1. *Numunelere Ait BET Yüzey Alanı Sonuçları.*

Numune	**Yüzey alanı (m^2/g)**
Katkısız	9,850
SLS3	12,334

7.1.3. SLS katkısının mukavemete etkisi

Şekil 7.6, alçı numunelerine farklı oranlarda SLS katkısı eklenerek oluşturulan açık porozitenin maksimum basma dayanımı üzerindeki etkisini göstermektedir. Katkısız numune (K), en yüksek basma dayanımı ve en dar dağılım aralığına sahipken, SLS katkısı miktarının artışıyla birlikte basma dayanımında genel bir azalma eğilimi gözlemlenmiştir. Bu durum, SLS katkısının köpükleme özelliği sayesinde malzemede açık porozite

oluşturarak yoğunluğu ve dolayısıyla mekanik dayanımı düşürdüğünü ortaya koymaktadır. SLS2 numunesi, diğer SLS katkılı numunelere göre daha geniş bir dağılım aralığı göstererek, porozite oluşumunun heterojen yapıda olabileceğini işaret etmektedir. En düşük dayanım değeri ise SLS3 numunesinde gözlemlenmiştir; bu da yüksek SLS katkısının daha fazla porozite oluşturarak dayanımı önemli ölçüde azalttığını göstermektedir.

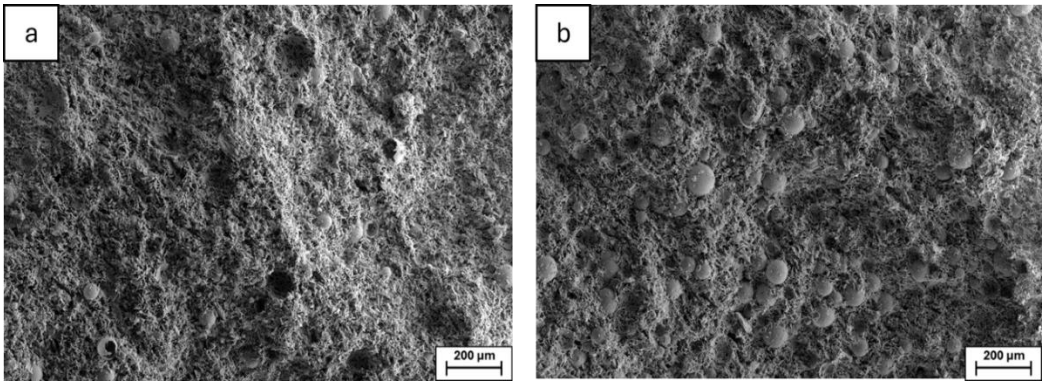


Şekil 7.6. *SLS katkısının alçı malzemelerin maksimum basma dayanımına etkisi.*

7.2. Cam Küre Katkısının Alçı Matrisine Etkileri

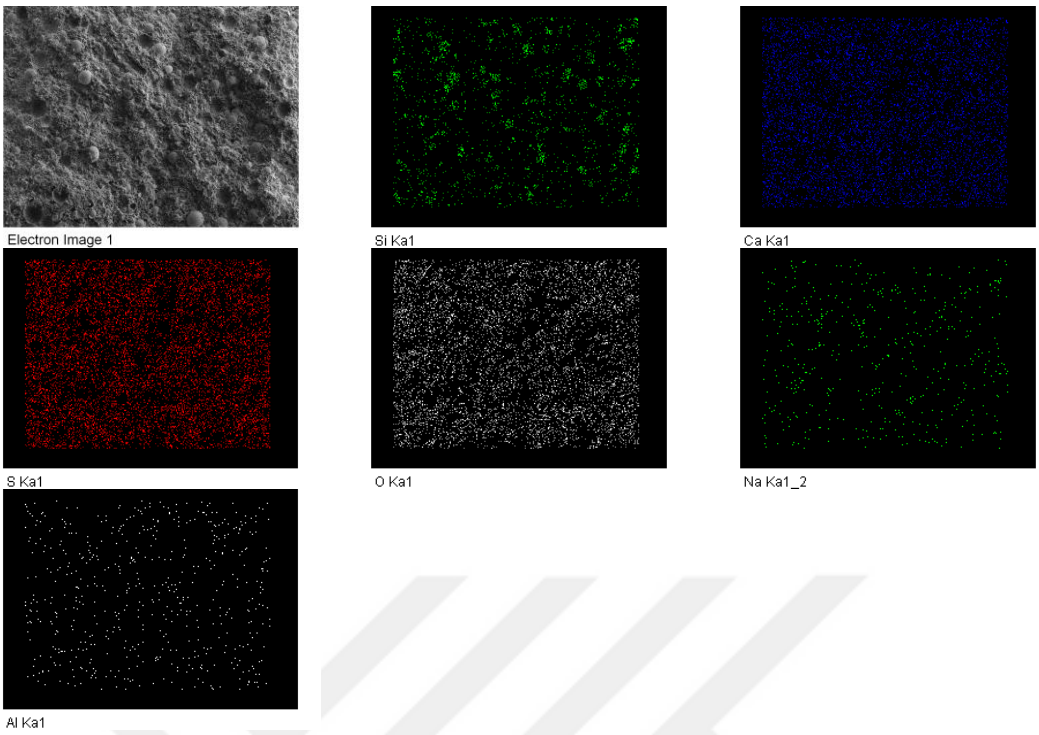
7.2.1. Cam küre katkısının mikroyapıya etkisi

Şekil 7.7a, %10 cam küre (CK10) katkılı numuneyi temsil ederken, Şekil 7.7b, %30 cam küre (CK30) katkılı numuneye aittir. Şekil 7.7a'da, cam kürelerin malzeme içerisinde homojen bir dağılım gösterdiği ve mikroyapıya kapalı gözenekler kazandırdığı gözlemlenmiştir. Şekil 7.7b'de ise cam küre oranının artmasıyla malzemede daha belirgin bir düzensizlik oluştuğu görülmektedir. Bu durum malzemenin termal ve akustik yalıtım performansını iyileştirdiğini göstermektedir.



Şekil 7.7. *Cam küre katkılı numunelere ait SEM görüntüleri. a) %10 cam küre (CK10) katkılı numune, b) %30 cam küre (CK30) katkılı numune.*

CK30 numunesine ait Si ve S element haritaları (Şekil 7.8) cam kürelerin ve alçı matrisinin mikroyapıdaki katkısını net bir şekilde göstermektedir. Si Ka1 haritasında, silikon elementinin cam kürelerin bulunduğu bölgelerde yoğunlaştığı, cam kürelerin yapısının silika bazlı olduğunu doğrulamaktadır. Bu yoğunlaşma, cam kürelerin matris içinde iyi bir şekilde dağıldığını göstermektedir. S Ka1 haritasında ise kükürt elementinin alçı matrisinde homojen bir dağılım sergilediği ve bağlayıcı yapıdaki rolünü koruduğu görülmektedir. Bu durum, CK30 numunesinde cam küre katkısına rağmen matrisin kimyasal bütünlüğünün devam ettiğini göstermektedir.



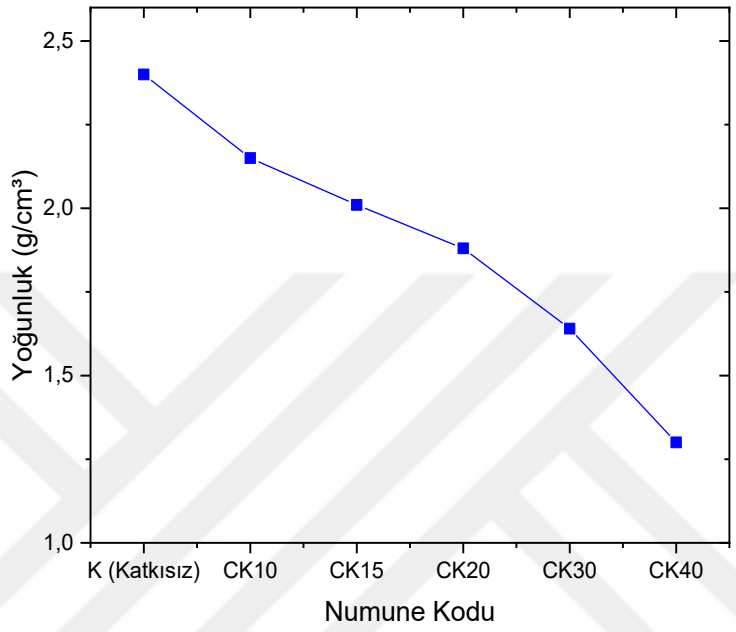
Şekil 7.8. *CK30 numunesine ait SEM görüntüsü ve Si ile S elementlerinin mikroyapıdaki dağılımını gösteren mapping analizi.*

7.2.2. Cam küre katkısının yoğunluğa etkisi

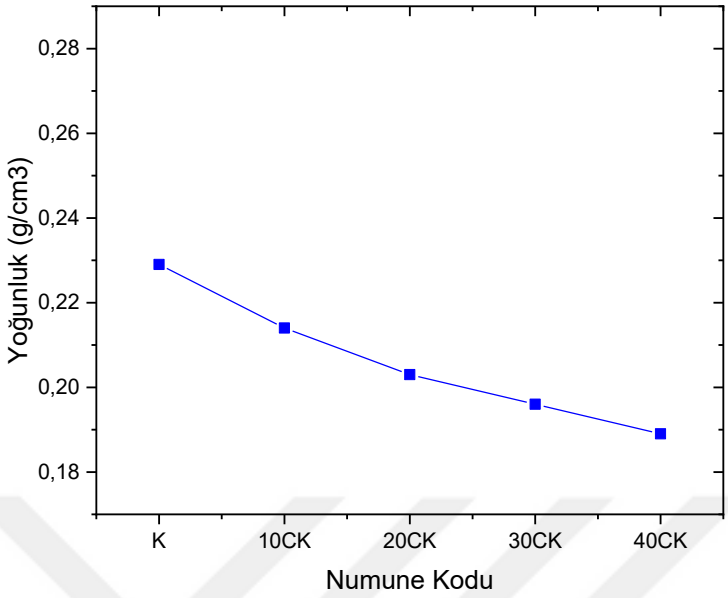
Şekil 7.9'da helyum piknometresi ile ölçülen gerçek yoğunluk değerleri sunulmuştur. Katkısız numune (K) ve farklı oranlarda cam küre katkılı numuneler (CK10, CK15, CK20, CK30, CK40) incelendiğinde, cam küre miktarının artmasıyla birlikte gerçek yoğunluk değerlerinde belirgin bir azalma gözlemlenmiştir. Cam kürelerin düşük yoğunlukları (yaklaşık 0,5 g/cm³) ve kapalı gözenekli yapıları nedeniyle, helyum piknometresi ölçüm prensibi gereği bu kapalı gözeneklere tam olarak ulaşamamaktadır. Buna rağmen, cam kürelerin düşük yoğunluklu yapısının matris içinde hakim olması, toplam katı fazın yoğunluğunda ölçülebilir bir azalmaya yol açmıştır.

Şekil 7.10'da ise numunelerin tartım ve hacim hesaplamalarıyla hesaplanan yoğunluk değerleri sunulmuştur. Cam küre katkı oranı arttıkça, yapı içerisinde oluşan kapalı gözenek miktarı artmış ve buna bağlı olarak görünen yoğunlukta belirgin bir düşüş meydana gelmiştir. Bu durum, cam küre katkısının yapı içinde hem malzeme yoğunluğunu düşürdüğünü hem de gözeneklilik oranını artırarak hafif bir yapı oluşturduğunu göstermektedir.

Elde edilen sonuçlar, cam küre katkısının hem gerçek yoğunluk hem de görünen yoğunluk üzerinde azaltıcı bir etki yarattığını ve kapalı gözenek yapısının malzemenin hafiflemesinde önemli rol oynadığını ortaya koymaktadır.



Şekil 7.9. *Cam küre (CK) katkısının yoğunluğa etkisi.*



Şekil 7.10. *Cam küre oranının malzeme yoğunluğuna etkisi.*

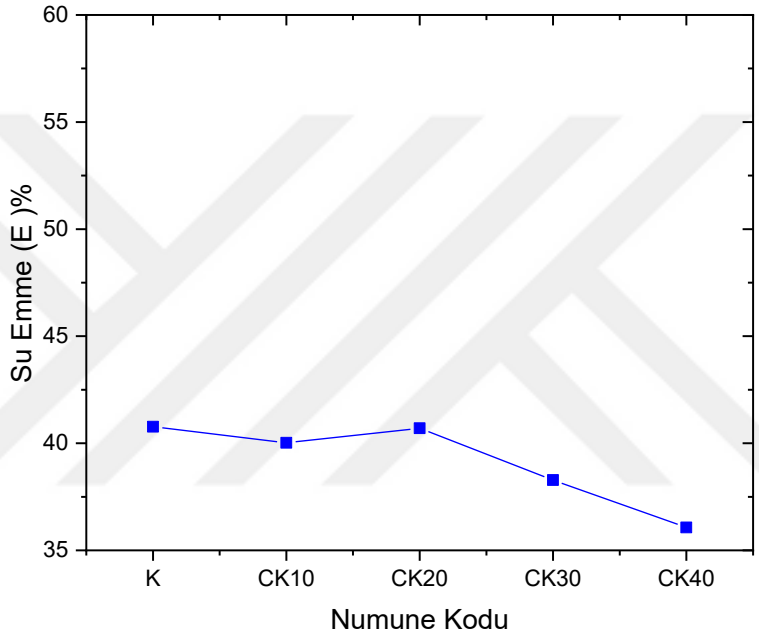
Grafikler incelendiğinde, cam küre katkı oranının %10, %20, %30 ve %40'a yükselmesiyle birlikte numunelerin su emme yüzdelerinde düzenli bir artış gözlemlenmiştir. Bu artış, ilk etapta cam kürelerin mikroyapıda gözenek bağlantılarını artırarak suyun numune içerisine daha kolay nüfuz etmesine neden olduğu şeklinde yorumlanabilir. Bununla birlikte, cam küre katkısının yalnızca gözenek yapısını değiştirmediği, aynı zamanda alçı matrisinin toplam oranını azalttığı da göz önünde bulundurulmalıdır. Cam küre eklenmesiyle birlikte numunedeki aktif alçı miktarı azalmakta, dolayısıyla yapının su emme kapasitesi doğrudan değişmektedir. Bu nedenle ölçülen su emme değerlerinin doğru yorumlanabilmesi için mevcut alçı oranı dikkate alınarak değerlendirilmesi gerekmektedir.

Bu çalışmada, cam küre katkı oranı arttıkça aktif alçı oranı %90, %80, %70 ve %60 seviyelerine düşmüştür. Yapıdaki aktif fazdaki bu azalma dikkate alındığında, gerçek su emme kapasitesinin ölçülen değerlerden daha düşük olduğu anlaşılmaktadır. Başka bir deyişle, alçı oranı azaldığı halde ölçülen su emme değerleri mutlak olarak artmış görünse de, yapıdaki her birim alçı başına düşen su emme miktarı gerçekte azalmıştır.

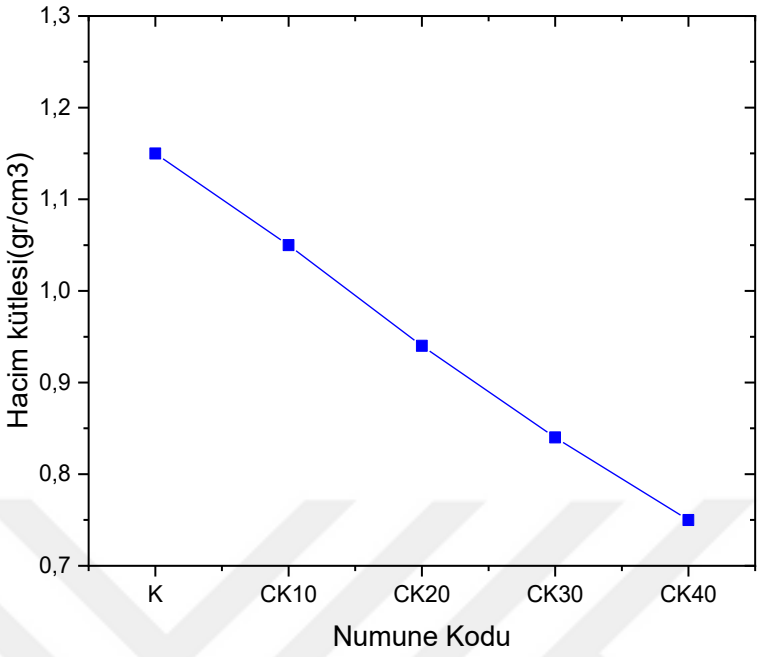
Bu sonuç, cam küre katkısının mikroyapıda suyun ilerleyebileceği yolları belirli ölçüde sınırladığını ve su emme kapasitesini düşürdüğünü göstermektedir. Ayrıca cam

kürelerin düşük yoğunluklu yapısı, numunelerin hacim kütlesinde de düzenli bir azalmaya neden olmuştur.

Şekil 7.11'de cam küre katkısının su emme oranına etkisi, Şekil 7.12'de ise cam küre katkısının hacim kütlesine etkisi grafiksel olarak sunulmuştur. Elde edilen bulgular, cam küre katkısının hem su emme hem de yoğunluk üzerinde çift yönlü bir yapısal değişim sağladığını ortaya koymaktadır.



Şekil 7.11 *Cam küre katkısının su emme oranına etkisi.*



Şekil 7.12 *Cam küre katkısının hacim kütlesine etkisi.*

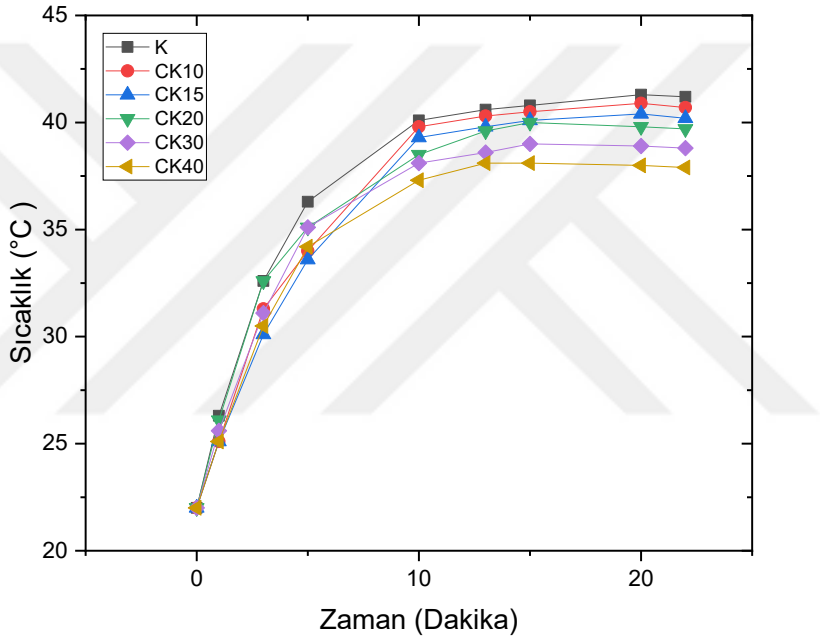
Tablo 7.2 incelendiğinde, cam küre katkı oranı arttıkça numunelerin spesifik yüzey alanlarında bir artış meydana geldiği görülmektedir. Bu artış, cam küre katkısının alçı matrisi içerisinde ek yüzeyler oluşturmasından ve cam kürelerin yüzeylerinin sisteme kazandırdığı ilave yüzey alanından kaynaklanmaktadır. Cam küreler, kapalı ve düşük yoğunluklu yapıları sayesinde gözenekli bir yapı oluşturmaksızın, matris içerisinde arayüzey alanını artırmış ve bu durum BET analizi ile doğrulanmıştır.

Tablo 7.2. *Cam Küre Katkılı Numunelere Ait BET Yüzey Alanı Sonuçları.*

Numune	**Yüzey alanı (m^2/g)**
Katkısız	9,850
%40 CK	13,843

7.2.3. Cam küre katkısının ısıl iletkenliğe etkisi

Grafikten (Şekil 7.13) görüldüğü üzere, cam küre katkısının artışı (CK10, CK15, CK20, CK30, CK40) ile sıcaklık dağılımı yavaşlamış ve malzemenin ısıl iletkenliği azalmıştır. Cam kürelerin düşük yoğunluklu ve kapalı gözenek yapısı, ısı transferini sınırlayarak termal iletkenliği azaltmıştır. Özellikle CK40 numunesinde, katkısız alçıya kıyasla önemli bir yalıtım etkisi gözlemlenmiştir. Bu sonuç, cam kürelerin gözenekli yapılar oluşturarak malzemenin termal performansını iyileştirdiğini göstermektedir.

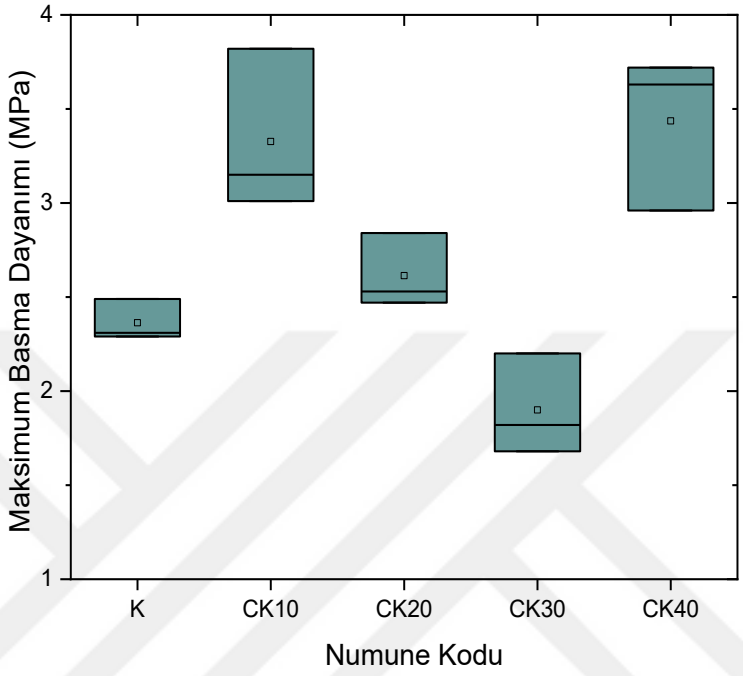


Şekil 7.13. *Cam küre (CK) katkısının sıcaklık dağılımına etkisi.*

7.2.4. Cam küre katkısının mekanik dayanıma etkisi

Şekil 7.14, alçı numunelerine farklı oranlarda cam küre (CK) eklenerek kapalı porozite oluşturulmasının maksimum basma dayanımı üzerindeki etkisini göstermektedir. Katkısız numune (K), en düşük dayanım değerine sahipken, CK katkısı ile dayanımda genel bir artış gözlemlenmiştir. Özellikle CK10 ve CK40 numuneleri, dayanımın arttığı ve dağılımın geniş olduğu dikkat çekici örneklerdir. CK20 ve CK30 numunelerinde dayanım değerlerinin daha düşük olması, cam kürelerin homojen dağılımındaki varyasyonlara bağlanabilir. CK40 numunesi, en yüksek dayanımı ve dar

dağılım aralığıyla optimize edilmiş katkı oranının mekanik performansı artırabileceğini göstermektedir.

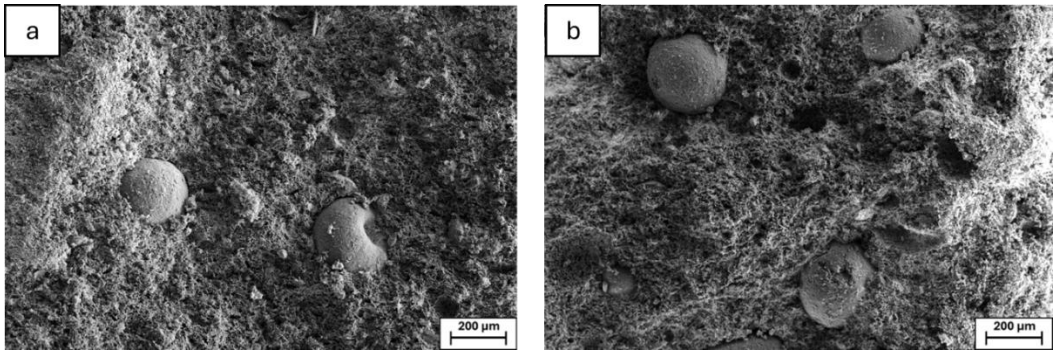


Şekil 7.14. *Cam küre katkısının alçı malzemelerin maksimum basma dayanımına etkisi.*

7.3. Granül Katkısının Alçı Matrisine Etkileri

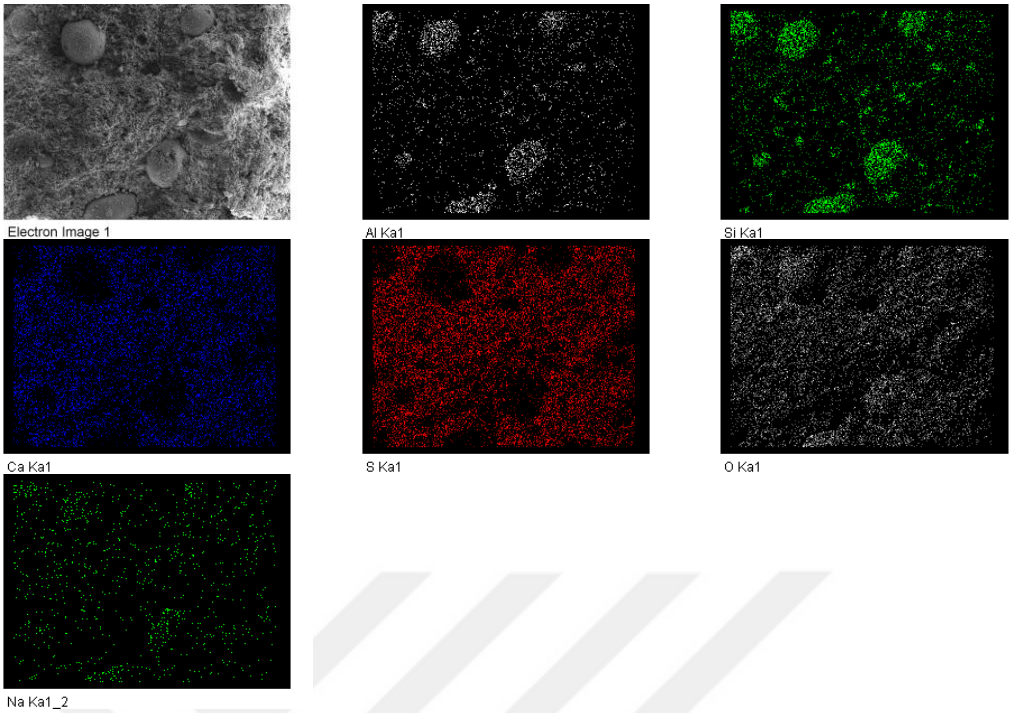
7.3.1. Granül katkısının mikroyapıya etkisi

Şekil 7.15a, %10 granül (GN10) katkılı numuneyi, Şekil 7.15b ise %30 granül (GN30) katkılı numuneyi temsil etmektedir. Şekil 7.15a'da, granüllerin ana matris içerisine homojen şekilde dağıldığı ve mikroyapı ile uyumlu bir şekilde bağlandığı gözlemlenmiştir. Şekil 7.15b'de ise granül oranının artmasıyla birlikte, granüllerin matris içerisinde daha yoğun bir şekilde yer aldığı ve genel yapı içerisinde granül-matris bütünleşmesinin korunduğu görülmektedir. Bu durum, granül katkısının ana yapıyla uyumlu bir şekilde entegre olabildiğini ve homojen bir mikroyapı oluşturduğunu göstermektedir.



Şekil 7.15. *Granül katkılı numunelere ait SEM görüntüleri. a) %10 granül (GN10) katkılı numune, b) %30 granül (GN30) katkılı numune.*

GN30 numunesinde, Si, Ca ve S element haritaları (Şekil 7.16) granüllerin mikroyapıya etkilerini ortaya koymaktadır. Si Ka1 haritası, granüllerin bulunduğu bölgelerde silikon elementinin yoğunlaştığını ve granüllerin silika bazlı yapısını doğrulamaktadır. Bu yoğunluk, granüllerin matrisle güçlü bir şekilde bütünleştiğini göstermektedir. Ca Ka1 haritasında, kalsiyumun matris genelinde homojen bir şekilde dağıldığı ve granüllerin bağlanma bölgelerinde de aktif olduğu gözlemlenmiştir. S Ka1 haritasında ise kükürdün alçı matrisinde düzenli bir dağılım sergilediği ve granüllerle bağlayıcı bir yapı oluşturduğu görülmektedir. Bu sonuçlar, granüllerin alçı matrisiyle kimyasal uyum içinde olduğunu göstermektedir.



Şekil 7.16. *GN30 numunesine ait SEM görüntüsü ve Si, Ca ile S elementlerinin mikroyapıdaki dağılımını gösteren mapping analizi.*

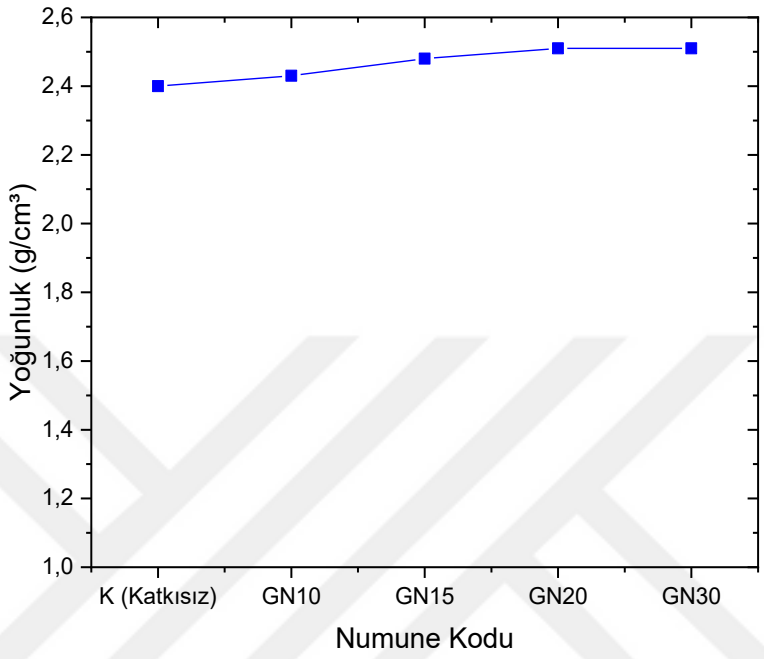
7.3.2. Granül katkısının yoğunluğa etkisi

Şekil 7.17'de helyum piknometresi ile ölçülen gerçek yoğunluk değerleri sunulmuştur. Katkısız numune (K) ile farklı oranlarda granül katkılı numuneler (GN10, GN15, GN20, GN30) karşılaştırıldığında, granül katkısının artmasıyla birlikte yoğunlukta yalnızca sınırlı bir değişim gözlemlenmiştir. Granüllerin yoğunluğunun alçıya yakın olması ve yapının mikroporöz karakterde olması nedeniyle helyum gazı bu boşluklara nüfuz edebilmiş, bu da ölçülen gerçek yoğunluk değerlerinde belirgin bir değişim oluşmamasına neden olmuştur. Ayrıca granül katkısının katı faz yapısında önemli bir değişikliğe yol açmadığı ve toplam yoğunluğun helyum piknometresi ölçümlerinde ciddi bir farklılık yaratmadığı değerlendirilmiştir.

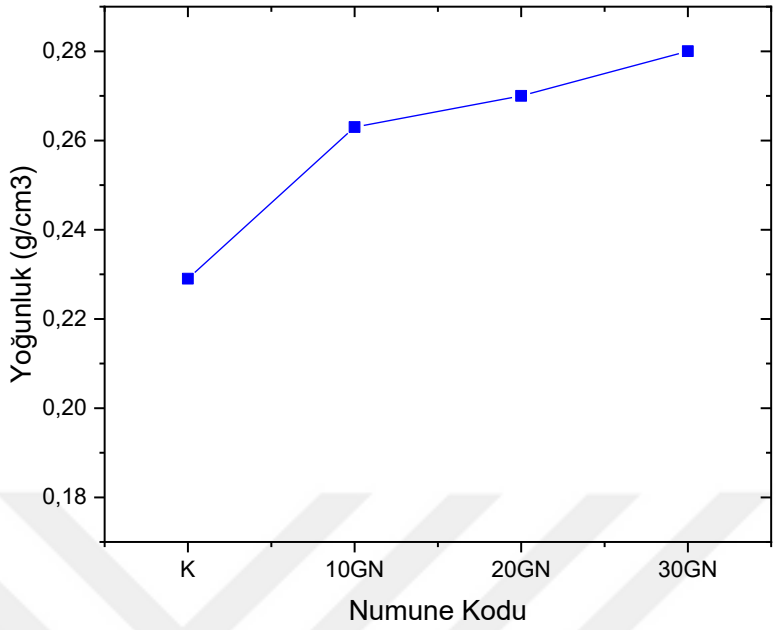
Şekil 7.18'de ise tartım yöntemiyle hacim hesaplaması yapılmış ve yoğunluk değerleri sunulmuştur. Granül oranı arttıkça, numunelerin görünen yoğunluklarında kademeli bir artış meydana geldiği gözlemlenmiştir. Granül katkısının, yapı içerisinde mekanik olarak entegre olması ve makroskobik boşlukları azaltması, toplam hacimde önemli bir artışa neden olmadan görünen yoğunluğun yükselmesine katkıda bulunmuştur.

Elde edilen bulgular, granül katkısının yapı içerisine homojen bir şekilde dağılabildiğini, gerçek yoğunluk üzerinde sınırlı bir etkisi olmasına rağmen, görünen

yoğunluk üzerinde düzenli bir artış sağladığını ve bu yapısal bütünlüğün malzeme performansını desteklediğini göstermektedir.



Şekil 7.17. *Granül (GN) katkısının yoğunluğa etkisi.*

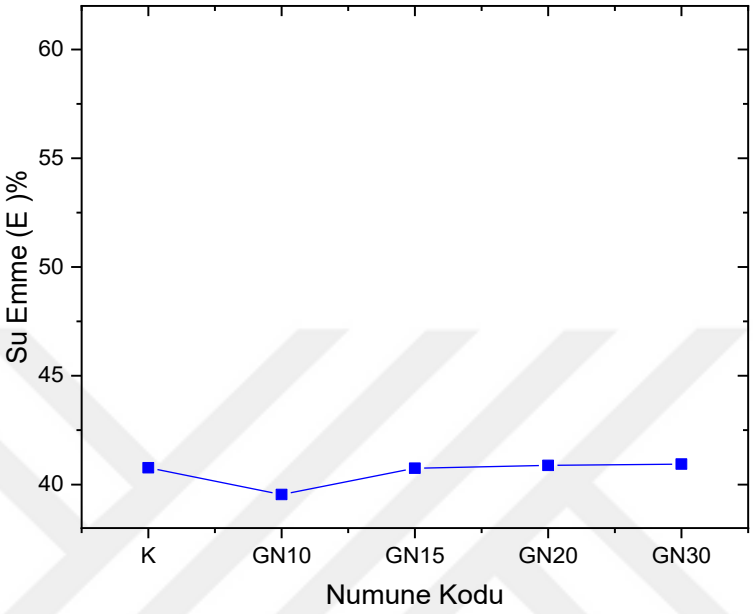


Şekil 7.18. *Granül oranının malzeme yoğunluğuna etkisi.*

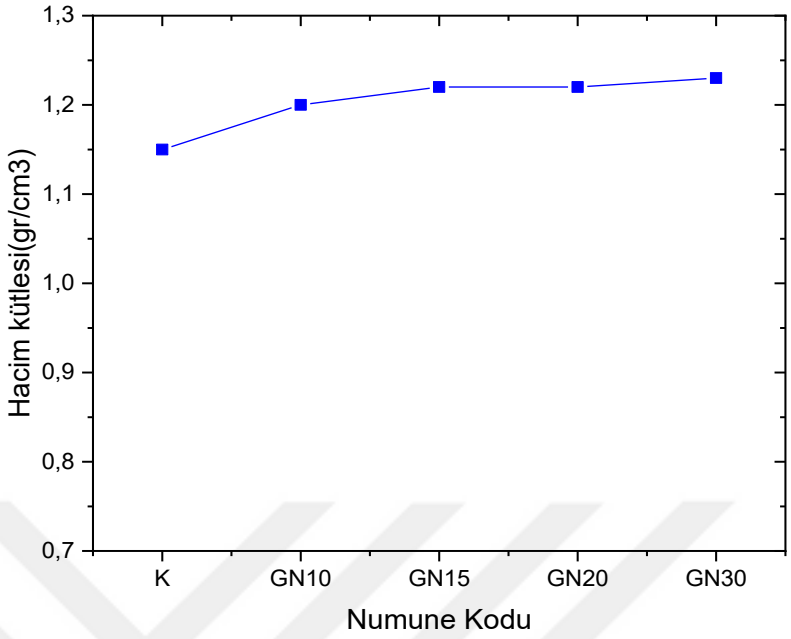
Şekil 7.19'de granül katkı miktarının (%10, %15, %20 ve %30) artmasıyla birlikte numunelerin su emme oranlarında önemli bir değişim olmadığı gözlemlenmiştir. Su emme değerleri, granül oranı arttıkça neredeyse sabit kalmıştır. BET analizi sonuçlarına göre granüllerin yüksek yüzey alanına ve mikrogözenekli bir yapıya sahip olduğu belirlenmiştir. Ancak vakumlu Arşimet yöntemiyle gerçekleştirilen su emme ölçümlerinde, suyun granüllerin mikro boyuttaki iç gözeneklerine nüfuz edemediği anlaşılmaktadır. Bu durum, granül oranı artmasına rağmen su emme değerlerinde belirgin bir artış gözlemlenmemesinin temel nedeni olarak değerlendirilmektedir. Ayrıca, granüllerin matris içerisinde homojen bir şekilde dağılması da su emme performansının korunmasına katkı sağlamıştır.

Şekil 7.20'de ise hacimsel yoğunluk değerleri sunulmuştur. Granül katkı oranının artmasıyla birlikte hacim kütlesinde hafif bir artış eğilimi gözlemlenmiştir. Granüllerin kompakt ve yoğun yapısının matris içerisine entegrasyonu, malzemenin genel hacim kütlesinin yükselmesine neden olmuştur. Bu sonuçlar, granül katkısının mikroyapıda yapısal bütünlüğü artırarak yoğunluk üzerinde kademeli bir etki yarattığını göstermektedir.

Grafiklerden, Şekil 7.18'de granül katkısının su emme oranına etkisi, Şekil 7.19'da ise hacim kütlesine etkisi detaylı bir şekilde gözlemlenmiştir.



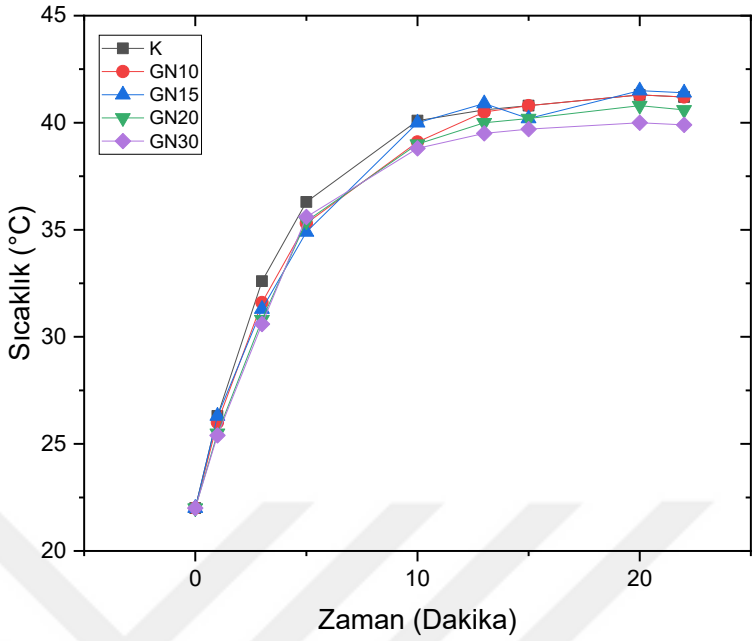
Şekil 7.19. *Granül katkısının su emme oranına etkisi.*



Şekil 7.20. *Granül katkısının hacim kütlesine etkisi.*

7.3.3. Granül katkısının ısıl iletkenliğe etkisi

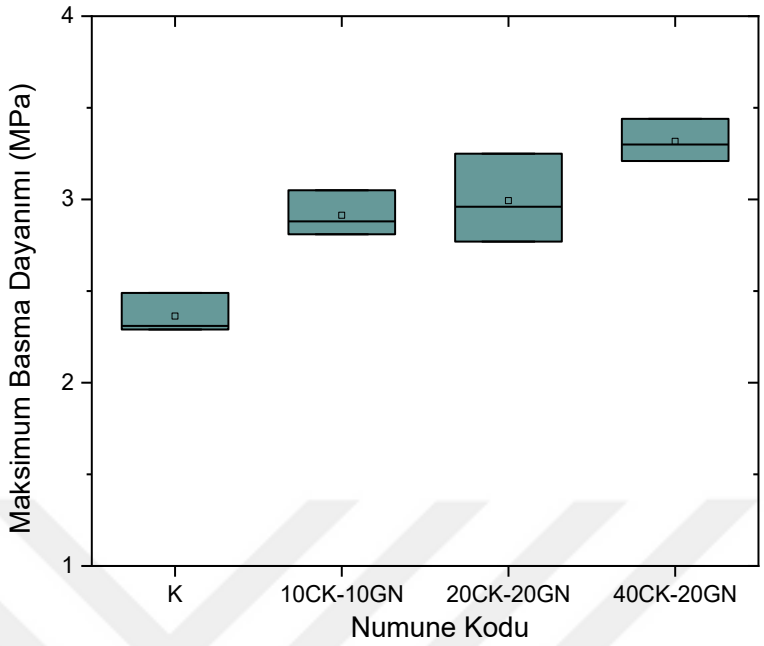
Şekil 7.21'de, granül katkı oranının artışıyla birlikte (GN15, GN20, GN30) sıcaklık artış hızının bir miktar yavaşladığı gözlemlenmiştir. Granüllerin mikroporoz yapısının, ısı transferini sınırlandırarak malzemenin ısıl iletkenliğini düşürdüğü değerlendirilmektedir. Ancak bu düşüş, cam küre katkısında gözlemlenen etkiye kıyasla daha sınırlı kalmıştır. Bu durum, granüllerin yapısında bulunan mikroporların kapalı bir yapıya sahip olmaması ve gözenek bağlantılarının, belirli ölçüde ısı transferine izin vermesiyle açıklanabilir. Ayrıca granüllerin yoğun yapısı, ısı akışını tamamen kesmeden sınırlı bir gecikmeye neden olmuş, böylece sıcaklık artışı daha kontrollü gerçekleşmiştir.



Şekil 7.21. *Granül (GN) katkısının sıcaklık dağılımına etkisi.*

7.3.4. Granül katkısının mukavemete etkisi

Şekil 7.22, alçı numunelerine granül katkısı eklenerek açık ve kapalı porozite oluşturulmasının maksimum basma dayanımı üzerindeki etkisini göstermektedir. Katkısız numune (K), en düşük dayanım değerine sahiptir ve granül katkısının mekanik performansı artırdığı açıkça görülmektedir. GN10, GN20 ve GN30 numunelerinde granül oranının artışıyla dayanım değerleri belirgin şekilde yükselmiştir. Özellikle GN30 numunesi, en yüksek dayanım değerine ve dar bir dağılım aralığına sahip olmasıyla, granül katkısının etkili bir şekilde porozite oluşturduğunu ve yapısal bütünlüğü artırdığını göstermektedir. Bu sonuçlar, granül katkısının hem açık hem kapalı porozite oluşturarak alçı malzemenin hafifliğini ve yalıtım performansını artırırken, mekanik dayanımı koruma veya iyileştirme potansiyeline sahip olduğunu ortaya koymaktadır.



Şekil 7.22. *Cam küre ve granül katkısının alçı malzemelerin maksimum basma dayanımına etkisi.*

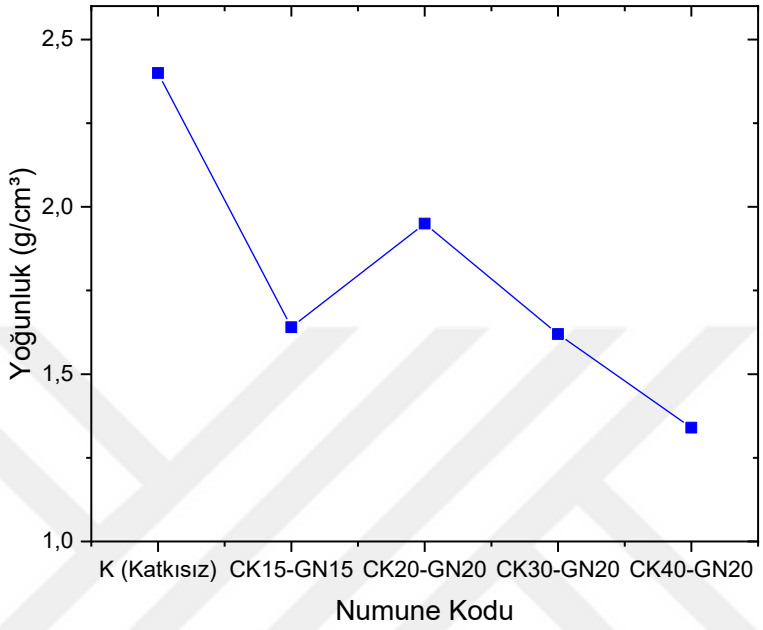
7.4. Cam Küre ve Granül Katkısının Alçı Matrisine Etkileri

7.4.1. Cam küre ve granül katkısının yoğunluğa etkisi

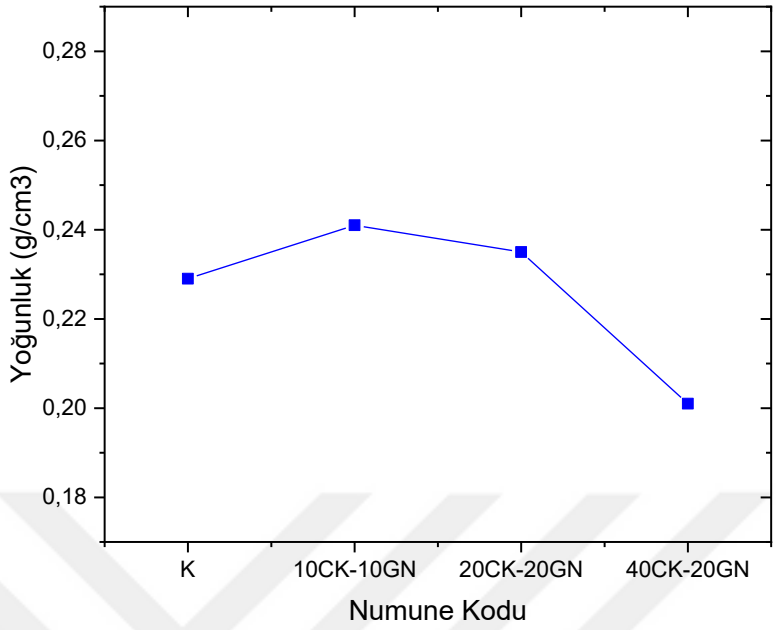
Şekil 7.23'de, cam küre ve granüllerin birlikte kullanıldığı numunelerin helyum piknometresi ile ölçülen gerçek yoğunluk değerleri verilmiştir. Katkısız numune (K) ile karşılaştırıldığında, özellikle CK40-GN20 gibi yüksek cam küre katkılı numunelerde yoğunlukta belirgin bir azalma gözlemlenmiştir. Cam kürelerin düşük yoğunlukları ve kapalı gözenekli yapıları, katı faz hacmini düşürerek gerçek yoğunlukta azalmaya neden olmuştur. Buna karşın, granül katkısının yoğunluğu dengeleyici bir etkisi olmuş, ancak bu etki cam kürelerin yoğunluk düşürücü etkisini tamamen engelleyememiştir. Granüllerin alçıya yakın yoğunlukta olmaları, sistemdeki toplam yoğunluk değişimini sınırlı ölçüde etkilemiştir.

Şekil 7.24'te ise tartım hacim ölçüm yöntemiyle belirlenen yoğunluk değerleri sunulmuştur. Burada da cam küre katkısı arttıkça görünen yoğunlukta düşüş eğilimi gözlemlenmiştir. Granül katkısı, yapısal boşlukların bir kısmını doldurarak görünen yoğunlukta hafif bir artış sağlamış, ancak yüksek oranlı cam küre katkısının etkisi daha baskın olmuştur. Bu sonuçlar, cam küre ve granül katkılarının birlikte kullanımının

yoğunluk üzerinde iki yönlü bir etki yarattığını, cam kürelerin yoğunluk düşürme, granüllerin ise yapı bütünlüğünü koruma eğiliminde olduğunu ortaya koymaktadır.



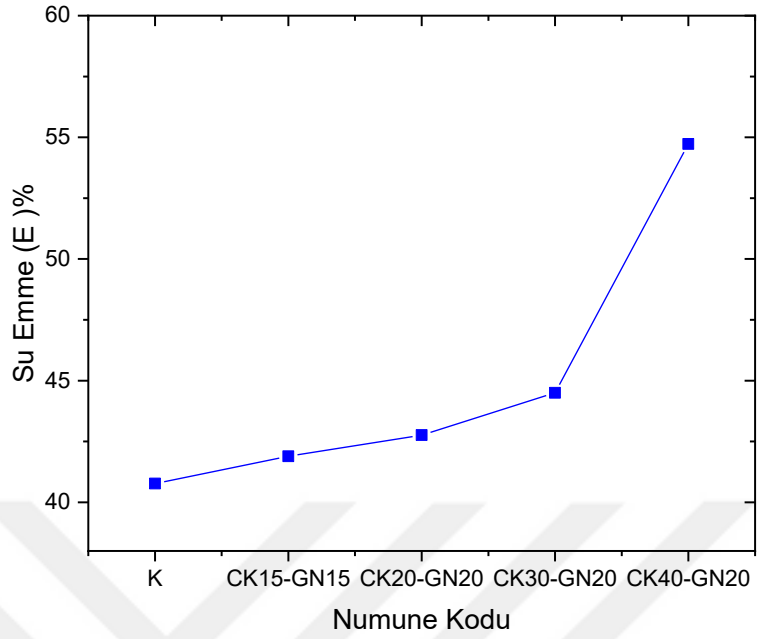
Şekil 7.23. *Cam küre ve granül katkısının yoğunluğa etkisi.*



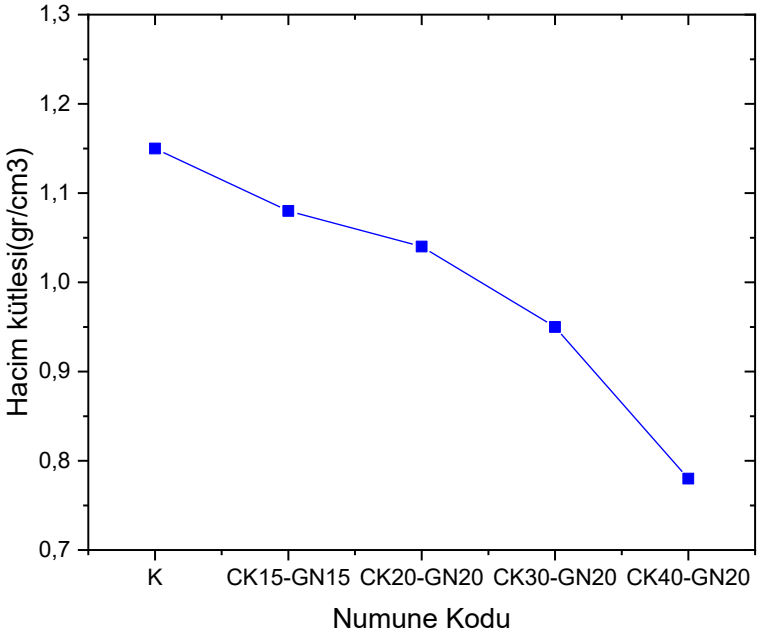
Şekil 7.24. *Cam küre-GN oranının malzeme yoğunluğuna etkisi.*

Şekil 7.25'te cam küre ve granül kombinasyonlarının su emme oranlarına etkisi gösterilmektedir. Cam küre katkı oranı arttıkça su emme oranlarında düzenli bir artış gözlemlenmiştir. Bu durum, cam kürelerin yapıya kapalı gözenekler kazandırmasına rağmen, artan yüzey alanı ve yapıda oluşan mikroyapısal değişimlerin suyun yüzeylere tutunmasını kolaylaştırmasıyla açıklanabilir. Yani cam kürelerin kapalı gözenek yapısının doğrudan su emilimine neden olmadığı, ancak oluşturduğu ek yüzey alanı sayesinde ölçülen su emme oranında bir artış meydana geldiği değerlendirilmiştir. Granül katkısının ise bu davranış üzerinde belirgin bir etkisi olmadığı ve cam küre katkısının etkisinin baskın olduğu görülmektedir.

Şekil 7.26'te ise cam küre ve granül katkılarının hacim kütlesi üzerindeki etkisi sunulmuştur. Cam küre oranı arttıkça, düşük yoğunlukları nedeniyle hacim kütlesinde belirgin bir azalma meydana gelmiştir. Granüllerin daha yoğun yapıda olmasına rağmen, cam kürelerin sistemde daha fazla yer kaplaması, toplam hacim kütlesinin düşmesine sebep olmuştur. Bu sonuçlar, cam küre ve granül kombinasyonlarının birlikte kullanımının malzemenin hafifliğini artırdığını, ancak yüzey yapısındaki değişimler nedeniyle su emme oranında artış eğilimi gösterdiğini ortaya koymaktadır.



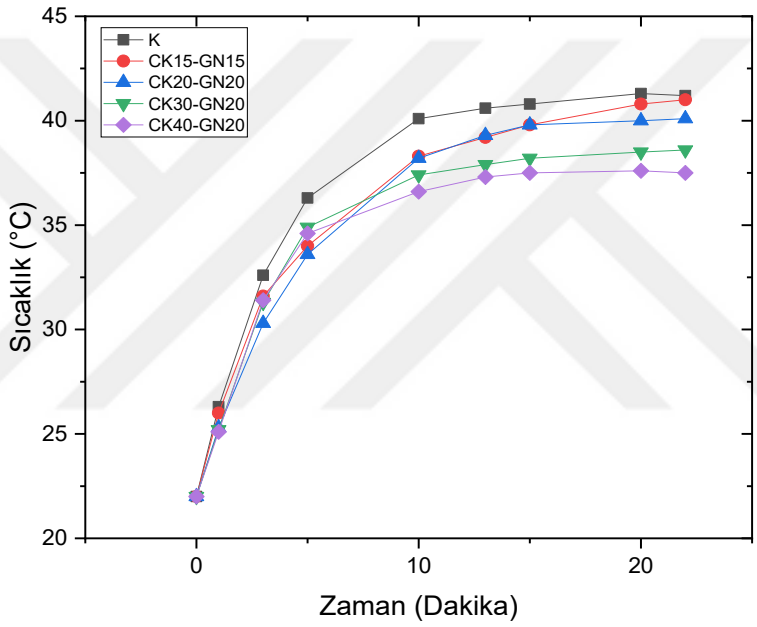
Şekil 7.25. *Cam küre ve granül kombinasyonlarının su emme oranına etkisi.*



Şekil 7.26. *Cam küre ve granül kombinasyonlarının hacim kütlesine etkisi.*

7.4.2. Cam küre ve granül katkısının ısıl iletkenliğe etkisi

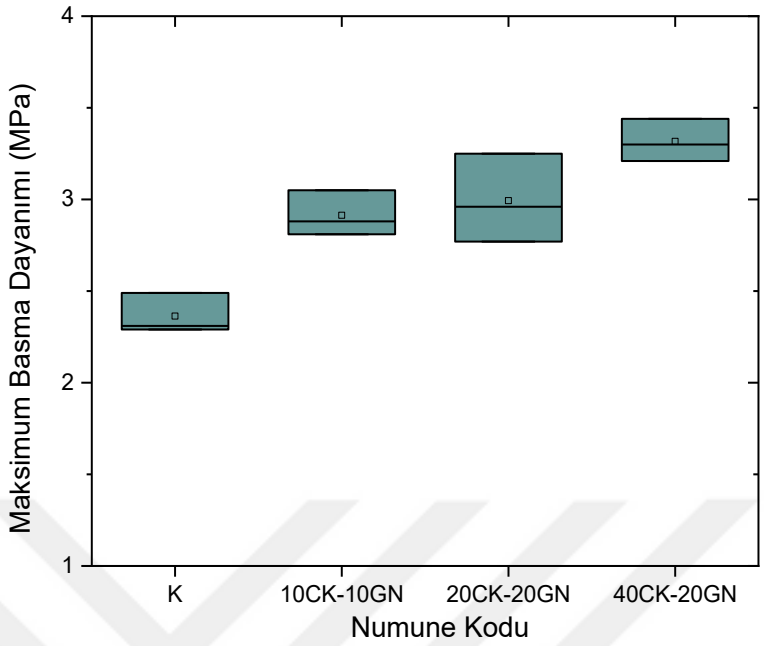
Şekil 7.27, cam küre ve granül katkılarının birlikte kullanıldığı durumlarda sıcaklık dağılımının daha yavaş olduğunu göstermektedir. Özellikle CK40-GN20 kombinasyonu, kapalı ve mikroporöz gözeneklerin birlikte varlığıyla termal iletkenliği önemli ölçüde azaltmıştır. Bu, farklı gözenek yapılarının malzemenin termal yalıtım performansını artırabileceğini göstermektedir. Cam kürelerin düşük yoğunluğu ve granüllerin mikroporöz yapısı, kombine bir etki yaratarak termal iletkenliği optimize etmiştir.



Şekil 7.27. *Cam küre ve granül kombinasyonunun sıcaklık dağılımına etkisi.*

7.4.3. Cam küre ve granül kombinasyonunun mekanik dayanıma etkisi

Şekil 7.28'de cam küre (CK) ve granül (GN) katkılarının alçı malzeme üzerindeki etkisini değerlendirmektedir. Katkısız numune (K), en düşük maksimum basma dayanımı değerine sahip olup, katkı maddelerinin eklenmesiyle dayanımda belirgin bir artış gözlemlenmiştir. Cam küre ve granül katkısının birlikte kullanıldığı numunelerde (10CK-10GN, 20CK-20GN, 40CK-20GN), katkı oranlarının artışıyla dayanım değerleri de artmıştır. Özellikle 40CK-20GN numunesi, en yüksek dayanım değerine sahip olup, cam küre ve granül katkılarının birlikte kullanıldığında mekanik dayanımı optimize edebileceğini göstermektedir.

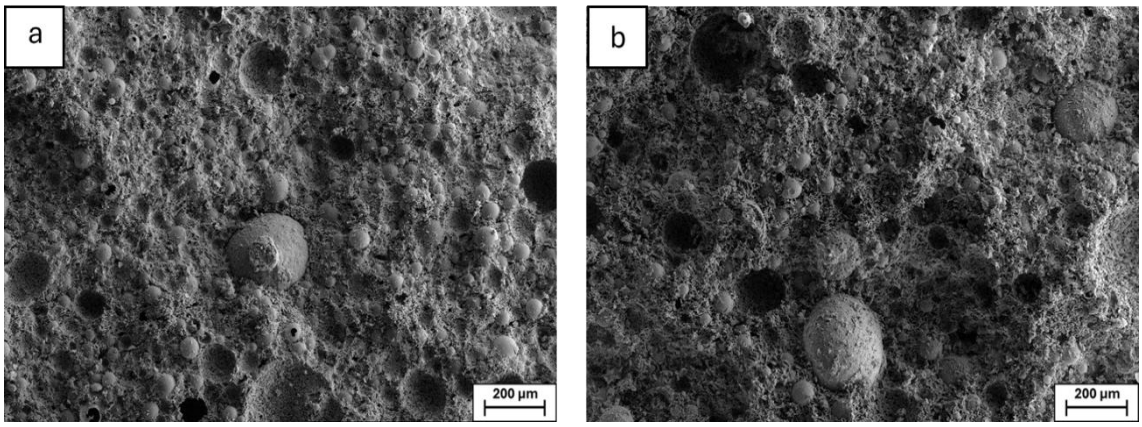


Şekil 7.28. *Cam küre ve granül katkısının alçı malzemelerin maksimum basma dayanımına etkisi.*

7.5. Cam Küre, Granül ve SLS Katkısının Alçı Matrisine Etkileri

7.5.1. Cam küre, granül ve SLS katkısının mikroyapı analizi

Şekil 7.29a, %40 cam küre ve %20 granül (CK40-GN20) katkılı numuneyi temsil etmektedir. Görselde, gözeneklerin homojen dağıldığı ve malzemenin mikroyapısında dengeli bir yapı oluşturduğu gözlemlenmiştir. Şekil 7.29b ise, %40 cam küre, %20 granül ve %3 SLS (CK40-GN20-SLS3) katkılı numuneye aittir. Görselde, SLS'nin etkisiyle gözenek boyutlarının büyüdüğü ve yüzeyin daha pürüzlü bir hale geldiği görülmektedir. Bu kombinasyon, açık ve kapalı gözeneklerin artmasına ve malzemenin yalıtım performansının iyileştirilmesine katkıda bulunmuştur.

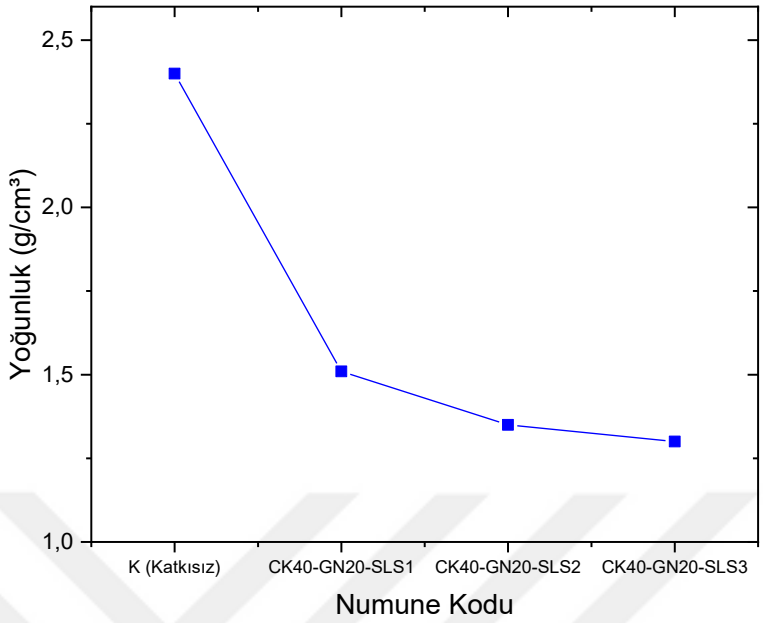


Şekil 7.29. *Cam küre ve granül kombinasyonu ile farklı SLS oranına sahip numunelere ait SEM görüntüleri. a) %40 cam küre, %20 granül ve %1 SLS (CK40-GN20-SLS1) katkılı numune, b) %40 cam küre, %20 granül ve %3 SLS (CK40-GN20-SLS3) katkılı numune.*

7.5.2. Cam küre, granül ve SLS katkısının yoğunluğa etkisi

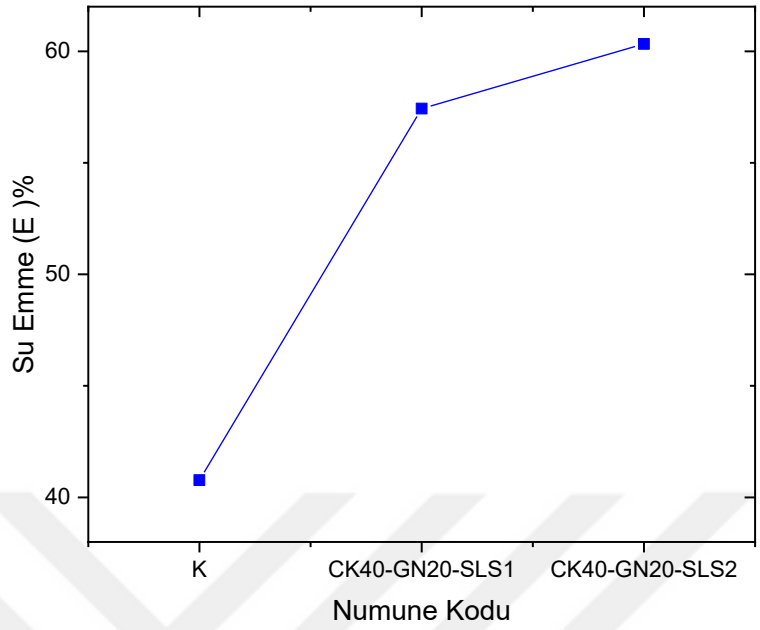
Şekil 7.30'da cam küre, granül ve SLS katkılarının birlikte kullanıldığı numunelerin tartım ve hacim hesaplama yöntemiyle belirlenen yoğunluk değerleri sunulmuştur. Katkısız numune (K) ile karşılaştırıldığında, cam küre ve granül katkılarının malzemenin yoğunluğunu düşürdüğü, SLS katkısının ise bu düşüşü daha da belirginleştirdiği gözlemlenmiştir. SLS ilavesiyle artan gözeneklilik, toplam hacimde artışa neden olmuş ve buna bağlı olarak yoğunluk değerlerinde kademeli bir azalma meydana gelmiştir.

Bu sonuçlar, cam kürecikler, granüller ve SLS katkılarının birlikte kullanımıyla alçı matrisinin yapısal özelliklerinin kontrol edilebildiğini göstermektedir. Böylece malzemenin yoğunluk, mekanik dayanım, termal ve akustik yalıtım performansları optimize edilebilmekte ve farklı uygulama alanlarına uygun, hafif kompozit yapı malzemeleri geliştirilebilmektedir.

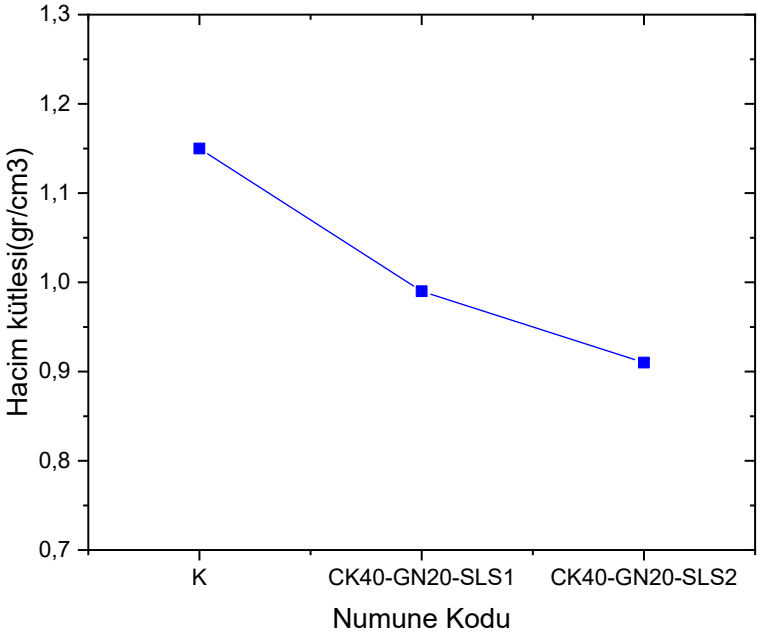


Şekil 7.30. *SLS, cam küre ve granül katkısının yoğunluğa etkisi.*

Cam küre, granül ve SLS kombinasyonunda SLS miktarındaki artışın (%1, %2) su emme oranını belirgin şekilde artırdığı gözlemlenmiştir. SLS'nin açık gözenek yapısını desteklediği ve cam küre-granül kombinasyonuyla bu etkinin daha fazla ortaya çıkmıştır. Hacimsel yoğunluk grafiğine bakıldığında cam küre, granül ve SLS kombinasyonlarında hacim kütlesinin düzenli bir şekilde azaldığı görülmektedir. Bu, katkıların birlikte mikroyapıda daha düşük yoğunluklu ve boşluklu bir yapı oluşturduğunu göstermektedir. Grafiklerden şekil 7.31 cam küre, granül ve SLS kombinasyonlarının su emme oranına etkisini ve şekil 7.32 cam küre, granül ve SLS kombinasyonlarının hacim kütlesine etkisini göstermektedir.



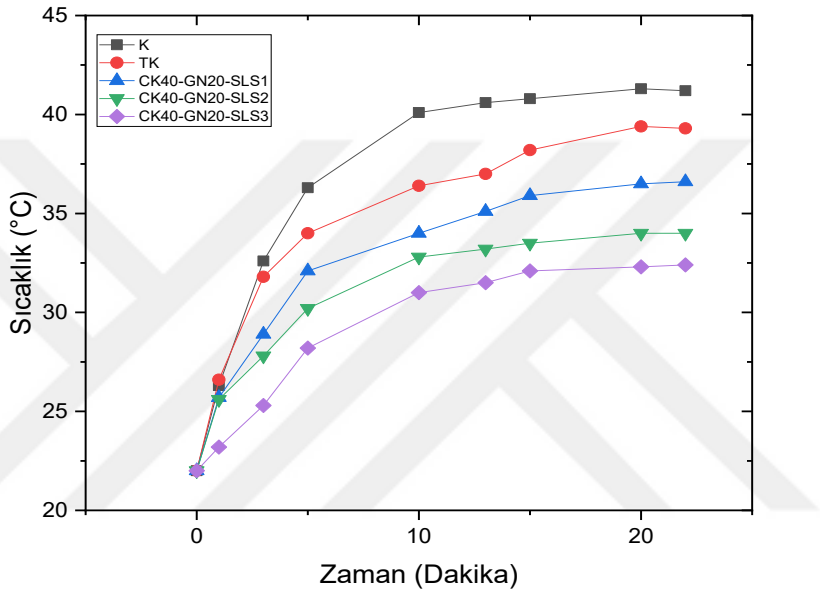
Şekil 7.31. *Cam küre, granül ve SLS kombinasyonlarının su emme oranına etkisi.*



Şekil 7.32. *Cam küre, granül ve SLS kombinasyonlarının hacim kütlesine etkisi.*

7.5.3. Cam küre, granül ve SLS katkısının ısıl iletkenliğe etkisi

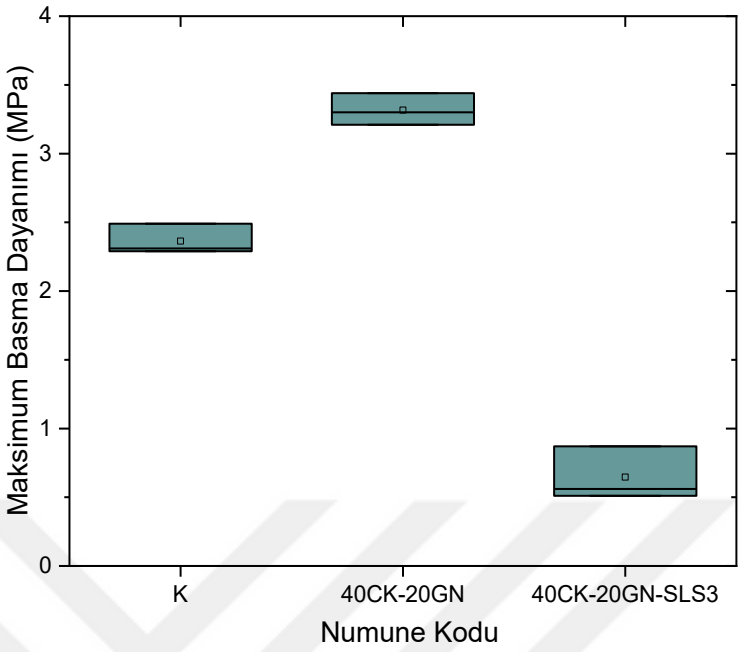
Cam küre, granül ve SLS'nin bir arada kullanıldığı numunelerde (örneğin CK40-GN20-SLS3), en düşük ısıl iletkenlik değerlerine ulaşılmıştır. Şekil 7.33 bu kombinasyonların termal performansını artırdığını ve malzeme içerisinde kapalı gözenek, açık gözenek ve mikroporoz yapıların bir arada bulunmasının termal yalıtım için ideal olduğunu göstermektedir.



Şekil 7.33. *SLS ve Cam küre, granül ve SLS kombinasyonunun sıcaklık dağılımına etkisi.*

7.5.4. SLS katkısının ve kombinasyonların mekanik dayanıma etkisi

Şekil 7.34'de cam küre (CK), granül (GN) ve SLS katkısının alçı malzeme üzerindeki etkisini değerlendirmektedir. Katkısız numune (K), en düşük dayanım değerine sahiptir ve 40CK-20GN numunesine kıyasla belirgin bir performans farkı görülmektedir. Cam küre ve granül katkısının birlikte kullanıldığı 40CK-20GN numunesi, yüksek basma dayanımı ile katkı maddelerinin malzeme dayanımını artırdığını göstermektedir. Ancak 40CK-20GN-SLS3 numunesinde, SLS katkısının eklenmesiyle dayanımın belirgin şekilde azaldığı gözlemlenmiştir. Bu durum, SLS'nin yapıda açık porozite oluşturarak yoğunluğu ve mekanik dayanımı düşürdüğünü göstermektedir.



Şekil 7.34. *Cam küre, granül ve SLS katkısının alçı malzemelerin maksimum basma dayanımına etkisi.*

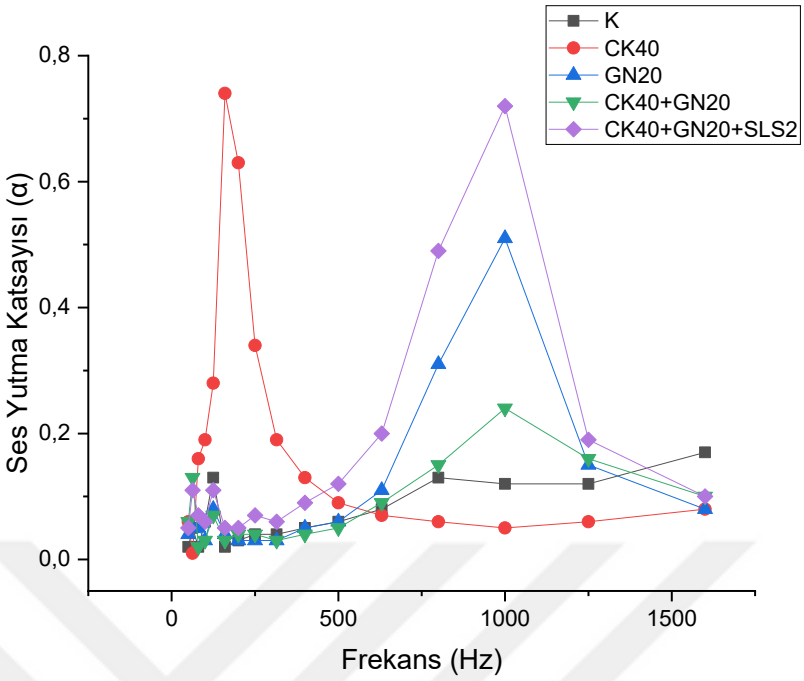
7.6. Üretilen Malzemelerin Akustik Performans Sonuçları

Empedans tüpü ile gerçekleştirilen ses yutma katsayısı ölçümleri, farklı katkı türlerinin ve kombinasyonlarının alçı esaslı kompozit malzemelerin akustik performansını önemli ölçüde etkilediğini göstermiştir. Katkısız referans numunesi (K), tüm frekans aralığı boyunca düşük ses yutma katsayısı sergileyerek sınırlı bir akustik performans sunmuştur. Cam küre katkılı numune (CK40), özellikle düşük frekanslarda (160 Hz'de 0,74 ve 200 Hz'de 0,63) yüksek ses yutma değerleri ile dikkat çekmiş, bu durum cam kürelerin yapı içerisinde oluşturduğu kapalı boşlukların düşük frekanslı ses dalgalarının yutulmasında etkili olduğunu ortaya koymuştur. Granül katkılı numune (GN20) ise 800 Hz ve 1000 Hz gibi orta frekanslarda sırasıyla 0,31 ve 0,51 değerlerine ulaşarak, granüllerin yalnızca mekanik değil aynı zamanda akustik performansa da olumlu katkı sağladığını göstermiştir. Granüllerin gözenekli yüzey yapısı ve hacimsel düzensizlikleri, sesin yön değiştirmesini ve saçılmasını kolaylaştırarak yutma mekanizmasını desteklemiştir. Cam küre ve granül katkılarının birlikte kullanıldığı CK40-GN20 numunesinde ise ses yutma katsayısı düşük ve orta frekanslarda dengelenmiş bir artış göstermiştir. En yüksek performans, CK40-GN20 karışımına %2

oranında SLS katkısı eklenerek elde edilen CK40-GN20-SLS2 numunesinde gözlemlenmiştir. Bu numune 1000 Hz frekansta 0,72, 800 Hz'de 0,49 ve 630 Hz'de 0,20 ses yutma katsayısına ulaşarak orta frekans bandında oldukça etkili sonuçlar vermiştir. Bu artışın, SLS katkısının karışımda açık gözenekli bir yapı oluşturarak ses dalgalarının malzeme içinde daha derinlere nüfuz etmesini sağlamasıyla ilgili olduğu değerlendirilmektedir. SLS'nin doğrudan akustik performansa katkısından ziyade, gözenek yapısının kontrolü amacıyla kullanıldığı ve bu özelliğin ses yutma kapasitesini dolaylı yoldan artırdığı anlaşılmıştır. Bu kapsamda, hem cam küre hem de granül katkılarının ayrı ayrı ve birlikte kullanımının ses yutma davranışı üzerinde belirgin iyileşmeler sağladığı ve katkıların optimize edilerek alçı bazlı yapı malzemelerinin akustik özelliklerinin geliştirilebileceği ortaya konmuştur.

Tablo 7.3. *Farklı katkı içeren numunelerin frekansa bağlı ses emme katsayısı değerleri.*

FREKANS (Hz)	K	CK40	GN20	CK40+GN20	CK40+GN20+SLS2
50	0,02	0,06	0,04	0,06	0,05
63	0,05	0,01	0,05	0,13	0,11
80	0,02	0,16	0,05	0,02	0,07
100	0,06	0,19	0,03	0,03	0,06
125	0,13	0,28	0,08	0,07	0,11
160	0,02	0,74	0,04	0,03	0,05
200	0,03	0,63	0,03	0,04	0,05
250	0,04	0,34	0,03	0,04	0,07
315	0,04	0,19	0,03	0,03	0,06
400	0,05	0,13	0,05	0,04	0,09
500	0,06	0,09	0,06	0,05	0,12
630	0,08	0,07	0,11	0,09	0,2
800	0,13	0,06	0,31	0,15	0,49
1000	0,12	0,05	0,51	0,24	0,72
1250	0,12	0,06	0,15	0,16	0,19
1600	0,17	0,08	0,08	0,1	0,1



Şekil 7.35. *Cam küre, granül ve SLS katkısının alçı malzemelerin maksimum basma dayanımına etkisi.*

8. GENEL SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, alçı bazlı kompozit malzemelerin termal, mekanik ve akustik özelliklerini iyileştirmek amacıyla cam küre, granül ve SLS (sodyum lauril sülfat) katkılarının etkileri detaylı bir şekilde incelenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre her bir katkının alçı matrisine etkilerini ve malzemenin performansını optimize etme potansiyelini açıkça ortaya koymuştur.

Cam küre katkısı, yoğunluğu azaltarak kapalı gözenekli bir yapı oluşturmuş ve termal iletkenliği düşürerek ısı yalıtım performansını iyileştirmiştir. Cam kürelerin alçı matrisine eklenmesi, mikroyapıda ek yüzeyler oluşturarak toplam yüzey alanının artmasına neden olmuştur. BET analizi sonuçları da cam küre katkılı numunelerde yüzey alanında belirgin bir artış olduğunu göstermiştir. Cam kürelerin yoğunluğu azaltarak hafif malzeme geliştirme açısından önemli bir avantaj sağladığı, ancak yüzey alanındaki artış nedeniyle su emme oranını artırdığı tespit edilmiştir. Bu bulgu, cam küre oranının optimize edilmesinin malzeme performansını iyileştirmek için kritik bir parametre olduğunu ortaya koymaktadır.

Granül katkıları ise homojen bir dağılım sergilemiş, mikro gözenek yapısına rağmen su emme oranında beklenen artışı göstermemiştir. Bunun nedeni granüllerin iç yapısında bulunan mikro gözeneklere suyun nüfuz etmemesi su emme oranını düşük tuttuğu düşünülmektedir. Bununla birlikte granüllerin yoğunluğu artırdığı ve mekanik dayanımı iyileştirdiği gözlemlenmiştir. SLS katkısı ise açık gözenekli bir yapı oluşturarak yoğunluğu düşürmüştür ve su emme oranını artırmış ve yüzey yapısında düzensizliklere yol açmıştır.

Katkı maddelerinin kombine kullanımı mikroyapıda dengeli bir gözenek yapısı oluşturarak termal, mekanik ve akustik performansı optimize etme potansiyeli taşımaktadır. Özellikle %40 cam küre ve %20 granül katkılı numunelerde yoğunluğun düşmesi ve termal performansın iyileşmesi dikkat çekmiştir. Bununla birlikte, çoklu katkıların bir arada kullanımı yüzey alanında sınırlı artışlara neden olmuştur. Mekanik dayanım açısından cam küre ve granül katkılarının kombinasyonu katkı maddelerinin olumlu etkilerini dengelemiş ve dengeli bir yapı oluşturmuştur. Ancak SLS katkısı malzeme iç yapısını zayıflatarak mekanik dayanımı düşürmüştür. Bu sonuçlar katkı türleri ve oranlarının malzeme özelliklerine etkilerinin daha detaylı şekilde optimize edilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır.

Termal iletkenlik analizleri, cam küre katkısının malzemenin ısı yalıtım performansını artırmada en etkili katkı olduğunu göstermiştir. Kapalı gözenekli yapı termal iletkenlik değerlerini belirgin şekilde düşürmüş ve ısı transferini yavaşlatmıştır. Granüller ise sınırlı bir termal iyileşme sağlamış ancak gözenek yapısının ısı yalıtım potansiyeli kısmen doğrulanmıştır. SLS katkısı açık gözenek yapısı nedeniyle termal iletkenliği azaltmış ancak gözeneklerin büyüklüğü ve dağılımına bağlı olarak performansta farklılıklar görülmüştür. Cam küre ve granül kombinasyonlarının dengeli bir gözenek yapısı oluşturarak termal performansı olumlu yönde etkilediği gözlemlenmiştir. SEM analizleri ve mapping sonuçları ise katkı maddelerinin alçı matrisinde homojen bir şekilde dağıldığını ve kimyasal bütünlüğü bozmadığını ortaya koymuştur.

Çalışmada empedans tüpü ile elde edilen sonuçlar, cam küre ve granül katkılarının alçı bazlı kompozitlerin akustik performansını belirgin şekilde iyileştirdiğini göstermiştir. Granül katkısı özellikle orta frekanslarda etkili ses yutma sağlarken, cam küre katkısı düşük frekanslarda yüksek performans sergilemiştir. %2 oranında SLS eklenmesiyle açık gözenekli yapı oluşmuş ve bu yapı, ses dalgalarının daha etkili şekilde sönümlenmesini sağlayarak en yüksek ses yutma katsayısı elde edilmiştir. Katkıların uygun oranlarda kombinasyonu ile alçı bazlı yapı malzemelerinin akustik özelliklerinin optimize edilebileceği sonucuna varılmıştır.

Bu çalışmanın bulguları alçı bazlı kompozit malzemelerin düşük yoğunluklu, yüksek yalıtım performansına sahip ve optimize edilebilir mekanik özellikler sunan yapı elemanları geliştirme potansiyelini göstermiştir. Gelecekte yapılacak çalışmalar için katkı oranlarının optimize edilmesi, farklı katkı türlerinin incelenmesi ve özellikle akustik performansı artırmaya yönelik yeni stratejiler geliştirilmesi önerilmektedir. Bu sonuçlar alçı bazlı malzemelerin inşaat ve yalıtım sektöründe daha geniş ve verimli bir şekilde kullanımına yönelik önemli bir adım sağlamaktadır.

KAYNAKÇA

[1] Duman Altan, A. ve Sağbaş, A. (2020). *Türkiye'nin enerji verimliliği ve iklim değişikliği performansı: Mevcut durum ve gelecek projeksiyonu.* Index Academic Yayınevi, Enerji ve Çevre Araştırmaları Serisi, Rapor No: IA-2020-14, Ankara, 42 s.

[2] Kavaklı, N., Kulaksız, S., Tombul, M. ve Sever, M. (2016). Economic potential and production of gypsum deposits in Turkey. *Maden Tetkik ve Arama Dergisi*, 153(2), 45–56. Ankara: MTA Yayınları.

[3] Helgi Library. (2024). *Which country produces the most gypsum?* Helgi Analytics Publications, Global Mineral Production Database, Report No: HLIB-2024-112, 8 s.

[4] Can, Ö. (2019). *Volkanik tüf atıklarından silika aerojel sentezi ve yüksek termal yalıtım özellikleri için alçı esaslı kompozitlerde değerlendirilmesi.* İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

[5] Incropera, F.P. and DeWitt, D.P. (2002). *Fundamentals of heat and mass transfer (5th ed.)*. Hoboken, NJ: Wiley.

[6] Zhu, G., Zhao, Y., Wang, Z., Khalid, M.S.U. ve Liu, M. (2022). Semi-resolved CFD-DEM simulation of fine particle migration with heat transfer in heterogeneous porous media. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 197, Article 123349. https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2022.123349

[7] Kinsler, L.E., Frey, A.R., Coppens, A.B. ve Sanders, J.V. (2000). *Fundamentals of Acoustics (4th ed.)*. New York, NY: John Wiley and Sons, Inc., 560 s., ISBN: 978-0-471-84789-2.

[8] Rutkevičius, M., et al. (2013). Sound absorption properties of porous composites fabricated by a hydrogel templating technique. *Journal of Materials Research*, 28(17), 2409–2414. https://doi.org/10.1557/jmr.2013.194

[9] Dowling, N.E. (2007). *Mechanical behavior of materials: Engineering methods for deformation, fracture, and fatigue (3rd ed.).* Upper Saddle River, NJ: Pearson Education.

[10] Chen, S., Espadas-Escalante, J.J. ve Isaksson, P. (2022). Numerical analysis of crack path stability in brittle porous materials. *Engineering Fracture Mechanics*, 275, 108811. https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2022.108811

[11] T.C. Başbakanlık Devlet Planlama Teşkilatı (DPT). (2001). *Madencilik Özel İhtisas Komisyonu Raporu: Endüstriyel Hammaddeler Alt Komisyonu Yapı*

Malzemeleri (Alçı–Kireç–Kum–Mıcır–Boya Toprakları–Tuğla–Kiremit) Çalışma Grubu Raporu. Sekizinci Beş Yıllık Kalkınma Planı Özel İhtisas Komisyonu Raporu, Yayın No: DPT-2634, 145 s.

[12] Warren, J.K. (2016). *Evaporites: A geological compendium.* Cham: Springer International Publishing.

[13] Holliday, D. and Holliday, D.V. (2015). Hydration and transformation processes in sulfate minerals. *Journal of Geochemistry*, 44(1), 89–102. https://doi.org/10.1016/j.geochem.2015.01.007

[14] Ali, M.J. and M., A. (2019). Industrial applications of anhydrite in construction. *International Journal of Building Science*, 15(2), 123–130.

[15] Merrill, R. (2018). Gypsum in construction: Properties and applications. *Journal of Sustainable Building Materials*, 10(3), 45–54.

[16] Erdoğan, M. (1997). *Türkiye alçıtaşı yatakları.* Ankara: Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü (MTA) Yayınları, MTA Yayın No: 9712, 198 s. ISBN: 975-6055-321-8.

[17] Önem, Y. (1997). *Sanayi madenleri.* Ankara: Kozan Ofset Yayıncılık, 285 s. ISBN: 975-555-123-4.

[18] Aytekin, M. ve Başpınar, M. (2019). *Kalsiyum sülfat esaslı bor atığının alçı içerisindeki etkilerinin incelenmesi.* Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Anabilim Dalı, Tez No: 2019/142, 102 s., Eskişehir.

[19] Karni, J. and Karni, Y. (1995). Gypsum in construction: Origin and properties. *Construction and Building Materials,* 9(1), 1–8. Elsevier Ltd., ISSN: 0950-0618. https://doi.org/10.1016/0950-0618(95)00003-8

[20] Kontogeorgos, D.A. and Founti, M.A. (2012). Gypsum board reaction kinetics at elevated temperatures. *Thermochimica Acta*, 529, 6–13. https://doi.org/10.1016/j.tca.2011.11.014

[21] Singh, N.B. and Middendorf, B. (2007). Calcium sulphate hemihydrate hydration leading to gypsum crystallization. *Progress in Crystal Growth and Characterization of Materials*, 53(1), 57–77. https://doi.org/10.1016/j.pcrysgrow.2007.01.002

[22] Amathieu, B.R. and Lambert, J. (1988). Crystallization kinetics of gypsum from dense suspension of hemihydrate water. *Journal of Crystal Growth*, 88(2), 183–192.

[23] Tang, Y., Gao, J., Liu, C., Chen, X. ve Zhao, Y. (2019). Dehydration pathways of gypsum and the rehydration mechanism of soluble anhydrite γ-$CaSO_4$. *ACS Omega*, 4(4), 7636–7642. https://doi.org/10.1021/acsomega.8b03476

[24] Mesci, B. (2020). *Cam lifi ve atık lastik katkılı alçı kompozitlerin mekanik ve fiziksel özelliklerinin araştırılması.* Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Afyonkarahisar.

[25] Song, K.-M., Mitchell, J. and Gladden, L.F. (2009). Observing microstructural evolution during plaster hydration. *Diffusion Fundamentals*, 10, 1–10. https://doi.org/10.62721/diffusion-fundamentals.10.442

[26] Chen, Z., Sucech, S. and Faber, K.T. (2010). A hierarchical study of the mechanical properties of gypsum. *Journal of Materials Science*, 45(16), 4444–4453. https://doi.org/10.1007/s10853-010-4527-z

[27] Türk Standartları Enstitüsü (TSE). (2008). *TS 825 – Binalarda Isı Yalıtımı Kuralları.* Ankara: TSE Yayınları.

[28] Gürdal, E. (2009). Alçı ve priz süresini etkileyen kimyasallar. *Yapı Kimyasalları Sektör Dergisi,* 12(2), 50–54. ISSN: 1304-1234.

[29] İpekçi, C.N.A. (2009). *Seramiklerin şekillendirilmesinde kullanılan kalıp alçısı özelliklerinin iyileştirilmesi.* Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Anabilim Dalı, Tez No: 2009/087

[30] Rohman, M.Z., Hidayat, R. and Suhendi, E. (2020). Effect of gypsum particle size and citric acid concentration on physical and mechanical properties of gypsum board. *Journal of Physics: Conference Series*, 1569, 032084. https://doi.org/10.1088/1742-6596/1569/3/032084

[31] Founie, A. (2006). *Gypsum.* U.S. Geological Survey, Mineral Commodity Summaries, Professional Paper No. 1450, Reston, VA. 35 s. ISBN: 0-607-98765-4.

[32] Sheker, A. ve Myradovna, S. O. (2024). Marble plaster: Composition, applications, and advantages. *Наука и мировоззрение*, 1(28), 94–98.

[33] Rohman, M.Z., Hidayat, R. and Suhendi, E. (2020). Effect of gypsum particle size and citric acid concentration on physical and mechanical properties of gypsum

board. *Journal of Physics: Conference Series*, 1569, 032084, 1–7. https://doi.org/10.1088/1742-6596/1569/3/032084

[34] Singh, N.B. and Middendorf, B. (2007). Calcium sulphate hemihydrate hydration leading to gypsum crystallization. *Progress in Crystal Growth and Characterization of Materials,* 53(1), 57-77.

[35] Pedreno-Rojas, M., Martínez-García, C. and López, J.M. (2019). Gypsum panel production: Optimization of mechanical and environmental properties. *Construction and Building Materials*, 209, 252–261. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.112

[36] Knauf. (2024). *Mekansal akustik – Performans çözümleri.* Düsseldorf: Knauf GmbH, Teknik Katalog, 56 s. ISBN: 978-3-9812345-8-9.

[37] National Gypsum. (2020). *Understanding acoustical wall designs: Variables that affect STC ratings.* Charlotte, NC: National Gypsum Company, Teknik Rapor NG-ACU-2020-15, 32 s.Gypsum Association. (2019).

[38] Levy, S. (2012). Calculations to determine the effectiveness and control of thermal and sound transmission. In *Construction Calculations Manual* (ss. 503–543). Elsevier Inc.

[39] Asdrubali, F., D'Alessandro, F. and Schiavoni, S. (2015). A review of the acoustic and thermal properties of mineral wool insulation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 45, 124–135. https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.01.030

[40] Al-Homoud, M.S. (2005). Performance characteristics and practical applications of common building thermal insulation materials. *Building and Environment*, 40(3), 353–366. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2004.05.013

[41] Paghdar, D.K., Sharma, N.D., and Rathod, H.A. (2013). A review on Dry Wall construction technique in reference of sustainable development. *International Journal of Engineering Research & Technology*, 2(11).

[42] Bumanis, G., Zogla, L. and Bajare, D. (2023). Thermal and sound insulation properties of recycled expanded polystyrene granule and gypsum composites. *Recycling*, 8(1), Article 19. https://doi.org/10.3390/recycling8010019

[43] Buratti, C., Moretti, E., Belloni, E. and Agosti, F. (2014). Development of innovative aerogel based plasters: Preliminary thermal and acoustic performance evaluation. *Sustainability*, 6(9), 5839–5852. https://doi.org/10.3390/su6095839

[44] Gao, F., Xiao, X., Shu, Z., Zhong, K., Wang, Y. and Li, M. (2024). Investigation of thermoregulation effect of stabilized phase change gypsum board with different structures in buildings. *Sustainability*, 16(16), 11245. https://doi.org/10.3390/su16166929

[45] Bouzit, S., Merli, F., Sonebi, M., Buratti, C. and Taha, M. (2021). Gypsum-plasters mixed with polystyrene balls for building insulation: Experimental characterization and energy performance. *Construction and Building Materials*, 283, 122625. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122625

[46] Samkova, A. and Kulhavy, P. (2017). Study of the acoustic attenuation in plaster composites in dependency on added fiber reinforcement. *Vibroengineering Procedia*, 13, 124–128. https://doi.org/10.21595/vp.2017.18567

[47] Lewry, A.J. and Williamson, J. (1994). The setting of gypsum plaster Part II: The development of microstructure and strength. *Journal of Materials Science*, 29(20), 5524–5532. https://doi.org/10.1007/BF00367891

[48] Agossou, O.G. and Amziane, S. (2023). Analysis of mechanical and thermal performance and environmental impact of flax-fiber-reinforced gypsum boards. *Buildings*, 13(12), 2893. https://doi.org/10.3390/buildings13123098

[49] Cui, G., Kong, D., Huang, Y., Qiu, W., Cheng, L. and Wang, L. (2023). Effects of different admixtures on the mechanical and thermal insulation properties of desulfurization gypsum-based composites. *Coatings*, 13(6), 1089. https://doi.org/10.3390/coatings13061089

[50] O Kimya. (2024). SLES (Sodyum Laureth Sülfat) – *Anyonik yüzey aktif kimyasallar: Ürün teknik bilgi dokümanı.* İstanbul: O Kimya Sanayi ve Ticaret A.Ş., Kimyasal Ürünler Kataloğu, Bölüm 4, s. 15–18.

[51] Akaydın, O., Akgül, A., Orhon, E. ve Belek, H.T. (2015). Gürültü kontrol elemanlarının akustik özelliklerinin empedans tüpü ile belirlenmesi. *Türk Akustik Dergisi*, 33(2), 87–94.

ÖZGEÇMİŞ

ORCID NO: 0009-0008-9664-4076

Ad Soyad **: Ebru CİCİ**

Yabancı Dil **: İngilizce**

Eğitim ve Mesleki Geçmişi:

- 2021, Eskisehir Teknik Üniversitesi, Mühendislik/Malzeme Bilimi ve Mühendisliği ,
- 2022, ARGE Mühendisi, Seremik Araştırma Merkezi, ARGE
- 2025, ARGE Mühendisi, Profen, ARGE