



T.C.
KIRŞEHİR AHI EVRAN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI



**PERLİT TABANLI HAFİF TUĞLA
ÜRETİMİNDE GRANÜLER AEROJEL VE
TİNKAL ATIKLARININ
KULLANILABİLİRLİĞİ: DENEYSEL BİR
İNCELEME**

SERKAN ÜNAL

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**KIRŞEHİR
2025**



T.C.
KIRŞEHİR AHI EVRAN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI



**PERLİT TABANLI HAFİF TUĞLA
ÜRETİMİNDE GRANÜLER AEROJEL VE
TİNKAL ATIKLARININ
KULLANILABİLİRLİĞİ: DENEYSEL BİR
İNCELEME**

SERKAN ÜNAL

YÜKSEK LİSANS TEZİ

DANIŞMAN

Dr. Öğr. Üyesi Hakan ÇAĞLAR

KIRŞEHİR

2025

KIRŞEHİR AHI EVRAN ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
YÜKSEK LİSANS TEZ ÇALIŞMASI
ETİK BEYANI

Kırşehir Ahi Evran Üniversitesi Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiği Yönergesini okuduğumu ve anladığımı ve Kırşehir Ahi Evran Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde ve ortaya çıkan sonuçlarda herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Tez olarak sunduğum bu çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda bu konuda hakkımda yapılacak tüm yasal işlemleri ve aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

17/10/2025

Öğrenci
Serkan ÜNAL

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

Sayfa No

İÇİNDEKİLER DİZİNİ	I
TEŞEKKÜR.....	III
ÖZET.....	IV
TABLolar DİZİNİ	VI
ŞEKİLLER DİZİNİ	VII
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	IX
1. GİRİŞ	1
1.1. Perlit.....	5
1.2. Bor ve Bor Atığı	13
1.3. Aerojel	26
2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR	31
2.1. Tuğla Üretiminde Perlit Kullanımı İle İlgili Çalışmalar	31
2.2. Tuğla Üretiminde Aerojel Kullanımı İle İlgili Çalışmalar	35
2.3. Tuğla Üretiminde Bor Atığı Kullanımı İle İlgili Çalışmalar	38
3. MATERYAL VE YÖNTEM	41
3.1. Materyal.....	41
3.1.1. Perlit	41
3.1.2. Granüler Aerojel	42
3.1.3. Tinkal atığı	43
3.1.4. Killi toprak	44
3.1.5. Karışım suyu	44
3.2. Yöntem	44
3.2.1. REF ve katkılı numunelerin üretimi.....	45
3.2.2. Kuru birim hacim ağırlık	47
3.2.2. Porozite	47
3.2.3. Kompasite	48
3.2.4. Kılcal su emme (Kapilarite).....	48
3.2.5. Isı iletim katsayısı tayini	49
3.2.6. Basınç dayanımı.....	50
3.2.7. Eğilmede çekme dayanımı	50
3.2.8. SEM analizi.....	51
4. BULGULAR VE TARTIŞMA.....	53

4.1. Kuru Birim Hacim Ağırlık	53
4.2. Porozite	54
4.3. Kompasite	55
4.4. Kılcal Su Emme	56
4.5. Isı İletim Katsayısı Tayini	57
4.6. Basınç Dayanımı	58
4.7. Eğilmede Çekme Dayanımı	60
4.8. Numunelerin SEM analizi	60
5. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	63
KAYNAKLAR.....	65
ÖZGEÇMİŞ.....	81



TEŞEKKÜR

Yüksek Lisansa başlamamda ve yüksek lisans ders sürecinde kendisini tanıdığım günden bu yana gösterdiği sabır ve sabırlı hali ile her zaman bana örnek olmasının yanı sıra bir bilim insanının nasıl çalışması gerektiğini kendisinden öğrendiğim değerli danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Hakan ÇAĞLAR'a büyük bir içtenlikle teşekkür ederim. Tezimin şekillenmesinde ve nihai hale gelmesinde katkıları olan değerli jüri üyelerim Prof. Dr. M. Mustafa ÖNAL ve Prof. Dr. Salih YAZICIOĞLU'na teşekkürlerimi içtenlikle sunarım.

Tezimi, ailem başta olmak üzere özellikle Dr. Öğr. Üyesi Hakan ÇAĞLAR'a ithaf ederim.

Ekim, 2025

Serkan ÜNAL

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

PERLİT TABANLI HAFİF TUĞLA ÜRETİMİNDE GRANÜLER AEROJEL VE TİNKAL ATIKLARININ KULLANILABİLİRLİĞİ: DENEYSEL BİR İNCELEME

Serkan ÜNAL

KIRŞEHİR AHI EVRAN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLER ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Hakan ÇAĞLAR
Yıl: 2025; Sayfa: 81

Jüri: Dr. Öğr. Üyesi Hakan ÇAĞLAR
Prof. Dr. M. Mustafa ÖNAL
Prof. Dr. Salih YAZICIOĞLU

Tuğla nesiller boyu varlığını sürdüren ve inşaat endüstrisinde yaygın bir şekilde kullanılan yapı malzemesidir. Bu derece önemli olan bu malzeme teknolojinin gelişmesiyle sürekli kendini yenilemiştir. Bu yenileme gerek organik gerekse endüstriyel atıklarla yapılmıştır. Bu tez çalışmasında, fiziksel ve mekanik açıdan standart tuğlaya göre daha üstün özellikli, termal iletkenliği iyileştirilmiş, kuru birim hacim ağırlığı azalmış hafif bir duvar elemanı elde edilmesi amaçlanmıştır. Bu amaç doğrultusunda, tuğla üretiminde perlit malzemesi hammadde olarak, tinkal atığı ve granüler aerogel ikame maddesi (hacimce %0:30, %5:25, %10:20, %15:15, %20:10, %25:5; %30:0) olarak kullanılmıştır. Üretilen numunelere fiziksel ve mekanik deneyler uygulanmıştır. Bunun yanı sıra mikro yapılarının incelenmesi için SEM görüntüleri alınmıştır. Çalışmada sonucunda, termal özellikleri iyileştirilmiş, standart tuğlaya kıyasla daha hafif tuğla elde edilmiştir. Üretilen tuğlaların gerek yapısal gerekse dekoratif uygulamalarda kullanılabileceği sonucuna varılmıştır. Atıkların ve doğal kaynaklarımızın tuğla üretiminde kullanılması ile hem çevreye olan zarar azaltılmış hem de sürdürülebilir bir yapı malzemesi üretilmiş olacaktır.

Anahtar Kelimeler: Perlit, Tinkal atığı, Granüler aerogel, Tuğla

ABSTRACT

MASTER’S THESIS

USABILITY OF GRANULAR AEROGEL AND TINCAL WASTES IN PERLITE- BASED LIGHTWEIGHT BRICK PRODUCTION: AN EXPERIMENTAL INVESTIGATION

Serkan ÜNAL

**KIRŞEHİR AHI EVRAN UNIVERSITY
INSTITUTE OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES
DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING**

Supervisor: Assist. Prof. Dr. Hakan ÇAĞLAR
Year: 2025; Pages: 81
Juries: Assist. Prof. Dr. Hakan ÇAĞLAR
Prof. Dr. M. Mustafa ÖNAL
Prof. Dr. Salih YAZICIOĞLU

Brick is a building material that has survived for generations and is widely used in the construction industry. This vital material has continuously been renewed with the advancement of technology. This renewal was achieved with both organic and industrial waste. This thesis aimed to produce a lightweight wall element with physical and mechanical properties superior to standard brick, improved thermal conductivity, and reduced dry unit weight. To achieve this aim, perlite was used as raw material in brick production, tincal waste and granular aerogel substitutes (0:30%, 5:25%, 10:20%, 15:15%, 20:10%, 25:5%; 30:0% by volume). Physical and mechanical tests were applied to the produced samples. SEM images were also taken to examine their microstructures. The study resulted in improved thermal properties and a lighter brick compared to standard bricks. It was concluded that the bricks produced could be used in both structural and decorative applications. By utilizing waste and our natural resources in brick production, both environmental damage will be reduced and a sustainable building material will be produced.

Key Words: Perlite, Tincal waste, Granular aerogel, Brick

TABLolar DİZİNİ

Sayfa No

Tablo 1.1. Perlitinin özellikleri.....	8
Tablo 1.2. Dünya’da perlit üretimi.....	9
Tablo 1.3. Türkiye’de perlit rezervleri.....	11
Tablo 1.4. Borun fiziksel ve kimyasal özellikleri.....	15
Tablo 1.5. Endüstriyel açıdan önemli boratlar.....	17
Tablo 1.6. Aerojellerin özellikleri.....	29
Tablo 3.1. Perlitinin özellikleri.....	41
Tablo 3.2. Granüler aerjelin teknik özellikleri.....	42
Tablo 3.3. Tinkal atığının teknik özellikleri.....	43
Tablo 3.4. Killi toprağın mineralojik özellikleri.....	44
Tablo 3.5. Karışım reçetesi.....	45

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa No

Şekil 1.1.	Ham perlit.....	6
Şekil 1.2.	Genleştirilmiş perlit.....	7
Şekil 1.3.	Türkiye’de bulunan perlit ve pomza yatakları.....	10
Şekil 1.4.	Bor atomu.....	13
Şekil 1.5.	Borun görüntüsü.....	14
Şekil 1.6.	Dünyadaki bor kaynaklarının dağılımı.....	16
Şekil 1.7.	Tinkal.....	18
Şekil 1.8.	Kernit.....	18
Şekil 1.9.	Üleksit.....	19
Şekil 1.10.	Probertit.....	20
Şekil 1.11.	Kolemanit.....	21
Şekil 1.12.	Pandermit.....	21
Şekil 1.13.	Bor atıklarını değerlendirme yöntemleri.....	26
Şekil 1.14.	Aerojel.....	27
Şekil 3.1.	Mollaköy perliti.....	42
Şekil 3.2.	Granüler aerojel.....	43
Şekil 3.3.	Tinkal atığı.....	43
Şekil 3.4.	Killi toprak.....	44
Şekil 3.5.	Kuru karışım hazırlama.....	46
Şekil 3.6.	Pişirilmiş hafif tuğla numuneleri.....	47
Şekil 3.7.	Kılcal su emme, a); 60 dk., b)120 dk.....	49
Şekil 3.8.	Isı iletim katsayısı tayin cihazı.....	49
Şekil 3.9.	Basınç dayanımı cihazı.....	50
Şekil 3.10.	SEM cihazı.....	52
Şekil 4.1.	Kuru birim hacim ağırlık grafiği.....	54
Şekil 4.2.	Porozite grafiği.....	55
Şekil 4.3.	Komposite grafiği.....	56
Şekil 4.4.	Kılcal su emme grafiği.....	57
Şekil 4.5.	Isı iletim katsayısı grafiği.....	58
Şekil 4.6.	Basınç dayanımı grafiği.....	59
Şekil 4.7.	Eğilmede çekme dayanımı grafiği.....	60
Şekil 4.8.	REF numunesinin SEM görüntüsü.....	61

Şekil 4.9. N1 numunesinin SEM görüntüsü.....	62
Şekil 4.10. N7 numunesinin SEM görüntüsü.....	62



SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler	Açıklama
Al_2O_3	: Alüminyum oksit
B	: Bor
B_2O_3	: Boraks
Fe_2O_3	: Demir oksit
U	: Isıl Geçirgenlik Katsayısı
CaO	: Kalsiyum oksit
K	: Kelvin
MgO	: Magnezyum oksit
MPa	: Megapaskal
Mt	: Metrik ton
μm	: Mikrometre
nm	: Nanometre
K_2O	: Potasyum oksit
SiO_2	: Silisyum oksit
Na_2O	: Sodyum oksit

Kısaltmalar	Açıklama
ABD	: Amerika Birleşik Devletleri
A.Ş	: Anonim Şirketi
Ar-Ge	: Araştırma Geliştirme
IC	: Entegre Devre
EP	: Genleştirilmiş Perlit
GBFS	: Granüle Yüksek Fırın Cürufu
FW	: İnce Atık
RM	: Kırmızı Çamur
CW	: Kil Atığı
MTA	: Maden Tetkik Arama
LCD	: Sıvı Kristal Ekran
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskobu

1. GİRİŞ

Toprak, ekosistemimizde bitki yaşamını desteklemek için hayati bir rol oynar, ancak hızlı kentleşme nedeniyle bu doğal kaynak, tuğla üretimi için yoğun tüketim nedeniyle hızla tükenmektedir (Hussain ve ark., 2023). Genel olarak, inşaat sektörü küresel kaynak tüketimine ve çevresel etkiye önemli ölçüde katkıda bulunmaktadır (Ishaq ve ark., 2025).

Toprak esaslı tuğlalar dünya çapında yaygın olarak inşaat malzemesi olarak kullanılmaktadır. Bir binanın bölme duvarı veya tuğla çit olarak bir yapının duvar inşasında kullanılan yapı malzemesidir (Shah ve ark., 2020). Pişmiş kil tuğlalar, düşük maliyetleri ve üretimlerinin basitliği nedeniyle, özellikle düşük ve orta gelirli ülkelerde, küresel olarak baskın bir yapı malzemesidir.

Tuğla malzemesi, hammadde ve klasik şekil modelleri açısından tuğlanın geleneksel üretim süreci, bu önemli malzemeyi gelişimde geride bırakmıştır. Konut ve endüstriyel binaların yanı sıra, bu yapı malzemesi altyapı, su ve kanalizasyon tesislerinde de büyük miktarlarda kullanılmaktadır. Özellikle son on yılda, artan nüfus nedeniyle inşaat sektörüne olan büyük talep nedeniyle bu malzemelerin arz ve talep yönetiminde bir tutarsızlık yaşanmıştır. Konut talebindeki artışın öngörülmesiyle birlikte, tuğla talebinde de buna paralel bir büyüme beklenmektedir (Olsson ve ark., 2025). Sürekli artan talepleri karşılamak için araştırmacılar, inşaat malzemeleri için sürdürülebilir alternatif çözümler tasarlamaya ve geliştirmeye çalışmaktadır. İnşaat endüstrisinde çevre dostu, düşük maliyetli ve hafif malzemelerin artan popülaritesi, standartlarda onaylanan ve çevreye faydalı olan malzeme gereksinimlerinin nasıl karşılanacağı ve doğrulanacağı konusunda araştırma yapılmasını gerektirmektedir. Tuğla, yangına dayanıklılık, ısı ve ses yalıtımı, ısı ve nem konforu ve uzun süreli dayanıklılık gibi avantajlı özellikleri nedeniyle yapı malzemesi olarak en uygun duvar malzemelerinden biridir (Raunt ve ark., 2011; La Rubia-García, 2012).

Son zamanlarda, dünyanın birçok ülkesinde geleneksel tuğlaların üretimi için doğal kaynaklı malzeme sıkıntısı yaşanmaktadır. Bu nedenle, Çin gibi bazı ülkeler tuğla üretiminde atık malzemelerin kullanımını desteklemektedir. Organik ve inorganik atıkların kullanımıyla tuğla malzemelerinin üretimini ve kullanımını desteklemek için uygulanabilir standartların geliştirilmesine ihtiyaç duyulmaktadır. Mevcut tuğla üreticilerinin geleneksel tuğla üretim sürecinde vazgeçemedikleri bazı alışkanlıkları olduğundan, yeni teknolojilerin kullanımına ve atık malzemelerden yenilikçi ve çevre dostu yeşil tuğlaların üretimine olan ilgileri artırılmalıdır. Atıklardan üretilen tuğlaların

üretimini ve uygulamasını desteklemek için teknik, ekonomik ve çevresel yönler hakkında birçok çalışma yapılması ve ayrıca atık geri dönüşümü ve sürdürülebilir kalkınma ile ilgili hükümet politikaları ve halk eğitiminin geliştirilmesi gerekmektedir (Zhang, 2013).

Son zamanlarda bazı araştırmacılar, tuğla üretiminde organik ve inorganik içerikli çeşitli atıkların kullanımı hakkında birçok çalışma yapmıştır (Raunt ve ark., 2011; La Rubia-García, 2012). Tuğlaların geliştirilmesi yönünde araştırmacılar, köpük oluşturuca madde teknolojisine odaklanmanın yanı sıra, kullanılan bileşenlerin bileşimini ve alternatif malzemeleri çeşitlendirme konusunda da yoğun çalışmalar yürütmektedir (Birawidha ve ark., 2024).

Perlit son zamanlarda özellikle inşaat sektöründe kullanılan bir malzeme olarak karşımıza çıkmaktadır. Hafif tuğla, tuğla üretiminde çimento, kum, su ve perlit gibi hafif malzemeler kullanılarak elde edilmektedir. Özellikle son zamanlarda perlit gibi madenler kullanılarak tuğlaların daha hafif hale getirilmesi için çalışmalar yapılmaktadır. Tüm bu çalışmaların yapılmasının sebebi tuğlaya mukavemet kazandırmak değil, tuğlaların yalıtımını arttırmaktır. İnşaat sektöründe kullanılan tuğlaların hem hafif hem de iyi bir yalıtım malzemesi olması büyük önem taşımaktadır (Ekin ve Toklu, 2020). Bu anlamda perlit malzemesi, hafif agrega sınıfında hafif ağırlık özelliklerini içermektedir (Shah ve ark. 2020).

Endüstriyel atıkların tuğla imalatına dahil edilmesi de dahil olmak üzere sürdürülebilir inşaat uygulamalarına olan ilgi giderek artmaktadır (Sutcu ve ark., 2015). Endüstriyel atıkların değerlendirilmesi yalnızca atık bertaraf sorununu çözmekle kalmıyor, aynı zamanda sürdürülebilir inşaat sektörü için doğal kaynaklara olan talebi de azaltmaktadır (Xia ve ark., 2025).

Tuğla imalatına dahil edilen en önemli atıklardan biri de bor atığıdır (Çağlar, 2024). Bor içeren atıklar, çıkarılma süreçleri sırasında büyük miktarlarda ortaya çıkar. Yüksek miktarda bor içeren atıklar, ekonomik kayıplara neden olmasının yanı sıra ciddi çevre sorunlarına da yol açmaktadır (Kiliçarslan ve ark., 2013). Türkiye'de her yıl tınkal cevherinden boraks üretim proseslerinde büyük miktarda boraks atığı oluşmaktadır. Bu atıklar öncelikli olarak kil bileşenlerini ikincil olarakta B_2O_3 ve bir miktarda safsızlık içermektedir. Bu atık materyaller kimyasal bileşimleri nedeniyle inşaat tuğlası üretimine uygun ham maddelerdir (Elbeyli ve ark., 2004). Ankara'nın batısında, Eskişehir'de bulunan Kırka Boraks İşletmeleri, doğal boraks ve bir sodyum borat minerali olan tinkalin işlenmesi için hem yoğunlaştırma hem de rafinasyon tesislerine sahiptir. Bu işlemler

sonucunda yılda 400.000 tona kadar atık üretilmektedir (Uslu ve Arol, 2004). Bu nedenle bor atığının tuğla üretiminde kullanılması hem çevreye hem de malzeme iyileştirmesini olumlu yönde etki sağlayacaktır.

Son zamanlarda tuğla üretiminde nanomalzemelerde aktif bir şekilde kullanılmaktadır (Lashen ve ark., 2022; Ting ve ark., 2023; Mohammed, 2025). Bunlardan biri de aerojeldir (Çağlar, 2024; Yu ve ark., 2025; Yue ve ark., 2025; Buratti ve ark., 2025). Aerojel, ultra düşük yoğunluk, düşük ısı iletkenliği ve basınç modülü ile yığın yoğunluğu arasındaki kuvvet yasası ilişkisi gibi birkaç benzersiz özelliğe sahiptir (Çağlar, 2024). Aerojel, önemli termal yalıtım özelliklerine sahip nano gözenekli bir malzemedir ve binalarda enerji verimliliği için geleneksel malzemelerin performansını iyileştirmek için iyi bir adaydır. Bu nedenle inşaat sektöründe giderek daha fazla ilgi görmektedir ve araştırmacılar granüler aerojeli tuğlalara dahil etmek için araştırmalar yürütmektedir (Buratti ve ark., 2022). Bunun yanı sıra aerojeller mimari tasarımlar (Riffat ve Qiu, 2013; Ganobjak ve ark., 2020), inşaat endüstrisi (Shanmugam ve ark., 2020; Gu ve ark., 2024), otomotiv endüstrileri (Fikry ve ark., 2023; Kim ve Hong, 2024), havacılık endüstrisi (Bheekhun ve ark., 2013; Jin ve ark., 2023), katalizör desteği (Guilminot ve ark., 2007), ısı yalıtımı (Varamesh ve ark., 2024; Wu ve ark., 2024), ses yalıtımı (Song ve ark., 2024; Le ve ark., 2024), havadan nanopartikül filtrasyonu (Kim ve ark., 2016; Zhai ve ark., 2016) havadan nanopartikül filtrasyonu (Kim ve ark., 2016) ve ilaç dağıtımı (Marin ve ark., 2014; García-González ve ark., 2021) için alternatif malzeme olarak seçilmiştir.

Tezin Amacı;

Bu tez çalışmasında; doğal kaynaklarımızdan olan perlit agrega olarak, granüler aerojel ve tinkal atıkları hacimce farklı oranlarda (%0:30, %5:25, %10:20, %15:15, %20:10, %25:5; %30:0) ikame malzemesi olarak kullanılması sonucu hafif tuğla üretimi hedeflenmiştir. Bu hedef doğrultusunda, üretilen bu hafif tuğlaların fiziksel ve mekanik özellikleri ve yapısal karakterizasyonu araştırılmıştır.

Fiziksel özelliklerinin belirlenmesi amacıyla, kuru birim hacim ağırlık, kılcal su emme, porozite, komposite ve ısı iletim katsayısı tayini deneyleri yapılmıştır.

Mekanik özelliklerinin belirlenmesi amacıyla, eğilmede çekme dayanımı ve basınç dayanımı deneyleri uygulanmıştır.

Malzeme bünyesinde oluşan yapıları ve içyapı durumunu araştırmak için SEM görüntüleri alınmıştır.

Tez çalışması neticesinde, fiziksel ve mekanik bağlamda standart tuğlaya göre daha üstün özellikli, termal iletkenliği iyileştirilmiş, kuru birim hacim ağırlığı azalmış hafif bir duvar elemanı elde edilmesi amaçlanmıştır.

Tezin Önemi;

Tuğla asırlar boyu süregelen ve varlığını sürekli iyileşerek devam ettiren toprak esaslı bir yapı malzemesidir. Asırlar boyu tuğla iyileştirilmesi üzerine çalışmalar yapılmıştır. Bu tez çalışması da tuğlanın iyileştirilmesi üzerine etkili bir çalışma olmuştur. Tez çalışmasının neden önemli olduğu aşağıda sıralanmıştır.

- ✓ Üretilen numunelerin birim hacim ağırlığının azalması tuğlanın binaya etki edeceği ölü yükü azaltacak ve binaya etki edecek yükün hafiflemesini sağlayacaktır.
- ✓ Duvar yükünün hafif olması temele aktarılacak yükün azalmasını sağlayacaktır.
- ✓ Hafif duvar elemanının depremden etkilenmesi standart duvar elemanına göre daha az olacaktır.
- ✓ Isı iletim katsayısının standart tuğlaya göre düşük olması yapıya ekstra ısı yalıtımı yapma ihtiyacı doğurmayacaktır.
- ✓ Termal özelliği iyileştirilmiş tuğla kullanımı ile yapı içi konfor şartları iyileştirilmiş olacaktır.
- ✓ Deprem etkisi, ısı yalıtımı gibi birçok sorunun çözümünde etkili olacaktır.
- ✓ Üretilen hafif tuğla numunelerinde killi toprak yerine perlitin kullanılması verimli toprakları korumak adına etkili bir çözüm olacaktır.
- ✓ Bor işlenmesi sonuca açığa çıkan tıkalı atıklarının tuğla üretiminde kullanılması ile atık gölet maliyetleri azalacaktır. Bu da şirket ekonomisine önemli ölçüde katkı sağlayacaktır.
- ✓ Atıkların çevreye ve insan sağlığına verdikleri zarar azalacaktır.
- ✓ Doğal hammaddelerimiz, endüstriyel atıklarımız ve nano teknolojik malzemelerle üretilen hafif tuğla ile sürdürülebilir yapı üretimine katkıda bulunulacaktır.
- ✓ Tuğla imalatında kullanılan bu malzemeler gelecek kuşaklara daha iyi bir çevre bırakılması bakımından önem taşımaktadır.
- ✓ Deneyler sonucunda yeni bir malzeme üretimine veya mevcut malzemede iyileştirmeye gidilmesi teknolojiye; tez sonunda elde edilen verilerin bilimsel ortama aktarılması ile bilime katkı sağlanacaktır.

Tüm bunlar göz önüne alındığında, tezin gerek akademik gerek ekonomik gerekçe çevresel etki açısından ne derece önem arz ettiği ortaya konulmuştur.

Tezin Kapsamı;

Hafif tuğla üretimi yapılan tez çalışmasında killi toprak Ankara ili Gölbaşı ilçesi incek mahallesi bölgesinden alınması sebebiyle killi toprak Ankara ili ile sınırlandırılmıştır. Kullanılan perlit Erzincan ili Mollaköy bölgesinden alınarak perlitin kapsamı belirlenmiştir. Tinkal atığı ise Eskişehir il sınırları içerisinde yer alan Kırka bölgesinden temin edilmiş böylece tinkal atığı için de sınırlar belirlenmiştir.

Tez çalışması 5 bölüm olarak tasarlanmıştır.

Birinci bölüm **GİRİŞ** olarak adlandırılmıştır. Bu bölümde, çalışmanın amacı, önemi ve kapsamının yanı sıra, perlit, bor ve aerjel hakkında bilgiler verilmiştir.

İkinci bölüm **ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR** olarak adlandırılmıştır. Bölümde tuğla üretiminde perlit, aerjel ve bor atığı kullanımı üzerine yapılan akademik çalışmalar tek tek irdelenmiştir. Her bir malzeme ayrı başlıklar halinde sunulmuş ve çalışmaların özetleri verilmiştir.

Üçüncü bölüm **MATERYAL VE YÖNTEM** olarak adlandırılmıştır. Bu bölümün Materyal kısmında tezde kullanılan materyaller (killi toprak, perlit, granüler aerjel, tinkal atığı, karışım suyu) tek tek açıklanmış, görselleri ve özellikleri tablolar halinde sunulmuştur. Yöntem kısmında ise tuğla üretimi yapılmış ve tuğlaya uygulanacak deneylerden bahsedilmiştir.

Dördüncü bölüm **BUGULAR VE TARTIŞMA** olarak adlandırılmıştır. Bu bölümde tez kapsamında üretimi yapılan ve numunelere yöntem kısmında verilen deneylerin uygulanması sonucu elde edilen veriler grafikler yardımıyla yorumlanmıştır. Elde edilen sonuçlar literatürde yer alan diğer çalışmalarla karşılaştırılmış ve tartışma kısmı oluşturulmuştur.

Beşinci bölüm **SONUÇ VE ÖNERİLER** olarak adlandırılmıştır. Bu bölümde tez çalışmasından elde edilen sonuçlar verilmiş ve sonrasında önerilerde bulunulmuştur.

1.1. Perlit

Perlit, volkanik lavların aniden soğuması ve sertleşmesi ile meydana gelen, bünyesinde hapsolmuş su bulunduran, doğal volkanik cam çeşididir (Ciullo, 1996; Papa ve ark., 2018; Raji ve ark., 2019). Şekil 1.1'de gösterilen ve gri renk tonlarına sahip perlit, inci manasına gelen "perle" kelimesinden gelmektedir. Bazı perlit çeşitleri kırıldığında inci gibi parlak minik küreler meydana gelmektedir. Bu da volkanik camın perlit olarak

adlandırılmasına neden olmaktadır (Gül, 2016) Perlit, dünyanın volkanik bölgelerinde yaygın olarak bulunan bir malzemedir.



Şekil 1.1. Ham perlit

Perlit, çevreyi kirletmeyen veya organik bileşen içermeyen doğal ve çevre dostu bir maddedir. (Ismael, 2025). Yapısında sülfat, fosfor, radyoaktif element, ağır metal ve organik madde gibi zararlı bileşenler bulunmamaktadır. Bu nedenle kimyasal olarak oldukça saftır (Devlet Planlama Teşkilatı, 2001). Perlitler ayrıca, dünyanın volkanik bölgelerinde bulunan obsidyen kayalarından da kolayca üretilmektedir. Bu da onu dünyanın her yerinde kolayca bulunabilen bir malzeme haline getirmektedir (Murımı, 2020).

Yumuşama noktasını aşan 700 ila 900°C sıcaklık aralığında, genleşme özelliği gösterir. Bu genleşme, ham perlit bünyesinde bulunan absorbe edilmiş suyun hızla buharlaşması ve ısıyla yumuşayan kayada poröz yapıların oluşturmaya neden olur. Sonuç olarak, perlit genişerek 20 kata kadar hacmi artmakta ve köpük benzeri bir yapı oluşmaktadır (Kaba ve ark., 2013; Allameh-Haery ve ark., 2017).

Doğal perlit taşları 870 ila 1200 °C arasında değişen sıcaklıklara maruz kaldığında, orijinal boyutlarının 15-35 katına kadar genişmekte ve düşük yoğunluklu genişletilmiş perlit oluşmaktadır (Şekil1.2). Bileşimindeki %2-6 su konsantrasyonu

nedeniyle birçok kabarcıkla ayırt edilen gözenekli, düşük yoğunluklu hücresel bir ürüne dönüşmektedir (Çok ve ark., 2003).

Genleştirme işleminde, büyük parçacıklardan oluşan ham perlit tozu yaklaşık 1150 K'ye (876,9 °C) ısıtılır ve malzeme yumuşatılır. Bu yumuşatma ile perlitin yapısındaki su buharlaşarak çok sayıda gözenek oluşturur. Gözenek çapları genellikle 10 µm ile yaklaşık 100 µm arasındadır (Allameh-Haery ve ark., 2017; Güneri, 2022). Perlit, mikroskopik analizde hem laminar tabakaların kalınlığını hem de inceliğini göstermektedir. İşlenmemiş perlitin rengi açık griden parlak siyaha kadar değişmekte ve genleştikçe saf beyazdan grimsi beyaza dönmektedir (Sarı ve Paşamehmetoğlu, 2009; Liu ve ark., 2016)



Şekil 1.2. Genleştirilmiş perlit (Kale perlit, 2025)

Genleştirilmiş perlit, ham perlitten üretilmektedir. Oldukça gözenekli bir yapıya, düşük yoğunluğa, düşük maliyete ve iyi termal güvenilirliğe sahiptir (Karaman ve ark., 2011).

Perlit ilk olarak 1940 yılında Las Vegas'ta bir fırında deneyim kazanmak için genleştirilmiş ve inşaat sıvası elde etmek için kullanılmıştır. Perlitin 1941 yılında Surerrior'da (Arizona) bulunan Picket Post Dağı'ndan çıkarıldığı tahmin edilmektedir (MTA, 1985).

✓ **Perlitin Özellikleri**

Perlit aslında, SiO_2 , Al_2O_3 ve az miktarda Fe_2O_3 , K_2O , Na_2O , CaO ve MgO vb. metal oksitlerden meydana gelmiştir. Amorf ve inorganik yapıda olan perlitin ana özelliği (Stefanidou ve ark., 2023; Maxim ve ark., 2014), bünyesinde bulunan %2-%6 oranındaki

su içeriğidir (Çavdaroglu, 2025). Perlitin özellikleri üretime katılan perlitin oranına ve şekline göre farklılık göstermektedir. Tablo 1.1’de perlitin özellikleri verilmiştir.

Tablo 1.1. Perlitinin özellikleri (Cebeci, 2025)

Fiziksel Özellik	
Renk	Beyaz ve grinin tonları
Yumuşama Noktası	871 - 1093 °C
Erime Noktası	1260 - 1343 °C
Kuru Ağırlık	1100- 1200 kg/m ³
Ph	6.5 - 8.0
Özgül Isı	0.2 Cal/g °C
Özgül Ağırlık	2200 – 2400 kg/m ³
Refraktif İndeks	1.5
Serbest Nem	Maksimum 0.5
Gevşek Yoğunluk (Genleşmiş)	32 – 400 kg/ m ³
Isı İletkenliği (Genleşme)	0.04 W/mK
Sertlik (Mohs)	5-6
Asitte Erime Özelliği	*Konsantre sıcak alkali ve hidroklorik asitte erir. * Konsantre mineral asitlerinde az erir (%2). * Seyreltik mineral veya konsantre asitlerde çok az erir (%0,1)
Kimyasal Bileşimler	Miktar (%)
SiO ₂	71,0–75,0
Al ₂ O ₃	12,5–18,0
Na ₂ O	2,9–4,0
K ₂ O	0,5–5,0
CaO	0,5–2,0
Fe ₂ O ₃	0,1–1,5
MgO	0,02–0,5
H ₂ O	2,0–5,0
MnO ₂ , FeO	0,0-0,1
SO ₃ , Serbest silis ve klorür	0,0-0,2

✓ Dünya’da ve Türkiye’de Perlit Durumu

Perlit, volkanik olaylar neticesinde meydana gelen silikat mineralleridir. Bu yüzden, perlit yatakları volkanik kuşak üzerinde yer almaktadır (Yüksel, 2024). Dünya’da üretilen tahmini perlit miktarına bağlı olarak, dünya üretiminin başlıca perlit üreticileri Çin (%35), Yunanistan (%30), Türkiye (%20) ve Amerika Birleşik Devletleri (%10)’dir. Çin’in perlit tüketimi artarken, Türkiye ve Yunanistan dünyanın başlıca perlit ihracatçıları olmaya devam etmektedir. Bu, dünya genelinde daha fazla perlit üretilebileceği, ancak yalnızca birkaç ülkenin bu sorunu çözmek için çaba gösterdiği anlamına gelmektedir (Demir, 2017).

Yapılan çalışmalarda, dünyada perlitin görünür rezerv miktarı 700 milyon ton olarak belirlenmiştir. Bu tespitten yola çıkılarak, dünyada toplam 7,7 milyar ton perlit rezervi olduğu ön görülmektedir. (Kalkınma Bakanlığı, 2018). Tablo 1.2’de 2019 ve 2020

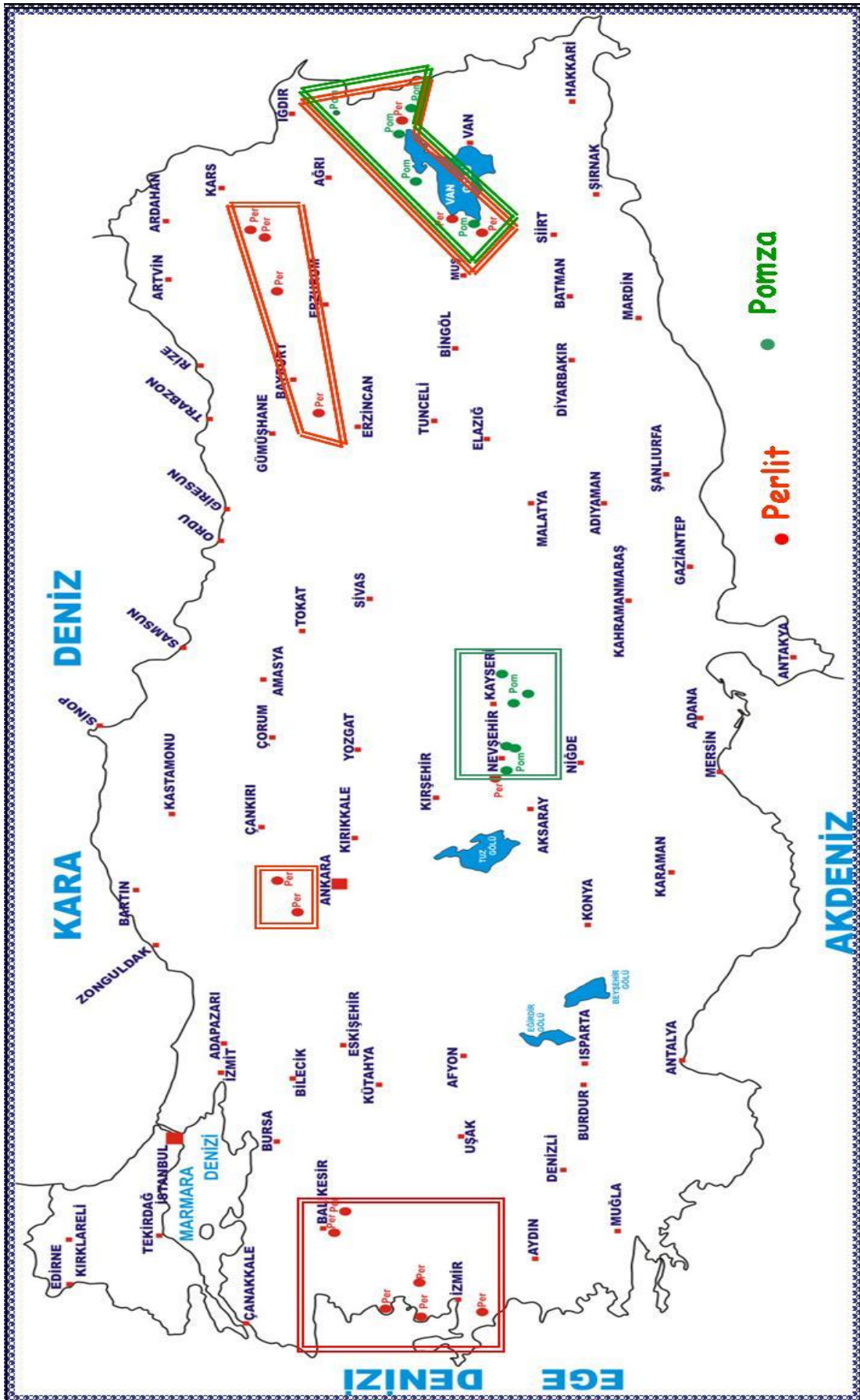
yıllarında dünyada perlit üretimi verilmiştir. Tabloya göre en yüksek üretim miktarı Çin Halk Cumhuriyetine aittir. İkinci sırada Yunanistan, üçüncü sırada ise Türkiye yer almaktadır.

Tablo 1.2. Dünya’da perlit üretimi (Perlite Institute, 2022)

Ülke	Yıllara Göre Üretim Miktarı (Bin Ton)	
	2019	2020
Çin Halk Cumhuriyet	1.300	1.300
Yunanistan	719	700
Türkiye	650	640
ABD	526	520
İran	72	70
Macaristan	71	70
Slovakya	40	40
Meksika	20	20
Arjantin	19	19
Yeni Zelanda	17	17
Diğer	29	29
Toplam (Yaklaşık)	3.460	3.400

Dünyada bulunan perlit rezervlerinin yaklaşık %74’ü ise Türkiye sınırları içerisinde bulunmaktadır (Aksoy ve ark., 2022; Yüksel, 2024). 2018 yılında yapılan bir çalışmada, dünya çapında üretilen ham perlit miktarının 3,04 milyon metrik ton (Mt) olduğu ifade edilmiştir (Çavdaroğlu, 2025).

Şekil 1.3’de perlit ve pomza yataklarının yer aldığı Türkiye haritası verilmiştir. Haritaya göre Doğu Anadolu ve İç Anadolu Bölgesi perlit rezervi konusunda en zengin bölgelerdir.



Tablo 1.3’de Türkiye’de perlit rezervlerinin durumu verilmiştir (Pazar, 2025). Tabloya göre en yüksek rezerv miktarı Kars-Sarıkamış’ta en düşük rezerv miktarı ise Ankara-Kızılcahamam-Korkmazlar’da bulunmaktadır (Pazar, 2025).

Tablo 1.3. Türkiye’de perlit rezervleri

Perlit Kaynağı	Rezerv (Ton)
Kars-Sarıkamış	2.043.000.000
Van-Erciş	1.400.000.000
Bitlis-Adilcevaz ve Tatvan	940.000.000
Nevşehir-Derinkuyu-Acıgöl	800.000.000
Erzurum-Pasinler	386.824.000
Çankırı-Orta-Kalfat	128.200.000
İzmir-Bergama-Cumaovası-Foça	88.000.000
Erzincan-Mollatepe	71.500.000
Ankara-Çubuk	51.000.000
Ankara Kızılcahamam-Güvem	31.500.000
Balıkesir-Savaştepe	26.000.000
Balıkesir-Sındırgı	21.206.000
Manisa-Saruhanlı	17.700.000
Kütahya-Avdan	11.500.000
Ankara-Kızılcahamam-Çamkoru	8.000.000
Ankara-Kızılcahamam-Korkmazlar	3.700.000
Toplam	6.028.130.000

Türkiye’de bulunan perlit yatakları iyi-orta kalite olarak değerlendirilmiş ve aşağıda bulunan bölgelerde orta-iyi kalitede perlit yatakları bulunduğu tespit edilmiştir (Cebeci, 2025).

- ✓ Ankara- Kızılcahamam,
- ✓ Ankara-Çubuk,
- ✓ Çankırı-Orta,
- ✓ Balıkesir-Savaştepe
- ✓ Balıkesir-Sındırgı,
- ✓ Bitlis-Tatvan,
- ✓ Erzincan-Mollaköy-Büyükçakırman,
- ✓ Erzurum-Pasinler,
- ✓ İzmir-Bergama,
- ✓ İzmir-Cumaovası,
- ✓ İzmir-Dikili,
- ✓ İzmir-Foça,
- ✓ Kars-Sarıkamış,
- ✓ Nevşehir-Acıgöl,

- ✓ Nevşehir-Derinkuyu,
- ✓ Van-Erciş,
- ✓ Malatya-Pötürge

Perlit üretimi sırasında herhangi bir kimyasal katkı kullanılmamaktadır. İşlem sonrasında herhangi bir yan ürün veya atık elde edilmemektedir. Tüm bunlar göz önüne alındığında, perlitin çevre dostu, çok amaçlı kullanılabilinen, sürdürülebilir bir mineral olduğu anlaşılmıştır (Çavdaroğlu, 2025).

✓ **Perlitin Kullanım Alanları**

Perlitin kullanım alanı fiziksel ve kimyasal özelliklerine bağlıdır. Türkiye üretilen perlitin yarısından fazlası inşaat sektöründe kullanılmaktadır. Sektörde özellikle yalıtım levhalarında, sıvalarda ve betonlarda agrega olarak kullanılmaktadır (Devlet Planlama Teşkilatı, 2001). Perlit inşaat sektörünün yanı sıra gıda, tarım, tıp, kimya ve metalurji gibi birçok sektörde de kullanılmaktadır (Ismael, 2025).

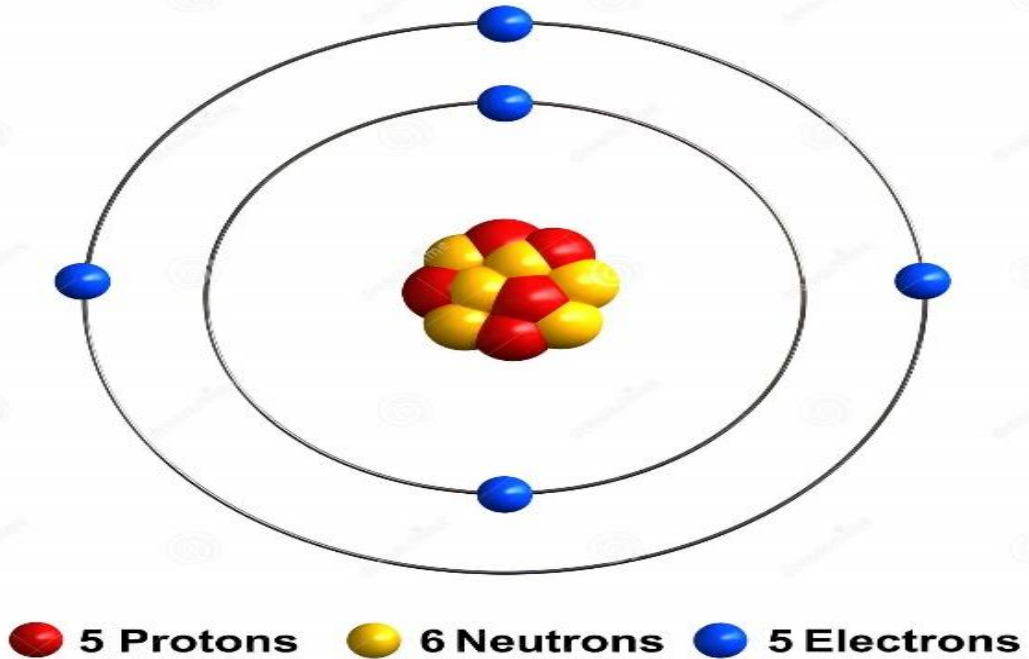
Perlitin kullanım alanları aşağıda sıralanmıştır.

- ✓ Betonda balast olarak
- ✓ Beton ve yapı elemanı üretiminde agrega olarak,
- ✓ Çatı katlarında yangın dayanımı ve su yalıtımı için kullanılır (Jedidi 2015; Murımı, 2020).
- ✓ Birçok asit ve alkaliye karşı dayanımı yüksektir.
- ✓ Isıya karşı dayanıklı olması nedeniyle yangın dayanımı yüksektir.
- ✓ Ses emiciliğinin yüksek olması nedeniyle ses yalıtımında kullanılmaktadır (Law Yim Wan ve ark., 2018; Alghadi ve ark., 2019).
- ✓ Akustik pano üretiminde,
- ✓ Otoyollarda ses emici panellerin üretiminde,
- ✓ Hafif tuğla üretiminde,
- ✓ Bölme duvar üretiminde,
- ✓ Hazır sıva üretiminde,
- ✓ Isı yalıtım özellikli sıva üretiminde (Cebeci, 2025).
- ✓ Döşeme elemanlarında gevşek dolgu malzemesi olarak, (Ayberk, 1995)
- ✓ Yeşil çatı uygulamalarında,
- ✓ Faz değişim materyalleri üretiminde dolgu malzemesi olarak kullanılmaktadır.
- ✓ Tarım sektöründe bitkilerin gelişimini arttırmada,
- ✓ Toprak yapısını iyileştirmede,

- ✓ Toprağın su tutma kapasitesini arttırarak kök gelişimini desteklemekte, (Kaya, 2019; Yüksel, 2024).
- ✓ Toprağa bırakılan tohumun hızlı bir şekilde gelişmesini sağlamada,
- ✓ Bira, şarap, şeker, yağ ve meyve suyu gibi sıvıların filtrasyonunda,
- ✓ Tekstil sanayide ağartma maddesi olarak,
- ✓ Gözenekli yapısı sayesinde absorban ve filtreleme materyali olarak (Çavdaroğlu, 2025).
- ✓ Kimyasal tepkimelerde katalizör olarak, (Chesterman, 1975).
- ✓ Isı yalıtım özellikleri sayesinde enerji jeoyapılarının tampon malzemelerinde katkı malzemesi olarak kullanılabilmektedir (Güneri, 2022).

1.2. Bor ve Bor Atığı

"B" harfiyle gösterilen bor, 3A grubunun tek metalik olmayan üyesidir. Atom numarası 5 ve kütle numaraları 10 ve 11 olan iki kararlı izotopu vardır (Şekil 1.4) (Çalık, 2002). Bor doğada serbest halde bulunmamaktadır. Ancak 150'den fazla mineralin yapısına bağlıdır. Kristalin bor, görünüm ve optik özellikler açısından elmasa benzer, siyah, sünek, sert ve katıdır. Ancak toz halinde amorf bir bordur ve kahverengi ile siyah renktedir (Güyağüler, 2001).



Şekil 1.4. Bor atomu (Web ileti, 1)

Şekil 1.5’de görüntüsü verilen bor, farklı oranlarda bor oksit içeren doğal bir bileşiktir. Yer kabuğunun yapısında %0,001 oranında bulunmaktadır. Oksijenle bağ yapmaya eğilimlidir ve bu nedenle birçok bor-oksijen bileşiğine sahiptir. Bu bor-oksit bileşiklerine borat denmektedir. Yer kabuğundaki 51. en yaygın element olan bor, boratlar ve borosilikatlar halinde bulunur (Alpaydın, 2019). Dünya’da toprak, kaya ve suda bulunmakta ve genellikle bileşikler halinde bulunmaktadır. Doğada yaklaşık 230 çeşit bor minerali olduğu bilinmektedir. Bor, birçok bileşik oluşturabildiği ve nötronları emebildiği için endüstride en yaygın kullanılan hammaddelerden biridir. Bu nedenle dünyada oldukça yaygındır.



Şekil 1.5. Borun görüntüsü (Web ileti, 2)

Bor, metaller veya ametallerle olan bileşiklerinin çoğu farklı özellikler gösterdiğinden, endüstrinin farklı alanlarında kullanılmaktadır. Bor, bir bileşikte metalik davranış göstermezken, saf bor iletkenlik özelliği göstermektedir (Karadağlı, 2019)

Bor, yaklaşık 6000 yıldır biliniyor olabilir. Günümüzde, Babillilerin altın ve gümüş işlemlerinde akışkan olarak bor kullandıkları bilinmektedir. Arkeolojik araştırmalar, günümüzdeki misyonlarından çok da uzak olmayan Mısırlıların da mumyalama, tıbbi ve metalurjik uygulamalarda bordan faydalandığını göstermiştir (Çiçek, 2013).

Bor saf olmadığında, oda sıcaklığında katı, siyah kristaller veya kahverengi amorf bir toz halinde görünür. Amorf ve kristal formlarda özgül ağırlıkları sırasıyla 2,37 ve 2,34’tür. Bor, şiddetli oksitleyici kimyasallara maruz kalmadığı sürece bir metaloiddir

(WHO, 1998). Bor, yüksek bir erime noktasına, zayıf bir elektrik iletkenliğine ve çeşitli oksidasyon durumlarına sahiptir (Wolska ve Bryjak, 2013).

Borun erime noktası 2190 ± 20 °C ve kaynama noktası 2250 °C'dir (Pehlivan ve Çetinkaya, 2004). Bor mineralleri, buharlaşmanın yüksek olduğu sulardan kimyasal çökelmeyle oluştukları için Evaporit olarak sınıflandırılmaktadır (Yiğitbaşoğlu, 2004). Bir element olarak bor, amorf formda koyu kahverengi bir toz, kristalize formda ise sert ve kırılğan bir yapıdır. Bor, metal ve ametal arasında özelliklere sahiptir ve yarı iletkendir. Borun elektriksel iletkenliği oda sıcaklığında çok düşük olmasına rağmen, artan ısıyla iletkenlik keskin bir şekilde artar (İpekoğlu ve Polat, 1987). Doğada iki dengeli izotop bulunmaktadır: 10B ve 11B. Bunlar sırasıyla %19,10-20,31 ve %79,69-80,90'dır. 10B izotopu, yüksek termal nötron tutma özelliği nedeniyle nükleer malzemelerde ve nükleer santrallerde kullanılmaktadır (Boren, 2019). Tablo 1.4'de borun fiziksel ve kimyasal özellikleri verilmiştir.

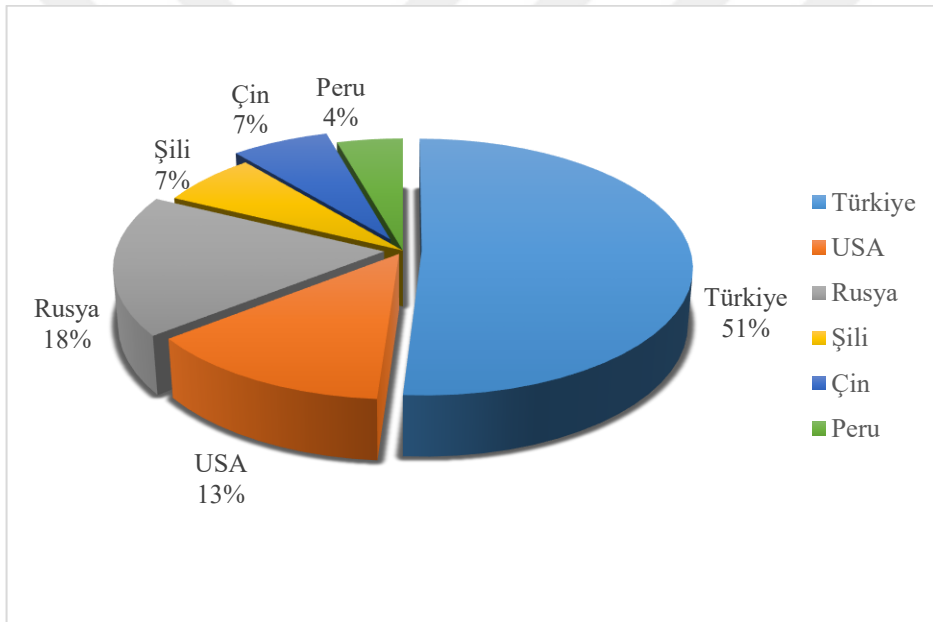
Tablo 1.4. Borun fiziksel ve kimyasal özellikleri (Karadağlı, 2019)

Fiziksel Özellik		
Özellik		Değer
Atomik kütle (g/mol)		93,13
Yoğunluk (g/cm ³)		2,34
Kaynama Noktası (°C)		4002
Erime Noktası (°C)		2300
Buharlaşma ısısı (kJ/mol)		480
Isı kapasitesi (J/(mol·K))		11,087
Knoop sertliği (HK)		2100-2580
Mohs sertliği (Elmas-15)		11
Vicker's sertliği (HV)		5000
Kimyasal Özellik		
Özellik		Değer
Elektrokimyasal eşdeğer (g/A.h)		0,1344
Elektronegatiflik (pauling)		2,04
Füzyon ısısı (kJ/mol)		50,2
Değerlik elektron potansiyeli (-eV)		190

Bugün dünyanın en büyük bor üreticisi olan Türkiye, bor madenciliği tesislerine 1865 yılında Osmanlı İmparatorluğu döneminde başlamıştır. İlk üretim borat pandemit (priceit, $4\text{CaO} \cdot 5\text{B}_2\text{O}_3 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$)'dir. Osmanlı İmparatorluğu'nun çöküşünün ardından, Türkiye Cumhuriyeti madenlerin kontrolünü ele geçirmiş ve adını tarihteki ilk modern madenciler olarak bilinen antik Hitit uygarlığından alan ETİ adlı yeni bir ulusal madencilik işletmesi kurmuştur. Türkiye, modern üretimine ilk olarak Avrupalı borik asit üreticilerine kolemanit ($\text{CaO} \cdot 3\text{B}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) tedarik ederek başlamıştır. Yeni bor madenlerinin keşfi ve teknolojinin gelişmesiyle birlikte, Türkiye bugün dünya bor kaynaklarının %72'sine sahip olarak çok çeşitli bor ürünleri üretmektedir (Çiçek, 2013).

Türkiye'deki bor madenciliği tesisleriyle hemen hemen aynı dönemde, Kaliforniya, Nevada (1872) ve Searles Gölü'nde (1873) ABD'de birkaç kolemanit ve üleksit yatağı bulunmuştur. İlk yatırımcılar bu mineralleri kolayca Boraks'a dönüştürebilmiş ve ticari değerini artırabilmişlerdir. Günümüzde bu madenler, ABD'nin önde gelen bor üreticileri olan U.S Borax (Rio Tinto Group'a ait) ve Searles Valley Minerals (Hindistan'ın Gujarat merkezli Nirma Limited şirketine ait) tarafından işletilmektedir. Bu iki şirket, ABD'nin en büyük bor üreticileri olmaya devam etmektedir.

Türkiye ve ABD, en büyük Borat üreticisi ülkelerdir; bunları Çin, Peru, Bolivya, Şili, Kazakistan, Arjantin ve İran takip etmektedir (Çiçek, 2013). Türkiye, dünyanın en büyük bor rezervlerine sahiptir ve dünya bor kaynakları aşağıdaki Şekil 1.6'da verilmiştir (Altınbaş, 2023).



Şekil 1.6. Dünyadaki bor kaynaklarının dağılımı

Bor bazlı mineraller, çeşitli miktarlarda bor oksit (B_2O_3) içermektedir (Al-Akashi, 2024). Bor oksit (B_2O_3) ve borik asit (H_2BO_3), bor bileşiklerinin en basit formlarıdır. Kalsiyumla bağlandığında kolemanit, kalsiyum-sodyumla bağlandığında üleksit ve sodyumla bağlandığında tinkal olarak adlandırılmaktadır (Sallı Bideci, 2016). En yaygın boratlar tinkal, kolemanit ve üleksittir. Sodyum perborat hariç tüm mineraller, ana aktif madde B_2O_3 olduğundan birbirlerinin yerine kullanılabilir. Sodyum perborat, aktif oksijen taşıyıcısı olarak kullanılmaktadır (Karadağlı, 2019).

Boratlar temel olarak hidrojen boratlar, sodyum boratlar, sodyum kalsiyum boratlar, kalsiyum borosilikatlar, magnezyum boratlar ve diğer boratlar olarak

sınıflandırılabilir (Karadağı, 2019). Tablo 1.5’de endüstriyel açıdan önemli olan boratlar verilmiştir.

Tablo 1.5. Endüstriyel açıdan önemli boratlar

Tür	Mineral	B ₂ O ₃ (%)	Notlar
	Tinkal (Boraks)	36,5	Kırka, ABD, Arjantin, Bolivya, Hindistan
	Tinkalonit	48,8	Çoğunlukla aksesuar olarak kullanılır.
		51,0	Arjantin'in Blanca bölgesinde, Türkiye, ABD ve Çin'de yataklar bulunmaktadır.
Sodyum Borat	Kernit		
	Üleksit	43,0	Üleksit yatakları Şili, ABD, Peru, Sırbistan ve Bolivya'da bulunmaktadır.
Sodyum-kalsiyum Borat	Probertit	49,6	ABD'de bulunmaktadır.
	Kolemanit	50,8	En büyük rezervler Türkiye'de bulunmaktadır.
	Pandermit	49,8	Yataklar Peru, Kırka ve Bigadiç rezervlerinde bulunmaktadır. (Adını Bandırma ilinden almaktadır.)
Kalsiyum Borat			

Tinkal (Na₂B₄O₇·10H₂O)

Doğal bir sodyum borat dekahidrat olan tinkal veya boraks, ticari olarak kullanılan en önemli bor minerallerinden biridir. Sodyum tetraborat veya disodyum tetraborat olarak da bilinen önemli bir borattır ve borik asidin tuzudur. Doğada şeffaf ve renksizdir, ancak safsızlıklar nedeniyle pembe, sarımsı ve gri renkte olabilmektedir. Boraks suda kolayca çözünmekte ve tinkalkonit oluşmaktadır. En büyük rezervler Türkiye'de, Eskişehir Kırka'da bulunmaktadır (Anthony ve ark., 2005).

Tinkal mineralinin özgül ağırlığı 1,72'dir. Ayrıca, Mohs sertliği 2-2,5 civarındadır. Tinkalin kristal sistemi monoklindir ve kristal yapısı kısa prizma şeklindedir. Şekil 1.7’de, tinkal mineralinin fotoğraflık bir görünüm göstermektedir (Alpaydın, 2019)



Şekil 1.7. Tinkal (Web ileti 3)

Kernit ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$)

Kernit (Şekil 1.8) ilk olarak 1926 yılında Kaliforniya, Boron'daki Kramer Bölgesi'nde devasa bir yeraltı yatağında keşfedilmiştir. Hemen ardından ticari önemi fark edildi ve kimyasal boraksın en önemli kaynağı haline gelerek, mineral boraksın kendisinden bile daha karlı bir cevher haline gelmiştir (kernit, borakstan daha az su içerir). Monoklinik bir kristal sistemine sahiptir ve kalın, katı damarlarda oluşmaktadır (Anthony ve ark., 2005).



Şekil 1.8. Kernit (Web ileti 4)

Üleksit ($\text{NaCaB}_5\text{O}_9 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$)

Üleksit, triklitik kristal yapıya sahiptir (Şekil 1.9). Kristalleri birçok farklı şekilde bulunabilmekte ancak çoğunlukla düz bir şekilde uzamaktadır. Ardından lifli pamuk topu benzeri kütleler oluşturmaktadır. Kompakt halde, paralel lifli damarlar ve kompakt nodüler gruplar içermektedir. Üleksit suda oldukça çözünmektedir. Doğal olarak

renksizdir, ancak agregalarda beyazdır ve kil ile karıştırıldığında gri renktedir (Karadağılı, 2019).

Üleksit, endüstride yaygın olarak kullanılan bir bor mineralidir. Isı direncini artırma ve aşınmaya karşı direnç gibi özellikleri sayesinde bor camı üretiminde ve seramik endüstrisinde kullanılmaktadır. Üleksit ayrıca sertliği artırma özelliğine de sahiptir. Bu nedenle, fren balatalarının formülasyonunda üleksit bulunmaktadır (Sugozu ve ark., 2018).



Şekil 1.9. Üleksit (Web ileti 5)

Probertit ($\text{NaCaB}_3\text{O}_9 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$)

Şekil 1.10’da verilen Probertitin kristal yapısı monoklinikdir. Kırılgan bir mineraldir ve sertliği 3,5’tir. Şeffaf ila yarı saydamdır. Doğada renksiz, beyaz, gri veya soluk sarı renklerde bulunabilmektedir. Türkiye-Kestelek mineral yataklarında ikincil mineral olarak oluşmaktadır (Anthony ve ark., 2005).



Şekil 1.10. Probertit (Web ileti 6)

Kolemanit ($\text{Ca}_2\text{B}_6\text{O}_{11} \cdot 5\text{H}_2\text{O}$)

Kolemanit en yaygın borattır. Kolemanitin kristal yapısı monokliniktir. Optik özellikleri şeffaftan yarı saydama kadar değişmektedir. Çoğunlukla süt beyazı ve soluk sarı renktedir. Çok düşük sıcaklıklarda kolemanit piroelektrik ve piezoelektrik özellikler göstermektedir. Türkiye'de yaklaşık bir milyar tonluk geniş yataklar bulunmaktadır. Örneğin, Balıkesir İli, Bigadiç borat bölgesinde iri kristaller; Eskişehir İli, Kestelek boraks yatağında; Kütahya İli, Emet borat yataklarında iri kristaller; Mustafakemalpaşa yataklarında. Ayrıca ABD, Kaliforniya'da da yataklar bulunmaktadır (Karadağlı, 2019)

Kolemanit mineralinin Mohs sertliği yaklaşık 4-4,5 ve özgül ağırlığı 2,52'dir. Kolemanit asitte kolayca çözünürken suda çözünmez. Örneğin, kolemanitin suda çözünürlüğü 25°C'de 0,81 g/l'dir ki bu çok küçük bir değerdir. Ayrıca, kolemanit 400°C'nin üzerine ısıtıldığında çatlayarak toz haline gelir (Özkan ve ark., 1997). Kolemanitin çözünme hızı, sıcaklık arttıkça ve parçacık boyutu azaldıkça artar (Alkan ve Doğan, 2004). B_2O_3 içeriği %27-32 arasındadır (Alpaydın, 2019).

Kolemanit genellikle borik asit üretiminde kullanılsa da boraks, boraks hidratları ve sodyum perborat üretiminde de kullanılır (Frost ve ark., 2016). Cam ve seramik sektörü gibi birçok sektörde kullanılır. Malzemelerin dayanıklılığını maksimum seviyeye çıkarır. Ayrıca metalurji, fiberglas, gübre, deterjan ve kozmetik sektörlerinde sıklıkla tercih edilir (Etimaden, 2019). Çimento üretiminde %8 kolemanit kullanıldığında klinker pişirme sıcaklığını düşürür ve çimentonun özelliklerini iyileştirir. Bor katkılı çimentonun mukavemet, su ve gaz geçirgenliği, hidratasyon sıcaklığı gibi özellikleri Portland

çimentosundan daha iyidir. Çimento üretiminde kolemanit ilavesi, karbondioksit emisyonlarını %25-30 oranında azaltır. Ayrıca, kolemanit nükleer atıkların depolanmasında çevresel etkiyi azaltmak için kullanılmaktadır (Yiğitbaşoğlu, 2004). Türkiye'de, özellikle Emet, Bigadiç, Kestelek yataklarında ve ABD'de bulunmaktadır. Kolemanit mineralinin fotoğrafı Şekil 1.11'de görülebilmektedir.



Şekil 1.11. Kolemanit (Web ileti 7)

Pandermit ($\text{CaB}_{10}\text{O}_{19} \cdot 7\text{H}_2\text{O}$)

Pandermit (Şekil 1.12) için kullanılan diğer isim prosittir. Monoklinik kristal yapıya sahiptir. Yarı saydam bir mineraldir. Doğada beyaz renkte veya geçirgen ışıktaki renksiz olarak bulunabilir. Türkiye'de yataklar Sultançayır, Bursa ve Bigadiç borat bölgesinde bulunmaktadır (Karadağlı, 2019).



Şekil 1.12. Pandermit (Web ileti 8)

❖ Borun Kullanım Alanları

Cam üretiminde kullanımı;

Boratların ana kullanım alanı cam endüstrisidir. Dünyadaki bor kullanımının neredeyse yarısı cam endüstrisinde (Alpaydın, 2019). Bor oksit, borasilikat camların, tekstil cam emayelerinin ve yalıtım cam emayelerinin temel bir bileşimidir. Bu üç iyi bilinen ürün, cam endüstrisinde bor bileşiklerinin ana tüketimini oluşturmaktadır. Bor, nadiren de olsa cam levha ve kapların içeriğinde bulunabilir. B_2O_3 , cam bileşimine susuz boraks veya borik asit olarak eklenebilmektedir. B_2O_3 , camın devitrifikasyonu (kristalleşmesi) anlamına gelen güçlü bir cam oluşturunucudur. Genleşme hızını azaltmakta ve termal şoklara karşı direnç sağlamaktadır (Sugozu ve ark., 2016; Roskill, 1999). Bor, camları asitlere ve çizilmeye karşı korumaktadır. Genellikle boraks, kolemanit, borik asit karıştırılarak cama ilave olarak kullanılmaktadır (Karadağlı, 2019).

Seramik üretiminde kullanımı;

Bor, seramik endüstrisinde, aşındırıcı ve refrakter olarak kullanılmaktadır (Schmidt-München, 2007). Seramik sır üretiminde bor oksit, boraks, kolemanit ve diğer sodyum borları kullanılmaktadır. Bu bileşenler seramik sır üretiminde kütlece %8-24 arasında bir oranda bulunmaktadır.

Borun sırlardaki etkili rolü, cam ve malzeme arasında ısı uyum sağlamaktır. Bir diğer rolü ise erime sürecinin ilk adımlarında cam oluşumunu sağlamaktır. Ayrıca sırlara bor eklenmesi mekanik mukavemeti ve çizilme direncini artırmaktadır (Karadağlı, 2019).

Fritler ve Emayelerde kullanımı;

Boratların sırlarda kullanımı suda çözünürlüğe bağlıdır. Boraks, borik asit ve boraks pentahidrat suda yüksek oranda çözünmektedir. Çözünen borat minerallerinin sır olarak kullanılabilmesi için fritlenmesi gerekmektedir. Özellikle yer ve duvar karolarında frit yaygın olarak kullanılmaktadır.

Emayeler metalleri kaplamak için kullanılmaktadır. Emaye fritleri boraks, silika ve soda kullanılarak elde edilmektedir. Günümüzde kullanılan fritler %25 bor oksit içerebilmektedir (Roskill, 1999).

Hijyen ve Beyazlatma Endüstrisinde Kullanımı;

Yüzey aktif maddeler (sülfonat), suyun yüzey gerilimini azaltarak kumaşı ıslatmakta ve yağların ve diğer lekelerin çıkarılmasını desteklemektedir. Deterjan oluşturunucular (zeolit), sert sularda kullanıldıklarında kalsiyum ve magnezyum iyonlarını sudan uzaklaştırmaktadır.

Ağartıcı sodyum perborat, hidrojen peroksit ve boraksın reaksiyona girmesiyle elde edilen beyaz, katı ve kararlı bir bor bileşiğidir. Sodyum perborat %10,5 aktif oksijen içermektedir. Tetrahidratın dehidrasyonu ile üretilirse %15,5 aktif oksijen içerir (Karadağlı, 2019).

Tarımda Kullanımı;

Bor, verimi artırdığı için tarımda gübre olarak kullanılmaktadır. Sadece 1,5 kilogram bor bazlı gübre, hektar başına domates ekiminde %18 daha fazla verim sağlayabilmektedir. Bor gübresi, hem şeker pancarı hem de fındık için ortalama %17 daha fazla verim sağlamaktadır. Bor oksit, mikro besin ve bitki öldürücü olması için düşük ve yüksek konsantrasyonlarda uygulanmaktadır. Bor, bakır, manganez, demir, molibden, çinko ve kobalt, mikro besin olarak üst pansumanlara eklenmektedir. Bor eksikliği, kısa gövde, şekilsiz yapraklar ve bitkilerde kırılmalığa neden olmaktadır. Bitkiler için az miktarda bor gerekli olsa da, yüksek miktarda kullanımı zehirli hale gelmektedir. Bu nedenle borat, toksisitesi nedeniyle bitki öldürücü olarak kullanılabilir. Bu nedenle, yabancı otları öldürmek için kullanılmaktadır (Roskill, 1999). Ayrıca, tarımda, katalizör olarak ısıya dayanıklı polimerlerin üretiminde kullanılmaktadır (Schmidt-München, 2007).

Tekstil Fiberglas Üretiminde Kullanımı;

Tekstil fiberglasının en önemli özellikleri çekme dayanımı, tokluk, kimyasal direnç ve hafifliktir. Bu özelliklerinden dolayı tekstil fiberglasları, plastik fiberglas ve kompozitlerin mukavemetini sağlamak için kullanılmaktadır. Kolemanit alkali içermediğinden düşük alkali borosilikat (E-cam) üretiminde kullanılması tercih edilmektedir. Bor, tekstil fiberglasına kolemanit minerali veya borik asit olarak eklenmektedir. Modern E-cam %6-10 B₂O₃ içermektedir. Bor oksit cama stabilite kazandırmaktadır. E-cam tekne, uçak ve otomobil endüstrilerinde kullanılmaktadır (Karadağlı, 2019).

İnşaat-Çimento Endüstrisinde Kullanımı;

Bor, yapıların mukavemetini artırmak, yalıtımını sağlamak (depreme karşı daha sert, daha hafif ve dayanıklı yapılar) için kullanılmaktadır. Genleştirilmiş perlit, ses ve ısı yalıtımı sağlamak amacıyla duvar ve zeminlerde kullanılabilir. Bor kullanımı çimentoya mukavemet kazandırmaktadır. Bor karışımli çimentolar özellikle beton yollar ve baraj inşaatlarında kullanılmaktadır (Sarıhan, 2006).

Fiberglas Yalıtımında Kullanımı;

Fiberglas, malzemelere sertlik ve dayanıklılık kazandırmaktadır. Oldukça ucuz ve hafif bir malzeme olan fiberglas iyi bir çekme mukavemetine ve kimyasal etkilere karşı dirence sahiptir. Bu özellikleri nedeniyle plastik, kauçuk ve kağıt sektörlerinde yer almaktadır. Sklerotik plastikler, otomotiv, havacılık endüstrilerinde çelik ve diğer metallerde kullanılmaktadır.

Yalıtım türü fiberglasların üretimi, lifli ve yünlü ürünler üretmek için camın yüzey alanının genişletilmesi işlemini içermektedir. Camlarda kullanılan hammaddeler, yalıtım türü camlarda kullanılan malzemelere benzerdir (Karadağlı, 2019).

Nükleer Uygulamalarda Kullanımı;

Atom reaktörlerinde bor çelikleri, bor karbürleri ve titanyum-bor alaşımları kullanılmaktadır. Paslanmaz bor çeliği, diğerlerine kıyasla nötron emici olarak kullanılmaktadır. Yaklaşık olarak, her bor atomu bir nötron atomu emebilmektedir. Bor, reaktör kontrol sistemlerinde, soğutma havuzlarında ve alarm sistemiyle reaktörlerin kapatılmasında rol oynamaktadır. Ayrıca, kolemanit nükleer atıkların depolanmasında kullanılmaktadır (Kıpçak, 2009).

Yanmayı Önleyici Maddelerde Kullanımı;

Borik asit ve borat, selüloz maddelerine yangına dayanıklılık sağlamaktadır. Yanma sıcaklığından önce selülozdan hidrik oksit uzaklaştırmakta ve oluşan kömürlerin yüzeylerini kaplayarak daha ileri yanmayı önlemektedir. Bor bileşenlerinin kullanımı, yanmayı önleyici özellikleri nedeniyle önemli ölçüde artmaktadır. Yanmayı önleyen başlıca bor bileşikleri çinko borat, baryum metaborat ve amonyum floroborattır (Sarıhan, 2006).

Metalurji Endüstrisinde Kullanımı;

Boratlar, kararlılıkları, yapışkanlıkları, koruyuculukları ve yüksek sıcaklıklarda çapaksız cüruf oluşturma kabiliyetleri nedeniyle demir dışı alaşım endüstrisinde kullanılmaktadır. Boratlar, elektrolit kaplama endüstrisinde önemli malzemelerdir. Borik asit nikel kaplamada, floroboratlar ve floroborik asitler ise demir dışı alaşımlar için elektrolit olarak, çeliklerde ise sertlik artırıcı olarak kullanılmaktadır. Ayrıca sürtünme-aşınma dirençli malzemelerde, kaynak elektrotlarında, refrakterlerde, briket malzemelerinde, lehimlemede, döküm malzemelerinde ve kompozit malzemelerde özellik artırıcı olarak kullanılmaktadır (Künkül ve ark., 1997).

Otomobil Hava Yastıkları ve Antifriz Üretiminde Kullanımı;

Boron, çarpışma anında hava yastıklarını mümkün olan en kısa sürede şişirmek için kullanılmaktadır. Elementel bor ve potasyum nitrat toz karışımı elektronik sensör aracılığıyla aktive edilmektedir. Hem sistemi hem de hava yastıklarını aktive etmek için sadece 40 milisaniye gerekmektedir. Bor ayrıca otomobillerde ve hidrolik sistemlerinde antifriz maddesi olarak da kullanılmaktadır (Karadağlı, 2019).

Sağlık Sektöründe Kullanımı;

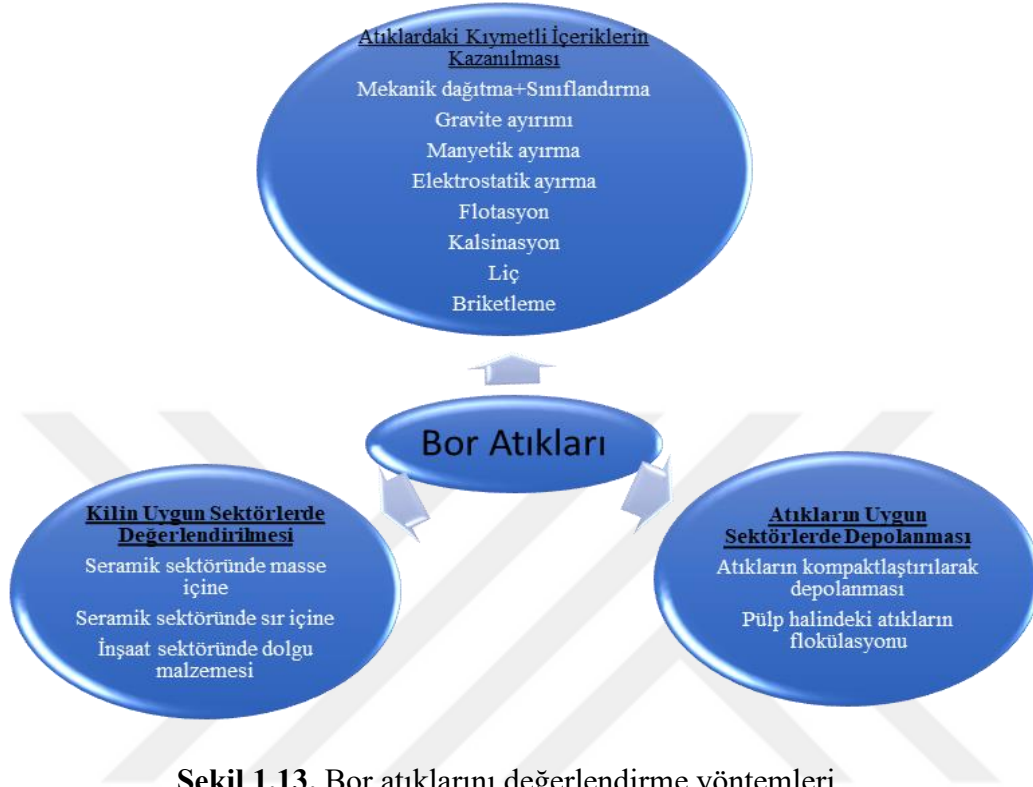
BNCT (Bor Nötron Yakalama Terapisi), kanser tedavisinde kullanılmaktadır. Özellikle beyin kanserinde, zararlı hücreleri seçip yok etmede hayati bir rol oynaması ve sağlıklı hücrelere zarar vermemesi nedeniyle tercih edilmektedir. Bor ürünleri akciğer ve prostat kanserleri gibi diğer kanser türlerinin tedavisinde de kullanılmaktadır. Ayrıca, metabolizmadaki bor, kalsiyum, magnezyum ve fosfor miktarlarını dengelemektedir. Sağlıklı kemik, kas ve beyin fonksiyonlarının gelişimine yardımcı olmaktadır (Sarıhan, 2006). Bunun yanı sıra multipl miyelom, kafa içi tümörleri, osteoporoz, alerjiler, psikiyatrik bozukluklar, artrit, menopoz ve bulaşıcı hastalıklar gibi hastalıkların teşhis ve tedavisinde de kullanılmaktadır (Al-Akashi, 2024).

Elektronik, Bilgisayar ve İleri Teknoloji Alanında Kullanımı;

Bor ve türevlerinden elde edilen fiberoptik camlar, ışık fotonlarını etkili bir şekilde iletmektedir. Fiberoptik kablolar, özellikle telefonlar ve bilgisayarlar için geniş uygulama alanına sahip ileri bir teknolojidir. Son yıllarda, yüksek hızlı veri iletimi sağlayan yeni fiberoptik kablolar geliştirilmiştir. Borik asit, LCD ekran üretimi için son derece önemlidir. Türk kolemaniti, mevcut plaka teknolojisi üretimlerinin hammaddesidir. Bu teknoloji ürünleri, dizüstü bilgisayarlar, bilgisayarlar ve cep telefonları gibi mobil iletişim cihazlarında kullanılmaktadır. Ayrıca, bilgi teknolojilerinde de bor, kapasitör üretmek için kullanılmaktadır (Karadağlı, 2019).

Eti Bor A.Ş. bünyesinde bulunan Kırka Bor İşleme tesisinde tinkal cevheri üretilmekte ve tesislerde yılda 1.150.000 ton tüvenan cevher işlenerek konsantre ve bor türevleri üretilmektedir. Konsantratör tesisinden yılda 3.000.000 ton pülüp ve bor türevleri tesislerinden yılda yaklaşık 900.000 ton şlam açığa çıkmaktadır. Bu atıklar, işletme sınırları içerisinde bulunan 6 bölümlü gölete aktarılmaktadır. Göletin tüm bölümlerinin hacmi 13.200.000 m³'tür. Bu göletlerin 12.400.000 m³'lük kısmı tesis artıklarıyla dolmuştur. Normal üretim şartları içerisinde göletlerin 4-5 yılda dolacağı ön görülmektedir (Aksu, 2003). Bu duruma kalıcı bir çözüm aranmaktadır.

Bor atıkları üç farklı şekilde değerlendirilmektedir. Bu değerlendirme yöntemleri Şekil 1.13’de verilmiştir (Sarıağaç, 2012).



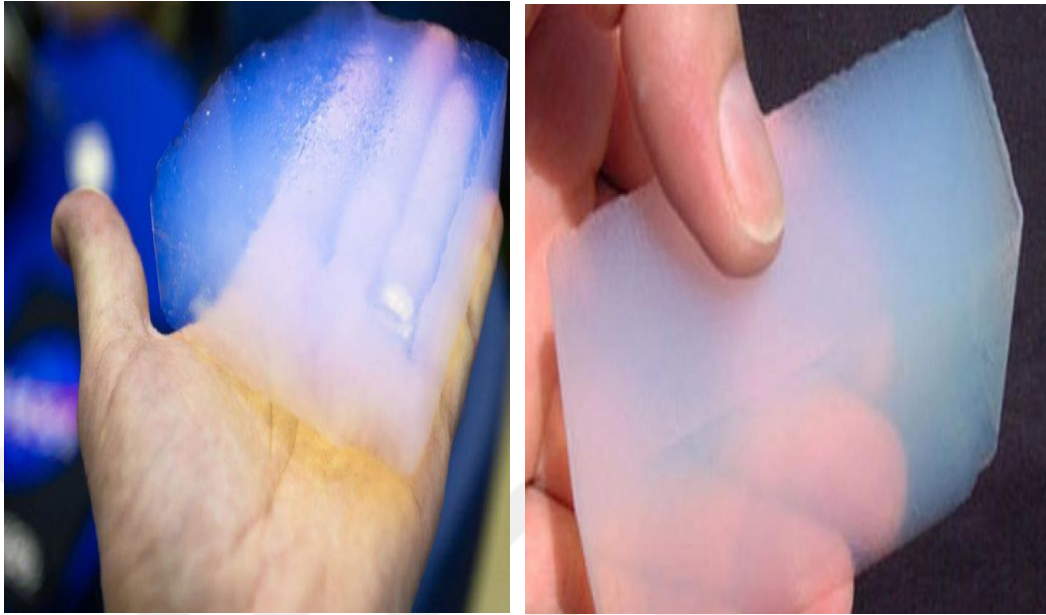
Şekil 1.13. Bor atıklarının değerlendirme yöntemleri

Bor işlenmesi sonucu açığa çıkan atıklar ince daneli katı ya da püre formundadır. Geçmiş yıllarda bu tarzda meydana gelen atıklar maden yatakları civarındaki alanlara, atık göletlerin, göllere ya da denizlere bırakılmaktaydı. Çevreyi koruma bilincinin oluşturulması ile zenginleştirme işlemi tamamlandıktan sonra elde edilen atıklardan yararlanma veya atık zararlarını minimize etmenin yolları bulunmaya çalışılmıştır. Yapılan literatür araştırmasında bor atıklarının genellikle inşaat, cam ve seramik sektörlerinde hammadde olarak kullanımının arttığı görülmüştür. (Özorak, 2014).

1.3. Aerojel

Aerojeller, katı polimerik zincirler arasında çok sayıda hava dolu gözenek bulunan çapraz bağlı polimerlerden oluşan, iç katı bir yapıya sahip nanoyapılı malzemelerdir. Aerojel ağı, kolay erişilebilir ve dallanmış mezogözeneklerle karakterize edilmektedir. Şekil 1.14’de verilen aerojeller, son derece yüksek gözeneklilikleri ve yüksek özgül yüzey alanları, mezogözenek aralığında değişen gözenek boyutları, elektriksel iletkenlikleri (karbon aerojelleri) ve hem monolit hem de boncuk olarak

sentezlenebilme olanakları nedeniyle benzersizdir (Pone ve ark., 2006; Pieber ve ark., 2018).



Şekil 1.14. Aerojel

Aerogeller, yüksek gözenekliliğe ve geniş yüzey alanlarına yol açan ince, açık gözenekli bir yapıya sahip, düşük yoğunluklu mikro gözenekli katılardır. Bu özellikler onları birçok uygulamada benzersiz kılmakta ve bazıları halihazırda ticarileştirilmiş olan birçok uygulamada kullanılmaktadır (Smirnova ve Gurikov, 2017)

Jelin sıvı bileşeninin gazla değiştirildiği bir jelden türetilen ve sentetik gözenekli bir malzeme olan aerogel, büyüleyici özellikleri nedeniyle son yıllarda bilim insanlarının ilgisini çekmektedirler. Aerogellerin yapısı, kolay erişilebilir ve dallanmış mezogözeneklerle karakterize edilmektedir (Bozbağ, 2012). Aerogeller, son derece yüksek gözeneklilikleri (düşük yoğunlukları) ve yüksek özgül yüzey alanları, mezogözenekli düzende değişen gözenek boyutları, elektriksel iletkenlikleri (karbon aerogelleri) ve monolit olarak sentezlenme olanakları nedeniyle benzersizdir (Aegerter ve ark., 2011). Dahası, tüm bu özellikler, hazırlama koşulları değiştirilerek ayarlanabilmektedir.

Aerogeller, 1932 yılında Samuel Stephens Kistler tarafından keşfedilmiştir (Akgöl, 2023). Steven Kistler aerogeli, jel-katı ağ yapısını bozmadan sıvının gazla değiştirildiği jeller olarak tanımlamıştır (Kistler, 2002). Kistler ilk çalışmalarında, içyapıları farklılık gösteren bir dizi aerogel sentezlemiştir. Ayrıca, organik selüloz aerogelleri, nitroselüloz, jelatin, agar veya albümin, tungstik, ferrik, kalay oksit ve nikel

tartarat içeren yumurta jelleri ve metal matrisli aerogeller sentezlemiştir. Diğer jellere kıyasla nispeten kolay işlenebilen silika aerogellerin yanı sıra, mekanik olarak çok zayıf olduğu kanıtlanan alümina aerogelleri de üretmeyi başarmıştır. Islak jeller daha önce buharlaştırma yoluyla kurutulurken, Kistler, jelleri emdiği sıvının süperkritik bir akışkana dönüştürüldükten sonra boşaltıldığı yeni bir süperkritik kurutma tekniği uygulamıştır (Ahmad ve ark., 2023; Akgöl, 2023).

Çok yönlü nano gözenekli malzeme olan aerogel, sol-jel kimyası kullanılarak çok çeşitli moleküler öncüllerden sentezlenebilmekte ve ardından kurutma yoluyla jel ağından çözücü uzaklaştırılabilmektedir (Ülker ve Erkey, 2014). Sol-jel işleminin alışılmadık esnekliği, aerogel özellikleri üzerinde olağanüstü bir kontrol sağlamaktadır. Yüzey özellikleri, gözeneklilikleri, kalınlıkları ve kırılma indisleri, hazırlama yöntemi ve reaktan çözeltisinin bileşimi değiştirilerek istenen değerlere göre ayarlanabilmektedir (Zuo ve ark., 2015; Zhang ve ark., 2015).

Köpük benzeri yapıları ve görünüşleri nedeniyle donmuş duman olarak tanımlanan aerogeller, inci kolyeye benzeyen bir ağdan oluşan son derece gözenekli bir yapıya sahiptir. Aerogeller çok hafif ve düşük yoğunluklu olmalarına rağmen, yüksek basınç taşıyabilmektedir. (Ahmad ve ark., 2023). Bu düşük yoğunluklu malzemeler şeffaf, çok düşük ısı iletkenliğine sahip ancak çok kırılgan ve nemi emerek bozulmaya neden olmaktadır (Pierre, 2011; Ülker, 2011).

Aerogel ve türev malzemeleri, literatürdeki en hafif katı malzeme olarak bilinmektedir. Aerogellerin bazı yaygın özellikleri Tablo 1.6'da gösterilmektedir. Geleneksel silika tipi aerogellerin yoğunluğu yaklaşık $0,003 \text{ g/cm}^3$ 'tür (Begum ve ark., 2021). Bu kadar düşük bir yoğunluğa sahip olmasının nedeni, hacminin %99,98'inin havadan oluşmasıdır (Çelik, 2020). Aerogellerin yığın yoğunluğu $3-400 \text{ kg/m}^3$ aralığındadır. Aerogellerin gözenek yapısı, yaklaşık 10 nm çapındaki küçük (polimer veya koloidal) birincil parçacıkların kontrollü yoğunlaşmasıyla oluşmaktadır (Aegerter, 2011; Bozbağ, 2012). Klasik aerogellerin sınırlı uygulama alanının en önemli nedeni, yapılarındaki silika grupları nedeniyle kırılgan olmaları ve herhangi bir yük taşıyamamalarıdır. Çapraz bağlanma mekanizması sayesinde kırılgan aerogel, esnek bir yapı kazanmakta ve yük taşıyabilir hale gelmektedir (Çelik, 2020).

Tablo 1.6. Aerojellerin özellikleri

Özellikler	Değer
Yoğunluk (g/cm ³)	0,003
Porozite (%)	80-99,8
Yüzey Alanı (m ² /g)	500-1200
Ortalama gözenek çapı (nm)	20-150
Termal İletkenlik (W/mK)	0,017-0,021
Termal Direnç (°C)	500
Dielektrik Sabiti	1,0-2,0
Young's Modülü (MPa)	0,002-100
Poisson's oranı	0,2
Kırılma İndisi	1,05
Optik özellikleri (%)	>90
Ses Hızı (m/s)	100

Aerojeller genel olarak üç kategoriye ayrılmaktadır. Bunlar;

- ✓ **İnorganik aerojeller;** öncül olarak metal alkoksitler kullanılarak sentezlenirler. Silika (SiO₂), alümina (Al₂O₃), titanya (TiO₂) veya zirkonya (ZrO₂) gibi çeşitli aerojelleri içermektedirler (Du ve ark., 2013; Dorcheh ve Abbasi, 2008). Silika aerojeller (katı ağları boyunca kıvrımlı yollara sahip düzensiz bir moleküler yapıya sahip amorf malzemeler) genellikle 5 ila 100 nm arasında değişen gözeneklere, 20 ila 40 nm arasında ortalama gözenek çapına (Hu ve ark., 2019), %99,8'e varan gözenekliliğe sahiptirler. Bunun yanında, 0,003 g/cm³ ila 0,5 g/cm³ arasında değişen kütle yoğunluklarına sahiptirler. Bu durum 1,003-1,1 aralığında son derece düşük bir kırılma indisine neden olmaktadır (Tabata ve ark., 2012).
- ✓ **Organik aerojeller;** karbon, lifli selüloz aerojelleri, selülozik aerojeller ve poliüretan aerojelleridir (Hu ve ark., 2019). Resorsinol-formaldehit ve melamin-formaldehit aerojelleri, en sık incelenen organik aerojellerdir (Pekala, 1989; Al-Muhtaseb ve Ritter, 2003). Yaklaşık 10 nm çapında, birbirine bağlı kolloidal parçacıklardan veya polimerik zincirlerden oluşmaktadırlar. Küçük çaplı (≤ 50 nm) gözeneklere ve yüksek özgül yüzey alanlarına (400-1000 m²/g) sahiptirler (Chen ve ark., 2011). Organik aerojellerin pirolizi ile elde edilen karbon aerojelleri, yüksek elektrik iletkenlikleri nedeniyle özellikle enerjiyle ilgili uygulamalarda kullanılmaktadır (Özbakır, 2018).
- ✓ **Hibrit aerojeller;** silika aerogel gibi inorganik bir aerogel matrisine poliakrilat, poliimid veya poliüre gibi organik polimerlerin dahil edilmesiyle sentezlenmektedir. Hibrit aerojeller, yüksek gözeneklilik ve yüksek yüzey alanını korurken, saf organik aerogellere veya saf inorganik aerogellere kıyasla gelişmiş

mekanik özellikler göstermektedir (Mekonnen ve ark., 2016; Yang ve ark., 2014; Yim ve ark., 2002).

Aerogeller "Donmuş Duman" olarak da adlandırılmakta ve son zamanlarda birçok amaçla kullanılmaktadır. Aerogel, yüksek özgül yüzey alanı, yüksek gözeneklilik, düşük yoğunluk, düşük dielektrik sabiti ve mükemmel ısı yalıtım özelliklerine sahip nano gözenekli bir malzemedir. Aerogelin kullanım alanları aşağıda sıralanmıştır.

- ✓ Son derece yüksek gözeneklilikleri ve düşük ısı iletkenliği sayesinde çok iyi ısı yalıtımı sağladıkları için yalıtım uygulamalarında,
- ✓ Havacılık ve uzay uygulamalarında,
- ✓ Gözenekli yapıları nedeniyle katalizörler, adsorbanlar, sensörler, yakıt depolama uygulamalarında (Ülker, 2011),
- ✓ Dizelden organokükürt bileşiklerinin uzaklaştırılması için adsorban olarak (Bozbağ, 2012),
- ✓ Sulu çözeltilerden iyonların elektrosorpsiyonu için filtre ortamında (Yang ve ark., 2001),
- ✓ Adsorpsiyon yoluyla zararlı emisyonların kontrolünde (Bozbağ ve ark., 2011),
- ✓ Uygun elektriksel özellikleri nedeniyle entegre devreler (IC) için dielektrik, vakum elektrotları veya kapasitörler için ara parçalar olarak (Ülker, 2011),
- ✓ Şeffaf olmaları nedeniyle optik uygulamalarda ve dedektörlerde,
- ✓ Isı yalıtım malzemesi üretiminde (Bozbağ, 2012),
- ✓ Akustik yalıtım malzemesi üretiminde,
- ✓ Biyomedikal uygulamalarda
- ✓ Petrokimya tesislerinde,
- ✓ İlaç uygulamalarında,
- ✓ Kimyasal sensörlerin üretiminde (Alan, 2022).
- ✓ Akustik cihaz geliştirmede (Özbakır, 2018),
- ✓ Mimari uygulamalarda (Rubin ve Lampert, 1983; Long ve Rolison, 2007),
- ✓ Enerji depolama uygulamalarında (Li ve ark., 2002),
- ✓ Geniş bantlı yansıtıcı olmayan malzemelerin üretiminde kullanılırlar (Merzbacher ve ark., 2001).

2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Bu bölümde tez çalışması ile ilgili olarak yapılan çalışmalar detaylı bir şekilde incelenmiş ve özet halinde sunulmuştur. Bu bölüm tuğla üretiminde perlit kullanımı ile ilgili yapılan çalışmalar, tuğla üretiminde aerogel kullanımı ile ilgili yapılan çalışmalar, tuğla üretiminde bor atığı kullanımı ile ilgili yapılan çalışmalar başlıklar halinde verilmiştir.

2.1. Tuğla Üretiminde Perlit Kullanımı İle İlgili Çalışmalar

Çelik (2015), çalışmasında genleştirilmiş perlit agregasının tuğla üretiminde ana hammadde olarak kullanılabilirliğini araştırmıştır. Perlit tuğla üretiminde katkı malzemesi olarak Na-Borat ve K-Borat kullanmıştır. Ürettiği kontrol tuğlasının (50x100x100 mm boyutlarında) birim hacim ağırlığı, mekanik dayanımı gibi mühendislik parametrelerini belirleyerek optimize etmiştir. Çalışma sonucunda, 50 bar basınçta, 400 °C sıcaklıkta, 1 saat pişirme süresinde ve 0,90 su/bağlayıcı oranında üretilen numuneler için birim hacim ağırlığının en düşük değeri 522 kg/m³ ve dayanımın en yüksek değeri 23 kg/cm² olduğunu tespit etmiştir. Ayrıca, mikro yapı incelemesinde perlit tuğla karışımlarına Na-Borat ve K-Borat ilavesiyle daha yoğun bir hacim gözlediğini ifade etmiştir.

Samart ve ark. (2015), çalışmalarında, kil tuğla üretimi için %0, 2.0, 2.5, 3.0, 3.5 ve 4.0 oranlarında pirinç kabuğu külü ve perlit'in kil ile optimum karıştırma oranını araştırmışlardır. Çalışma sonucunda, Roiet kiline eklenen %3.5 Perlit'in 15.65 MPa'da maksimum basınç testini sağladığını, Mukdahan kilinde %3,0 Perlit eklendiğinde maksimum su emiliminin %12,07 olduğunu tespit etmişlerdir.

Arıcı ve ark. (2016), çalışmalarında, boşlukları perlit ile doldurarak içi boş tuğlaların ısı yalıtım performansını artırma olasılığını araştırmışlardır. Farklı içi boş tuğlalarda iletim, taşınım ve radyasyon yoluyla eşlenik ısı transferi, termal performanslarını sayısal olarak analiz etmişlerdir. Her içi boş tuğla türü için üç senaryo hesaplamaları yapmışlardır:

- (i) boşluklar hava ile doldurulmuştur,
- (ii) boşlukların yarısı perlit ile doldurulmuştur, diğer yarısı hava ile doldurulmuştur,
- (iii) tüm boşluklar perlit ile doldurulmuştur.

Çalışma sonunda, boşlukları perlit ile doldurmanın faydası, araştırılan her içi boş tuğla türü için niceliksel olarak doğrulanmıştır. Yalıtım performansındaki artışın, tuğla türüne

bağlı olarak sırasıyla yarı perlit ve tam perlit durumları için %15,6'ya ve %27,5'e kadar çıkabileceği sonucuna varmışlardır.

Maaloufa ve ark. (2016), çalışmada kil ve genişletilmiş perlit kullanarak tuğla üretimi yapmışlardır. Çalışma sonucunda, genişletilmiş perlit ve kalsinasyon eklendiğinde termal iletkenliğin 0,51'den (sadece kil) 0,258'e (kil-%100 genişletilmiş perlit) (W/mK) düştüğünü tespit etmişlerdir. Ayrıca, kalsinasyonun ısı akışı difüzyon derinliğini 5 cm azalttığını ve ısı akışının difüzyonunu geciktirdiğini bildirmişlerdir.

Ahmadi ve ark. (2018). Yapmış oldukları çalışmada, genişletilmiş perlit (EP), doğal zeolit, öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu (GGBFS) ve kilden oluşan izolasyon tuğlaları üretmişlerdir. Kilin sırasıyla %15, %15 ve %50'ye kadar GGBFS, zeolit ve EP ile değiştirilmesinin tuğlaların özellikleri üzerindeki etkisi araştırmışlardır. Tuğlaların karışım oranı parametrelerini Taguchi yöntemi kullanarak analiz etmişlerdir. Tuğlaların yoğunluk, ağırlık kaybı, büzülme, görünür gözeneklilik, su emilimi, donma ve çözölmeye karşı direnç, basınç dayanımı, termal iletkenlik ve pişmiş tuğlaların mikro yapısal analizi gibi çeşitli özellikleri incelenmiş ve tuğlalar için standart gerekliliklerle karşılaştırmışlardır. Çalışma sonucunda, standart gereklilikleri karşılarken yukarıda belirtilen katkı maddelerini içeren tuğlaların normal tuğlalara kıyasla daha düşük termal iletkenliğe sahip olduğunu ve bu nedenle ısı yalıtım malzemesi olarak kullanılabileceğini tespit etmişlerdir.

Georgiev ve ark. (2018), makalelerinde, 900 °C'de 2 saat pişirilen kil tuğlaların fiziksel özellikleri ve ısı iletkenliği üzerinde %0, %3, %5 ve %8 oranında genişletilmiş vermikülit ve genişletilmiş perlit eklemenin etkisini araştırmışlardır. Genleştirilmiş vermikülit ve genişletilmiş perliti, çok düşük yoğunluğa ve iyi ısı yalıtım özelliklerine sahip oldukları için gözenek oluşturucu olarak kullanmışlardır. Çalışma sonucunda, katkılı tuğlaların saf tuğlalara kıyasla su emiliminde ve görünür gözeneklilik değerlerinde artış olduğunu ifade etmişlerdir. Genleştirilmiş vermikülit ve genişletilmiş perlit ile 900 °C'de pişirilen tuğlaların daha düşük ısı iletkenliğine sahip olduğunu bildirmişlerdir. %8 kütle miktarında genleştirilmiş vermikülit ve genleştirilmiş perlitin, kil tuğlaların ısı iletkenliğini iyileştirmek ve kabul edilebilir basınç dayanımını korumak için tuğla üretiminde gözenek oluşturucu madde olarak kullanılabileceğini tespit etmişlerdir.

Bullibabu ve Ali (2018), makalelerinde, kil bazlı yapı malzemelerinde ısı iletkenliğinin azaltılması üzerine bir araştırma yürütmüşlerdir. Tuğla üretimi için şeker endüstriyel atığından olan bagas ve perliti katkı maddesi olarak kullanmışlardır. Bagası, tuğladaki gözenekli yapıyı, perliti ise ısı yalıtım özelliklerini iyileştirdiği için

kullanmışlardır. Güneşte kuruttukları numuneleri, 800 °C'ye kadar 4,5 °C/m hızında laboratuvar indüksiyon fırınında pişirmişlerdir. Pişirilen numunelere, ısı iletkenliği, basınç dayanımı, SEM-EDS ve TGA deney ve analizleri uygulamışlardır. Çalışma sonucunda, kil karışımındaki bagas ve perlit miktarının artmasıyla kil tuğlanın ısı iletkenliğinin önemli ölçüde azaldığını ve basınç dayanımında küçük bir azalmanın olduğunu tespit etmişlerdir.

Hamza ve Kocserha (2020), yapmış olduğu çalışmada, pişmiş kil tuğlaların termal yalıtım performansını iyileştirme olasılığını araştırmışlardır. Çalışmamızda talaş ve genleştirilmiş perlit katkı maddesi olarak kullanmışlardır. %3,35-6,5 ağırlık arasında değişen miktarlarda talaş ve genleştirilmiş perlit, tava değirmeni ile test numunelerini hazırlamak için kil kütlelerine karıştırmışlardır. Numuneleri bir laboratuvar vakum ekstrüderi kullanılarak hazırlamış, ardından kurutmuş ve 880 °C'de sinterlemişlerdir. Pişirilen numunelere, pişirme büzülmesi, su emilimi, yığın yoğunluğu ve basınç dayanımı deneyleri uygulamışlardır. Ayrıca, numunelerin termal iletkenliğini tespit etmişlerdir. Çalışma sonucunda, iki katkı maddesinin de birlikte tuğla üretimine dahil edilmesinde herhangi bir sakınca olmadığını bildirmişlerdir.

Burgos (2020), yapmış olduğu çalışmada, perlit katkılı tuğla üretmiş ve kerpiç tuğlalar ile karşılaştırmıştır. Her iki tuğla örneklerine IRAM standartlarını (Arjantin Cumhuriyeti'nin resmi ulusal standartlar kuruluşu) baz alarak, basınç ve eğilme dayanımı, su emme, kılcal emilim ve ısı iletkenlik testleri uygulamıştır. Çalışma sonunda, ham perlit tuğlanın kerpiç tuğlalardan daha iyi fiziksel özelliklere sahip olduğu sonucuna varmıştır.

Çimen ve ark. (2020), yapmış oldukları çalışmada perlit (%5) ve bor atığı (%5, %10, %15 ve %20) katkılı tuğla üretmiş, numuneleri 900 °C'de fırınlamışlardır. Çalışma sonunda, perlit ve bor atıklarının tuğla üretiminde kullanılabileceği ve mühendislik özellikleri üzerinde olumlu etkiler yarattığı sonucuna varmışlardır.

Shah ve ark. (2020), yapmış oldukları makale çalışmalarında, kil-tuğla bünyesine %0, %1, %3 ve %5 perlit malzemesi kullanılmıştır. Çalışma sonunda referans numuneye göre yoğunluğu az, su emilimi yüksek tuğla numuneleri üretmişlerdir.

Ekin ve Toklu (2020), yapmış oldukları çalışmada, perlit katkılı üretilen tuğlaları incelemiş ve yalıtıma olan katkısını araştırmışlardır. Çalışma sonunda, perlit dolgulu yalıtım tuğlaları yalıtıma önemli ölçüde etkili olduğunu bildirmişlerdir.

Shubhananda Rao ve Chandar (2021), yapmış oldukları çalışmada, kum yerine %10 aralıklarla %30-60 oranında Demir Cevheri Talaşı, %5 aralıklarla %10-20 oranında

çimento ve %2 ve %5 oranında perlit kullanarak tuğla üretmişlerdir. Tuğlalara, basınç dayanımı, su emme ve ısı iletkenlik testleri uygulamışlardır. Çalışma sonunda, farklı kombinasyonlar arasında yapılan testlerden, IOTs: Kum: Çimento: Perlit, 50:25:20:5 kombinasyonlarının, Hint Standardı (IS) kodlarını karşılayarak daha iyi sonuçlar verdiğini ve bunun, hammaddelerin optimum dozajı olduğunu tespit etmişlerdir. Geleneksel tuğla (pişmiş tuğla) odası ile karşılaştırmak için, ısı iletkenliğinin etkinliğine erişmek amacıyla bu tuğlalar kullanılarak model odalar inşa etmişlerdir. Sonuç olarak;

- ✓ IOT-perlit tuğlalarla inşa edilen model odanın duvarlarının dışından içine aktarılan ısı, sıradan tuğlalara kıyasla en az 2°C daha az olduğunu,
- ✓ Daha düşük ısı iletkenliğinin enerji tasarrufuna yol açtığını,
- ✓ IOT-perlit tuğlalarla %8 enerji tasarrufu olduğunu,
- ✓ Maden atığı kullanılarak üretilen çevre dostu tuğlaların, daha düşük ısı iletkenliğine, iyi mukavemete ve yapıda hafifliğe sahip olduğunu tespit etmişlerdir.

Makrygiannis ve Tsetsekou (2022), çalışmalarında, ince taneli genişletilmiş perlit katkılu tuğla üretimi yapmışlardır. Tuğla numunelerini, ağırlıkça farklı oranda genişletilmiş perlit içeren üç farklı karışımdan üretmişlerdir. Tuğla numuneleri aynı koşullarda kurutulmuş ve pişirilmiştir. Numunelere, eğilme mukavemeti, yoğunluk ve termal yalıtım gibi deneyler uygulanmıştır. Çalışma sonunda, perlit ilavesinin ürünlerin yoğunluğunda %2,9'dan %7,1'e kadar ve termal iletkenlik katsayısında %5,4'ten %9,5'e kadar azalmalara yol açtığını tespit etmişlerdir. Eğilme mukavemetinin %18'den %28'e kadar azaldığını, ancak tüm durumlarda, kabul edilen minimum 100 kp/cm² değerinin oldukça üzerinde kaldığını bildirmişlerdir.

Sutcu ve ark. (2023), çalışmalarında, genişletilmiş perlit (EP) ve geri dönüşümlü kağıt çamuru (RPS) atığı gibi farklı katkı malzemeleri kullanarak tuğla numuneleri üretmişlerdir. Deneysel çalışmada, iki katkı oranı ve pişirme sıcaklıklarının Box-Behnken deneysel tasarım prosedürü ile on yedi karışım seti şeklinde hazırlamışlardır. Tuğla numunelerini ekstrüzyon yöntemi ile şekillendirmiş ve kurutulduktan sonra iki saat boyunca 850, 950 ve 1050 °C'de pişirmişlerdir. Tuğla numunelerinin yığın yoğunluğu, görünen gözeneklilik ve su emilimi gibi fiziksel özellikleri ile basınç dayanımı, ısı iletkenlik ve mikro yapısal özelliklerini incelemişlerdir. Sonuç olarak, kabul edilebilir mekanik özelliklere karşılık gelen ısı iletkenlik açısından en iyi tuğla bileşiminin (%10 EP + %10 RPS ağırlıkça) olduğunu, buna göre tüm numunelerin basınç dayanımı değerleri 10 ila 27 MPa civarında olduğunu tespit etmişlerdir. Ayrıca yüksek katkı içerikli

numunelerin (özellikle %10 RPS + %5 EP numunesi) düşük pişirme sıcaklığı nedeniyle en düşük ısıl iletkenlik değeri 0,432 W/mK olduğunu bildirmişlerdir.

Birawidha ve ark. (2024), yapmış olduğu çalışmada, hafif tuğlalar için birincil malzeme olarak genişletilmiş perlit, dolgu maddesi olarak bazalt, yapıştırıcı olarak ise kaolin, beyaz çimento ve bentonit kullanmışlardır. Çalışma sonucunda;

- ✓ Hafif tuğla numunesinin, 1 ton basınçla beyaz çimento yapıştırıcısı kullanılarak en düşük yoğunluğu olan 1.353 g/cm³'ün elde edildiğini,
- ✓ Hafif tuğlanın bentonit yapıştırıcı ile optimum basınç dayanımı ve minimum emilimi sırasıyla 1 ve 2 ton basınçta 2,222 MPa ve %2,778 olduğunu,
- ✓ En yüksek gözenekliliğin %52,941 olup, 1 ton basınç altında beyaz çimento yapıştırıcısı kullanılan hafif tuğlalarda meydana geldiğini,
- ✓ Hafif tuğla karışımının SiO₂, Fe₂O₃, Al₂O₃ ve CaO konsantrasyonunun, hafif tuğlalar oluşturulduktan sonra olduğundan daha yüksek olma eğiliminde olduğunu,
- ✓ Anortit ve hematitin en baskın faz olduğunu ancak, anortit ve hematitin, hafif tuğla ürünleri haline geldikten sonra görünüm olarak azaldığını tespit etmişlerdir.

2.2. Tuğla Üretiminde Aerojel Kullanımı İle İlgili Çalışmalar

Wernery ve ark. (2017), yapmış olduğu çalışmada, termal iletkenliğini daha da azaltmak için ticari olarak temin edilebilen bir yalıtım tuğlasının perlit dolgusunu, aerojel bileşiğiyle değiştirerek tuğla üretimi yapmışlardır. Perlit ve aerojel dolgulu yalıtım tuğlalarının termal iletkenliğini hem korumalı bir sıcak plaka düzeneği hem de termal simülasyonlar kullanarak belirlemişlerdir. Çalışma sonucunda, termal iletkenliğin 91'den 59 mW/(mK)'ye düştüğünü, U değerinin 0,157 W/(m²K) olduğunu tespit etmişlerdir.

Ganobjack ve ark. (2017), yaptıkları çalışmada, silika aerojel içeren Nansulate Clear Coat'un bir tuğla cephe üzerindeki ultra ince bir yalıtım kaplamasının termo-fiziksel görünümünü incelemişlerdir. Aktif ve pasif termografi deneyleri uygulayarak, korunan tarihi bir binanın tuğla cephesinin küçük ölçekli örnekleri üzerinde uygulamanın etkilerini gözlemlemişlerdir. Tuğlaların termal yalıtım etkisi, renk ve parlaklıktaki değişim gibi estetik özellikler üzerindeki etkisi ölçülmüşlerdir. Çalışma sonucunda;

- ✓ Piyasada önerilen üç kat yalıtım boyasının termal yalıtım belirtisi göstermediğini,
- ✓ Üç kat yalıtım poyasının, tuğla cephenin görünümünü önemli ölçüde etkilemediğini,
- ✓ Renk ve parlaklığın önemli ölçüde değişmediğini.

- ✓ Termal yalıtım etkisine muhtemelen daha fazla uygulama katmanıyla ulaşılabileceğini,
- ✓ Tarihi mimari yapıların kendine özgü malzeme yapısı ve piyasadaki yeni yalıtım boya malzemeleri nedeniyle, Anıtları Koruma Kurulu ile işbirliği yapılarak tarihi yapıların cephelerinde bağımsız laboratuvar testleri ve yerinde testler yapılmasını önermişlerdir.

Ganobjack ve ark. (2019), yapmış olduğu çalışmada, aerjel ile doldurulmuş yeni bir kil tuğlanın tasarımını yapmışlardır. Sertlik ve termal iletkenliğin değerlendirilmesi için belirli sınır koşullarıyla topoloji optimizasyonunun serbest biçimli tasarım yöntemini kullanmışlardır. Çalışma sonucunda, topoloji açısından optimize edilmiş bir tuğla tasarımı sunmuş ve termal yalıtımın önemli ölçüde iyileştirdiğini bildirmişlerdir.

Joo ve ark. (2021), çalışmalarında, termal yalıtımdaki potansiyel uygulamalar için tamamen ölçeklenebilir ve özelleştirilebilir modüler aerjel/akrilat tuğlaların üretimi için bir 3B baskı süreci sunmuştur. Çalışmada, iki bileşenli aerjel tuğlalar, aerjellerin düşük termal iletkenliğinden ve 3B yazdırılmış yük taşıyan polimer tuğlalardan üretmişlerdir. Çalışma sonucunda, temas ısıtması nedeniyle tuğla yüzeylerindeki geçici sıcaklık profilleri ve aerjel malzemeleriyle doldurulmuş tuğlaların eğilme ve basınç özellikleri tartışılmışlardır.

Buratti ve ark. (2022), yapmış oldukları çalışmada kil-aerjel tuğlalarda granüler aerjelin hem termal hem de akustik özellikleri üzerindeki etkisinin incelemişlerdir. %5 granüler aerjel içeren numuneleri test etmiş ve saf kil ile karşılaştırmışlardır. Çalışma sonucunda, %5 aerjel bulunan kil numunesinin termal iletkenliğinin 10°C'de 0,310 W/(mK)'den 0,212 W/(mK)'ye düştüğünü tespit etmişlerdir.

Ganobjack ve ark. (2023), yapmış oldukları çalışmada, silika aerjel granüllerine dayalı modüler, yarı saydam ve termal olarak yalıtımlı yapı bileşeni olan aerjel cam tuğla üretmiş ve karakterize etmişlerdir. Tuğlaların hem termal hem de mekanik özelliklerini test etmişlerdir. Çalışma sonucunda, cam tuğlanın ölçülen termal iletkenliğinin 53 mW/(mK) olduğunu ve basınç dayanımının neredeyse 45 MPa olduğunu bildirmişlerdir. Üretilen cam tuğlanın, literatürde yer alan veya piyasada bulunan en yüksek yalıtım performansına sahip yalıtım tuğlası olduğunu ifade etmişlerdir. Ayrıca üretilen cam tuğlanın, binaların içindeki gün ışığını artırmak için yeni mimari tasarım fırsatları sunacağını ortaya koymuşlardır.

Çağlar (2023), yapmış olduğu çalışmada, bor atığından üretilen silika aerjelin tuğlaların basınç dayanımına ve termal performansına etkisini araştırmıştır. Öncelikle,

bor atığı kullanarak silika aerjel üretmiş, ardından tuğla bünyesine ikame etmiştir. Hazırladığı tuğla hamurunu 900 °C ve 1000 °C'de pişirmiştir. Tuğlalara basınç dayanımı ve ısı iletim katsayısı tayini deneyleri uygulamıştır. Çalışma sonucunda, aerjel miktarının artması her iki sıcaklıkta basınç dayanımı ve termal iletkenlik katsayısı değerlerinin azaldığını bildirmiştir.

Çağlar (2024), yapmış olduğu çalışmada, harman tuğla bünyesine granül aerjel ikame etmiş, ürettiği numunelerin ısı iletim katsayısı, birim ağırlık ve basınç dayanımı değerlerini tespit etmiştir. Hazırladığı tuğla hamurunu 900 °C ve 1000 °C'de pişirmiştir. Aerjel ikamesi ile birim hacim ağırlığın ve ısı iletim katsayısının azaldığı sonucuna varmıştır.

Silvestru ve ark. (2024), yapmış olduğu makalede, aerjel dolgulu cam tuğlalardan oluşan duvarların yapısal davranışını araştırmışlardır. Çalışma sonunda, farklı sistemlerin avantajları ve sınırlamalarını vurgulamış ve yalıtım sağlayan aerjel dolgulu cam tuğlalara sahip yarı saydam duvarlar için iyileştirilmiş alternatif sistemler için önerilerde bulunmuşlardır.

Merli ve ark. (2024), makalelerinde, opak duvarlar için mükemmel termal ve akustik performans sağlayabilen bölme tuğlalarını incelemek için aerjel granüllerini kil ile karıştırmışlardır. Granül aerjellerin farklı ağırlık yüzdeleriyle (% 0, % 2, % 3, % 4, % 5) beş karışım hazırlamışlardır. Çalışma sonucunda;

- ✓ Katkı maddesi içeriğinin artmasıyla, numunelerin yoğunluğunun azaldığını,
- ✓ Termal iletkenlikte bir azalma gözlemlendiğini (saf kil için 0,31 W/mK ve % 5 aerjel ile 0,21 W/mK)
- ✓ Ses emilim performansında bir iyileşmeye yol açtığını,
- ✓ Karışımdaki granüllerin varlığının gözeneklilikte bir artışa neden olduğunu,
- ✓ Aerjelin varlığının eğilme ve basınç dayanımı açısından önemli değişikliklere neden olmadığını ifade etmişlerdir.

Aldakshe ve Apay (2024), yapmış oldukları çalışmada, tuğla bünyesine aerjel ikame edilerek yapılan iyileştirmeler ile ilgili yapılan akademik çalışmaları irdelemişlerdir. Yapılan incelemeler neticesinde, aerjelin tuğlanın bazı özelliklerini iyileştirirken bazı özelliklerini olumsuz yönde etkilediğini tespit etmişlerdir. Aerjelin tarihi yapıların restorasyon işlemlerinde rahatlıkla kullanılabileceğini ifade etmişlerdir.

Mazın (2024), yapmış olduğu tez çalışmasında, pirinç kabuğu külü ve silika aerjelin tuğla üzerindeki etkilerini incelemiştir. Tuğla bünyesine %0.5, %1.0 ve %1.5 oranında aerjel, %10, %20 ve %30 oranında pirinç kabuğu külü ikame etmiştir.

Ürettikleri tuğla numunelerinin fiziksel ve mekanik özelliklerini araştırmışlardır. Yapmış olduğu deneyler sonucunda; birim hacim ağırlık ve porozite değerlerinin arttığı, basınç dayanımının ise azaldığını bildirmiştir. Isı iletim katsayısı iyileştirilmiş tuğla numuneleri elde ettiklerini ifade etmişlerdir. Pirinç kabuğu külü ve aerogelin tuğla üretiminde kullanılabileceğini önermişlerdir.

2.3. Tuğla Üretiminde Bor Atığı Kullanımı İle İlgili Çalışmalar

Evcin ve ark. (2019), yapmış oldukları çalışmada, mermer ve bor atıklarının tuğla üretiminde alternatif hammadde olarak kullanılabilirliğini araştırmışlardır. Bor atığına %5, %10, %15 ve %20 oranında mermer atığı ilave etmiş, bağlayıcı olarak %10 oranında Afyon tuğla kili kullanmışlardır. Hazırladıkları tuğla hamurunu 850-1050 °C sıcaklıklarda 4 saat pişirmişlerdir. Çalışma sonucunda, 1050 °C'de 4 saat fırınlanmış %5 mermer atığı + %85 bor atığı + %10 kil içeren tuğla numunelerinin mekanik özelliklerinin standartlara uygun olduğunu tespit etmişlerdir.

Çağlar (2021), yapmış olduğu çalışmada, bor atığı (tinkal atığı) ve uçucu kül kullanılarak tuğla üretimi yapmıştır. Ürettiği tuğlanın bor atığını %10 oranında sabit tutmuş, uçucu kül oranını %10, %20 ve %30 olarak belirlemiştir. Ürettiği tuğla hamurunu 800, 900 ve 1000 °C'de pişirmişlerdir. Yapmış olduğu fiziksel ve mekanik deneyler sonucunda, bor atığının tuğla özelliklerini iyileştirdiğini ve optimum pişirme sıcaklığının 900 °C olduğunu ortaya koymuştur.

Kavas (2006), yapmış olduğu çalışmada konsantratör tesisinden çıkan kil ve ince bor atıklarının (CW ve FW) kırmızı çamur tuğlası (RM) üretiminde akışkanlaştırıcı olarak kullanılabilirliğini araştırmıştır. Ürettikleri tuğla hamurlarını 700, 800 ve 900 °C'de sinterlemişlerdir. Numunelerin kuru büzülme, eğilme ve basınç dayanımı, pişirme büzülmesi, su emilimi, dona dayanıklılık ve ısıl işlem görmüş gövdeler üzerinde zararlı magnezya ve kireç testleri uygulamıştır. Yapmış olduğu mineralojik ve mekanik testler sonucunda, bor atıklarının RM tuğlalarının üretiminde akışkanlaştırıcı madde olarak kullanılabilirliğinin mümkün olduğunu bildirmişlerdir. Ayrıca, RM'ye %15 ağırlık oranında CW ve FW eklenmesiyle elde edilen numunelerin en iyi mekanik özelliğe sahip olduklarını tespit etmişlerdir.

Uslu ve Arol (2004), yapmış oldukları çalışmada, kırmızı tuğla üretiminde boraks konsantratöründen gelen killi atıkların kullanılma olasılığını araştırmışlardır. Ağırlıkça %30'a kadar atık eklenmesinin tuğla kalitesini iyileştirdiği sonucuna varmışlardır.

Kiliçarslan ve ark. (2013), çalışmalarında, Kırka'da bulunan bor işleme tesislerinden alınan bor atıklarının kırmızı tuğla üretiminde kullanılma olasılığını incelemişlerdir. Farklı oranlarda bor atığı ikame ederek hazırladıkları tuğla hamurunu 800°C ve 900°C'de fırınlamışlardır. Ürettikleri tuğla numunelerinin fiziksel ve mekanik özelliklerini irdelemişlerdir. Çalışma sonucunda, bor atığının tuğla özelliklerini iyileştirdiğini ve en iyi bor karışım oranının %20 olduğunu tespit etmişlerdir.

Elbeyli ve ark. (2004), yapmış oldukları çalışmada, inşaat tuğlası üretiminde katkı olarak boraks atığının kullanılabilirliği incelemişlerdir. Tuğla bünyesine % 10, %20 ve %30 oranında bor atığı ikame etmiş ve tuğla hamurlarını, 970 °C, 1000 °C ve 1030°C'de pişirmişlerdir. Numunelere soğuk basma mukavemeti, porozite, su absorpsiyonu, hacim yoğunluğu ve kızdırma kaybı deneylerini uygulamışlardır. Çalışma sonucunda, atık oranının ve pişme sıcaklığının tuğla kalitesi üzerinde önemli derecede etkili olduğunu bildirmişlerdir. Bor atığı miktarının ve pişirme sıcaklığının artmasıyla basma mukavemetinin azaldığı görülmüştür. En kaliteli tuğlanın % 18 nem içeriği + % 10 boraks atığı ve 1000 °C'de pişirmeyle elde edileceği anlaşılmıştır.



3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. Materyal

Çalışma kapsamında üretilen katkılı hafif tuğla numunelerinin üretiminde, perlit, killi toprak, granüler aerojel, tinkal atığı ve karışım suyu kullanılmıştır. Bu materyallerin görselleri ve özellikleri başlıklar halinde sunulmuştur.

3.1.1. Perlit

Tez çalışmasında ana malzeme olarak kullanılan perlit Erzincan ili Mollaköy beldesinden çıkarılan ve Erzincan Merkez ilçesinde faaliyet gösteren PERSAN A.Ş firmasından alınmıştır. Erzincan/Mollaköy bölgesi Perlitin özellikleri Tablo 3.1’de görseli ise Şekil 3.1’de verilmiştir.

Tablo 3.1. Perlitinin özellikleri (Topçu ve Işıkdag, 2008; Kopar ve Polat, 2020)

Fiziksel Özellik	
Renk	Beyaz ve grinin tonları
Yumuşama Noktası	870 - 1100 °C
Erime Noktası	1260 - 1343 °C
Kuru Ağırlık	1100- 1200 kg/m ³
Ph	7.5 - 8.0
Özgül Isı	0.2 Cal/g 0 C (837 J/kg.k)
Özgül Ağırlık	2.2 – 2.4 g/cc (2200 – 2400kg/m ³)
Refraktif İndeks	1.5
Serbest Nem	Maksimum 0.5
Gevşek Yoğunluk (Genleşmiş)	32 – 400 kg/ m ³
Isı İletkenliği (Genleşme)	0.04 W/mK
Ses İzolasyonu	150 Hz de sesin 0.18 db. 400 Hz de 0.90 db. yutar
Asitte Erime Özelliği	Konsantre sıcak alkali ve hidroklorik asitte erir.
Kimyasal Bileşimler	Miktar (%)
SiO ₂	71,0–75,0
Al ₂ O ₃	12,5–18,0
Na ₂ O	2,9–4,0
K ₂ O	0,5–5,0
CaO	0,5–2,0
Fe ₂ O ₃	0,1–1,5
MgO	0,02–0,5
H ₂ O	2,0–5,0
MnO ₂	0,0-0,1
SO ₃	0,0-0,2
FeO	0,0-0,1



Şekil 3.1. Mollaköy Perliti

3.1.2. Granüler Aerojel

Tez çalışması kapsamında tuğla üretiminde ikame malzemesi olarak kullanılan granüler aerojel, Industry firmasından temin edilmiştir. Kullanılan granüler aerojelin teknik özellikleri Tablo 3.2'de, görüntüsü ise Şekil 3.2'de verilmiştir.

Tablo 3.2. Granüler aerojelin teknik özellikleri (Çağlar, 2024)

Özellik	Değer
Çalışma ısı aralığı	-200 ile +650 °C arasında
Yoğunluk	300-1500kg/m ³
Isıl iletkenlik katsayısı	0,012-0,016 W/mK
Porozite	%90-95
Renk	Hafif krem
Buhar geçirgenliği	5-5,5µ
Isı sınıfı	A1
Basınç dayanımı	40kPa
Çevresel Etki	Her m ² için 5,4kg CO ₂ (1cm kalınlık)
Isı Kapasitesi	1000 j/kg/K
pH	8
Yüzey temas açısı	>165 degrees
Su geçirmez	superhydrophobic
Dielektrik sabiti	K<2
Ses Emilimi	-20 db (1/100) (500 Hz)



Şekil 3.2. Granüler aerojel

3.1.3. Tinkal atığı

Tez çalışması kapsamında kullanılan tinkal atığı Eskişehir/Kırka bölgesinde bulunan ve işletmesi ETİ MADEN A.Ş.'ye ait olan bor işleme sonrasında elde edilen atık havuzlarından temin edilmiştir. Tinkal atıklarının kimyasal içeriği ve oranları Tablo 3.3'de görüntüsü ise Şekil 3.3'de verilmiştir.

Tablo 3.3. Tinkal teknik özellikleri (Çağlar, 2024)

Bileşim	B ₂ O ₃	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	MgO	CaO	N ₂ O	K ₂ O	L.O.I
Bor atığı (%)	25,3	14,65	0,35	0,76	13,35	11,7	5,45	0,84	27,60



Şekil 3.3. Tinkal atığı

3.1.4. Killi toprak

Tez çalışması kapsamında üretilen tuğla numunelerinde %10 oranında killi toprak kullanılmıştır. Killi toprak Ankara ili Çankaya ilçesinde bulunan killi toprak yığınlarından Çeyreklemeye metodu kullanılarak alınmıştır. Alınan killi toprak üretim laboratuvarına getirilmiş ve deneyde kullanılacak niteliğe getirilmiştir. Killi toprağın mineralojik analiz sonuçları Tablo 3.4’de, görüntüsü ise Şekil 3.4’de verilmiştir. Tabloya göre killi toprak içerisinde yüksek oranda silisyum olduğu görülmüştür. Bunun yanı sıra alüminyum, demir ve kalsiyumda bulunmaktadır.

Tablo 3.4. Killi toprağın mineralojik özellikleri

Element	Si	Al	Fe	O	Ca	Mg	Nb	K	Diğer
Ağırlık (%)	44,31	7,11	6,75	17,18	10,12	1,65	1,02	0,64	11,22



Şekil 3.4. Killi toprak

3.1.5. Karışım suyu

Perlit tabanlı, granül aerojel ve tinkal atığı katkılı tuğla numunelerinin üretiminde karışım suyu olarak Ankara ili içme suyu kullanılmıştır. Şehir şebeke suyunun, berrak, temiz ve içilebilir olmasına, herhangi bir organik veya inorganik madde içermemesine özen gösterilmiştir.

3.2. Yöntem

Çalışmanın yöntem bölümünde tez çalışması kapsamında üretilmesi planlanan hafif tuğla numunelerinin üretimi yapılmıştır. Ayrıca bu bölümde numunelere uygulanacak, kuru birim hacim ağırlık, porozite, kompasite, kılcal su emme, ısı iletim katsayısı tayini, basınç dayanımı ve eğilmede çekme dayanımı deneyleri anlatılmıştır.

Bunun yanı sıra numunelerin mikro yapı analizi için yapılan SEM analizine yer verilmiştir.

3.2.1. REF ve katkılı numunelerin üretimi

Tez çalışması kapsamında REF ve katkılı hafif tuğla numuneleri üretilmiştir. Üretime ilk olarak malzeme temini ile başlanmıştır. Hafif tuğla üretimi için TS 704 standardı kullanılmıştır. Standartla yer alan deney çerçevesinin dışına çıkılmamıştır. Üretilen numuneler 40x40x160 cm ebatlarındadır. Hafif tuğla üretiminde Tablo 3.5’de verilen hafif tuğla üretim reçesi kullanılmıştır. Tez çalışmasında kullanılan malzemeler hacimce kullanılmıştır. Tabloda yer alan REF; Referans numune, N1; %60 perlit + %10 killi toprak + %30 tinkal atığı + %0 granüler arojel katkılı numune, N2; %60 perlit + %10 killi toprak + %25 tinkal atığı + %5 granüler arojel katkılı numune, N3; %60 perlit + %10 killi toprak + %20 tinkal atığı + %10 granüler arojel numune, N4; %60 perlit + %10 killi toprak + %15 tinkal atığı + %15 granüler arojel katkılı numune, N5; %60 perlit + %10 killi toprak + %10 tinkal atığı + %20 granüler arojel katkılı numune, N6; %60 perlit + %10 killi toprak + %5 tinkal atığı + %25 granüler arojel katkılı numune, N7; %60 perlit + %10 killi toprak + %0 tinkal atığı + %30 granüler arojel katkılı numune anlamını taşımaktadır.

Tablo 3.5. Karışım reçetesi

	Perlit (%)	Killi Toprak (%)	Granüler Arojel (%)	Tinkal Atığı (%)	Karışım Suyu (%)
REF	60	10	0	0	23
N1	60	10	0	30	23
N2	60	10	5	25	23
N2	60	10	10	20	23
N4	60	10	15	15	23
N5	60	10	20	10	23
N6	60	10	25	5	23
N7	60	10	30	0	23

Deneyler Ankara Karayolları Ar-Ge laboratuvarında yapılmıştır. Deney yapılış aşaması aşağıda sıralanmıştır.

1. Hafif tuğla ana malzemesi olan perlit ve killi toprak temin edilmiş, üretime katılmadan önce ön deneylere tabi tutulmuş ve üretime hazır hale getirilmiştir.
2. Killi toprak 1 mm’lik elekten elenmiş ve elek altı malzeme karışım kabına alınmıştır. Aynı işlem perlit, granüler arojel ve tinkal atığı için de uygulanmış ve karışım kabına konulmuştur.
3. Karışım kabına konulan kuru malzemeler homojen bir karışım elde etmek için 5 dakika boyunca karıştırılmıştır (Şekil 3.5).

4. İstenilen şekilde homojenlik sağlandıktan sonra karışım suyu ilave edilmiştir.
5. Karışım 15 dakika boyunca karıştırılmıştır. Bu süre literatürde optimum karışım süresi olarak bildirilmiştir (Mohajerani ve ark., 2016).
6. Karıştırma işlemi tamamlandıktan sonra, tuğla hamuru kalıplara alınmıştır.
7. Kalıp yüzeylerinin pürüzsüz olması için mastarlama işlemi uygulanmıştır.
8. Numunelerin bünyesinde bulunan suyun buharlaşması için 24 saat kalıp içerisinde tutulmuştur.
9. 24 saatin sonunda numuneler kalıptan çıkarılmış ve yarı açık alanda kurumaya bırakılmıştır. Bu işlemde numunelerin bünyesinde kalan suyun buharlaşması amaçlanmıştır.
10. 7 günün sonunda numuneler 3 °C/s ısıtma kabiliyetine sahip elektrikli fırında 800 °C, 900 °C ve 1000 °C’de aşamalı bir şekilde fırınlanmıştır. Pişirme işlemi 8 saatte tamamlanmıştır.
11. Numuneler her bir aşamada 80 dakika pişirilmiştir.
12. Numuneler en yüksek sıcaklıkta da pişirildikten sonra ani sıcaklık farkında yaşanabilecek çatlamaları önlemek için aşamalı bir şekilde soğutma işlemine tabi tutulmuştur.
13. Oda sıcaklığına gelen numuneler fırından alınmış ve ilgili deneylerin yapımına başlanmıştır (Şekil 3.6).



Şekil 3.5. Kuru karışım hazırlama



Şekil 3.6. Pişirilmiş hafif tuğla numuneleri

3.2.2. Kuru birim hacim ağırlık

REF ve katkılı numunelerin kuru birim hacim ağırlık değerlerinin tespiti için TS EN 772-13 (2002) standardı kullanılmıştır. Standarda uygun bir şekilde numuneler ± 105 °C sıcaklığa sahip etüv fırınında sabit ağırlığa gelinceye kadar bekletilmiştir. Daha sonra üretilen tuğlaların boyutları ölçülmüş ve hacmi bulunmuştur. Numunelerin kuru haldeki ağırlıklarının hacimlerine bölünmesiyle kuru birim hacim ağırlık değeri hesaplanmıştır. Deney için 6 adet numune kullanılmıştır. Hesaplama kullanılan formül Formül 1’de verilmiştir. Formülde yer alan W_0 , numune ağırlığı, V ise numunelerin hacmi anlamına gelmektedir.

$$\text{Kuru Birim Hacim Ağırlık(g/cm}^3\text{)} = W_0/V \quad \text{Formül 1}$$

3.2.2. Porozite

Porozite, pişirilmiş tuğlaların özelliklerini belirleyen ana parametrelerden biridir ve ısı iletkenlik ve hacim yoğunluğunun azalması üzerinde doğrudan bir etkiye sahiptir (Bánhidi ve Gömze,2008).

Tez çalışması kapsamında üretilen REF ve katkılı numunelerin porozite değerleri, ASTM C20 standardına (2005) göre Arşimet yöntemi ile ölçülmüştür. İlk olarak, pişirilen tuğla numuneleri 2 saat suda kaynatılmış, ardından oda sıcaklığına soğutulmuştur. Literatürde tanımlandığı gibi tartılmadan önce yaklaşık 12 saat suda bekletilmiştir. Kaynama ve soğuma süresince numune tamamen suyla kaplanmış ve kabın tabanıyla

temas ettirilmemiştir. Numunelerin porozite değerlerinin belirlenmesi için aşağıda verilen Formül 2 kullanılmıştır.

$$\text{Porozite (\%)} = ((P2-P1) / (P2-P3)) \times 100 \quad \text{Formül 2}$$

P1: Kuru ağırlık

P2: Suya doymun havadaki ağırlık

P3: Suya doymun sudaki ağırlık

3.2.3. Kompasite

Kompasite terimi, numunelerin boluklu kısımları çıktıktan sonra kalan kısmı olarak tanımlamak mümkündür. Kompasite, tez kapsamında üretilen REF ve katkılu tuğla numunelerinin soğuma işlemi tamamlandıktan sonra numunelere uygulanan porozite deneyinin ardından yapılmıştır. Kompasite değeri Formül 3 kullanılarak hesaplanmıştır.

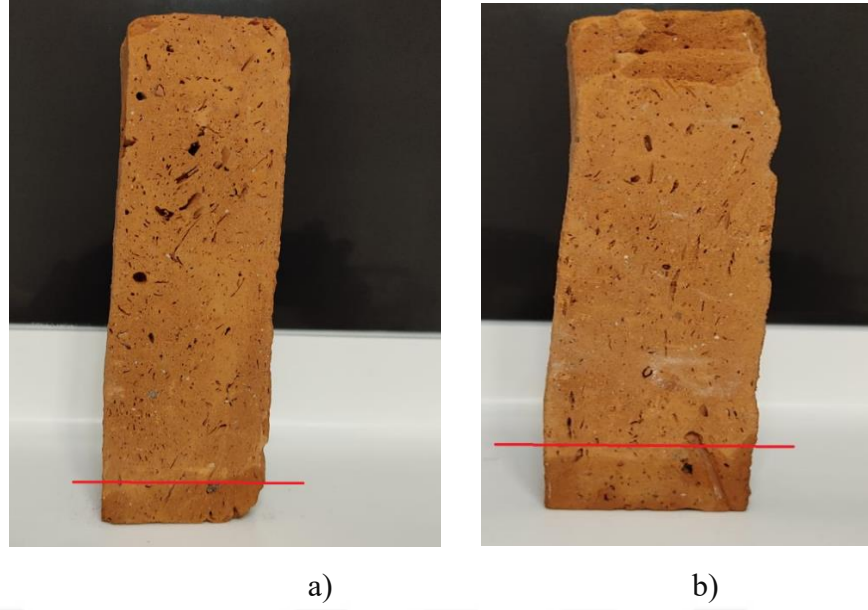
$$\text{Kompasite (\%)} = 100 - \text{Porozite} \quad \text{Formül 3}$$

3.2.4. Kılcal su emme (Kapilarite)

Malzeme bünyesinde bulunan kılcal gözeneklerden suyun yükselmesi olarak da tanımlanabilen kılcal su emme (kapilarite) deneyi TS EN 772-11 (2012) standardı referans alınarak uygulanmıştır.

Numuneler ilk aşamada, 24 saat süreyle $\pm 105^\circ\text{C}$ 'de etüv fırınında sabit ağırlığa ulaşana dek kurutulmuştur. Etüvden alınan numuneler soğuması için laboratuvar ortamında 60 dakika bekletilmiştir. Normal sıcaklığa erişen numunelerin kuru ağırlıkları ölçülmüştür. Daha sonra taban ölçüleri 40x40 mm olan numunelerin taban yüzeyleri suyun yüzeyine değecek şekilde ızgaralı 1 cm yüksekliğinde su dolu kaba yerleştirilmiştir. Numunelerin dört bir tarafının suya temas etmemesi için 1cm yükseklikle parafin ile kaplanmıştır. Numunelerin belirli zamanlarda (60 ve 120 dk.) ağırlık ölçümleri yapılmıştır. 120 dakika sonunda Şekil 3.7'de verilen numuneler tartılmıştır. Bulunan değerler Formül 4'te yerine konularak kılcal su emme miktarı hesaplanmıştır. Formülde verilen m_{son} ; son ağırlığı, m_{ilk} ; ilk ağırlığı ifade etmektedir.

$$\text{Kılcal Su Emme (Kapilarite) (gr): } m_{\text{son}} - m_{\text{ilk}} \quad \text{Formül 4}$$



Şekil 3.7. Kılcal su emme, a); 60 dk., b)120 dk

3.2.5. Isı iletim katsayısı tayini

Bu tez çalışmasında, tuğla numunelerinin ısı iletkenlik katsayısı (λ), modifiye edilmiş geçici düzlem kaynağına sahip ve Şekil 3.8’de verilen C-Therm TCi Isıl İletkenlik Analizörü ile ölçülmüştür. Bu tekniğin, seramik malzemelerin ısı iletkenliğini belirlemede etkili ve doğru bir yöntem olduğu belirtilmiştir (Dos Santos, 2008). Numunelerin ısı iletim katsayısında toplam 24 adet numune kullanılmıştır. Her bir seri ısı iletim katsayısı üç numunenin aritmetik ortalaması alınarak belirlenmiştir.



Şekil 3.8. Isı iletim katsayısı tayin cihazı

3.2.6. Basınç dayanımı

REF ve katkılı numunelerinin basınç dayanımı, TS EN 772-1+A1 (2015) “Kâgir birimler - Deney yöntemleri - Bölüm 1: Basınç dayanımının tayini” standardına göre değerlendirilmiştir. Şekil 3.9'da gösterildiği gibi 40 mm × 40 mm × 160 mm boyutlarındaki numuneler, 6.0 MPa/sn sabit yük yüklenmiş ve basınç dayanımları tespit edilmiştir. Deney sonunda altı numunenin ortalaması kaydedilmiştir. Testler, maksimum 600 kN kapasiteli bir Yüksel Kaya Makine test cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.9. Basınç dayanımı cihazı

3.2.7. Eğilmede çekme dayanımı

Önceki araştırmalar, bir malzeme uygun bir gerinim-sertleşme davranışı sergilediğinde, çekme gerinim kapasitesi ve bükülme sırasındaki sapmanın sıklıkla ilişkili olduğunu göstermektedir (Li ve Qian, 2008). Bu nedenle, numunelerin sünekliğini değerlendirmek için bu araştırmada üç noktalı eğme testi seçilmiştir (Dheyaaldin ve ark.,

2022). Eğme testi, BS EN 196-1:2005 (İngiliz Standart Çimento Test Yöntemleri - Çimento Test Yöntemleri Bölüm 1 Mukavemet Tayini, 2005) standardına uygun olarak, 50 kN kapasiteli bir makinede, 0,017 mm/s yükleme hızı uygulanarak, deplasman kontrollü bir test sistemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. 40 x 40 x 160 mm ölçülerinde prizma numuneler kullanılmış ve her seri için üç numune test edilmiştir. Eğilme yükleme açıklığı uzunluğu 120 mm olup, yük açıklık uzunluğunun ortasına uygulanmıştır. Eğilme testi sırasında yük ve açıklık ortası sapmayı kaydetmek için bilgisayarlı bir veri kayıt sistemi kullanılmıştır. Numunelerin eğilme sapma kapasitesini ölçmek için deney düzeneğine doğrusal değişken deplasman dönüştürücü (LVDT) dahil edilmiştir. En yüksek eğilme yükünde, yük-sapma eğrilerinin deformasyon değeri, prizmatik referans ve katkılı numunelerinin eğilme sapma kapasitesini belirlemek için kullanılmıştır.

3.2.8. SEM Analizi

Taramalı elektron mikroskobu (SEM), mikro yapı morfolojisi ve kimyasal bileşim karakterizasyonlarının incelenmesi ve analizi için mevcut en çok yönlü cihazlardan biridir. Elektron mikroskobunun temellerini anlamak için ışık optiğinin temel prensiplerini bilmek gerekmektedir. Çıplak göz, yaklaşık 1/60° görüş açısına sahip nesneleri ayırt edebilir, bu da ~0,1 mm'lik bir çözünürlüğe (25 cm'lik optimum görüş mesafesinde) karşılık gelmektedir. Optik mikroskopi, optik mercek aracılığıyla görüş açısını genişleterek ~2.000 Å çözünürlük sınırına sahiptir. Işık mikroskobu, bilimsel araştırmalar için büyük önem taşımıştır ve taşımaya devam etmektedir. 1890'larda çok sayıda deneyde elektronların manyetik alan tarafından saptırılabilmesinin keşfedilmesinden bu yana (Wells, 1974), elektron mikroskobu, ışık kaynağının yüksek enerjili elektron demetiyle değiştirilmesiyle geliştirilmiştir (Inkson, 2016).

Tez çalışması kapsamında analiz edilen SEM görüntüleri Şekil 3.10'da verilen SEM cihazı yardımıyla alınmıştır.



Şekil 3.10. SEM cihazı

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

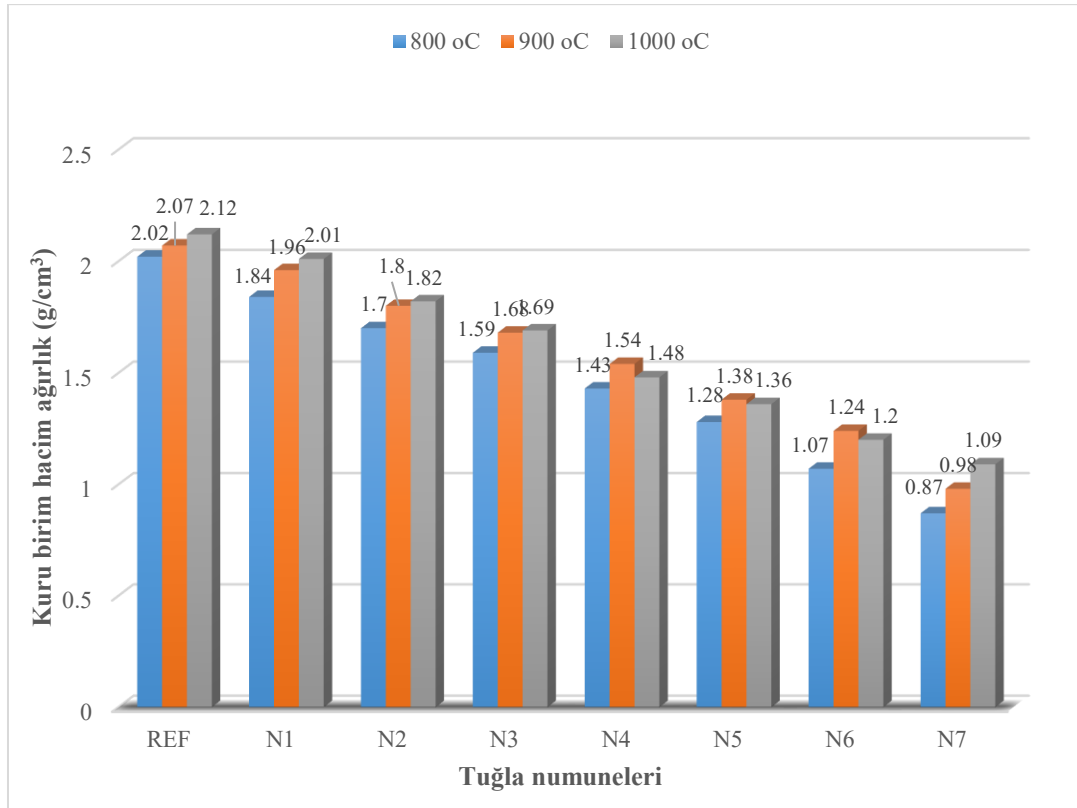
Bu bölümde, REF, aerogel ve tinkal atığı katkılı tuğla numunelerine uygulanan kuru birim hacim ağırlık, porozite, kompasite, kılcal su emme, ısı iletim katsayısı tayini, basınç dayanımı ve eğilmede çekme dayanımı deneylerinin sonucunda elde edilen bulgular başlıklar halinde sunulmuştur. Ayrıca tuğla numunelerinin mikro yapı görüntülerinin olduğu SEM analizi de başlık halinde verilmiştir.

4.1. Kuru Birim Hacim Ağırlık

Şekil 4.1’de numunelerin kuru birim hacim ağırlık değerlerinin verildiği grafik sunulmuştur. Numunelerin kuru birim hacim ağırlıklarının 2,12 ila 0,87 g/cm³ arasında değiştiği görülmüştür. En düşük birim hacim ağırlığı 800 oC’de pişirilen %30 granüler aerogel+%0 tinkal atığı ikameli tuğla numunesi olan N7 numunesinden elde edilirken, en yüksek değer 1000 °C’de pişirilen REF numunesinden elde edilmiştir. Tüm sıcaklıklarda en yüksek kuru birim hacim ağırlık değeri REF numunesine aittir.

Katkılı numuneler incelendiğinde; genel olarak kuru birim hacim ağırlık değerlerinde azalma olduğu görülmüştür. Gerek tinkal atığı miktarının artması gerekse granüler aerogel miktarının artması tuğlanın kuru birim hacim ağırlığının düşmesine neden olmuştur. Bunun nedeninin hem tinkal atığının hem de granüler aerogelin birim hacim ağırlıklarının düşük olmasıdır. Azalma oranlarına bakıldığında, granüler aerogel miktarının artmasıyla kuru birim hacim ağırlık değerinin düşüş oranının daha fazla olduğu görülmüştür. Bunun nedeninin granüler aerogelin yüksek oranda gözenekli olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

Literatürde yer alan çalışmalardan, Çelik (2015) ve Çimen (2023) perlitin tuğlanın kuru birim hacim ağırlığını azalttığını, Shah ve ark. (2020) ve Merli ve ark. (2020) aerogelin tuğlanın kuru birim hacim ağırlığında azalmaya neden olduğunu ifade etmişlerdir. Bunun yanı sıra Mazın (2024) ve Kılıçarslan ve ark. (2013) tuğla üretiminde bor atığı kullanımının tuğlanın kuru birim hacim ağırlık değerinde azalmaya neden olacağını bildirmişlerdir. Tüm bu çalışmalar tez çalışmasını destekler niteliktedir.



Şekil 4.1. Kuru birim hacim ağırlık grafiği

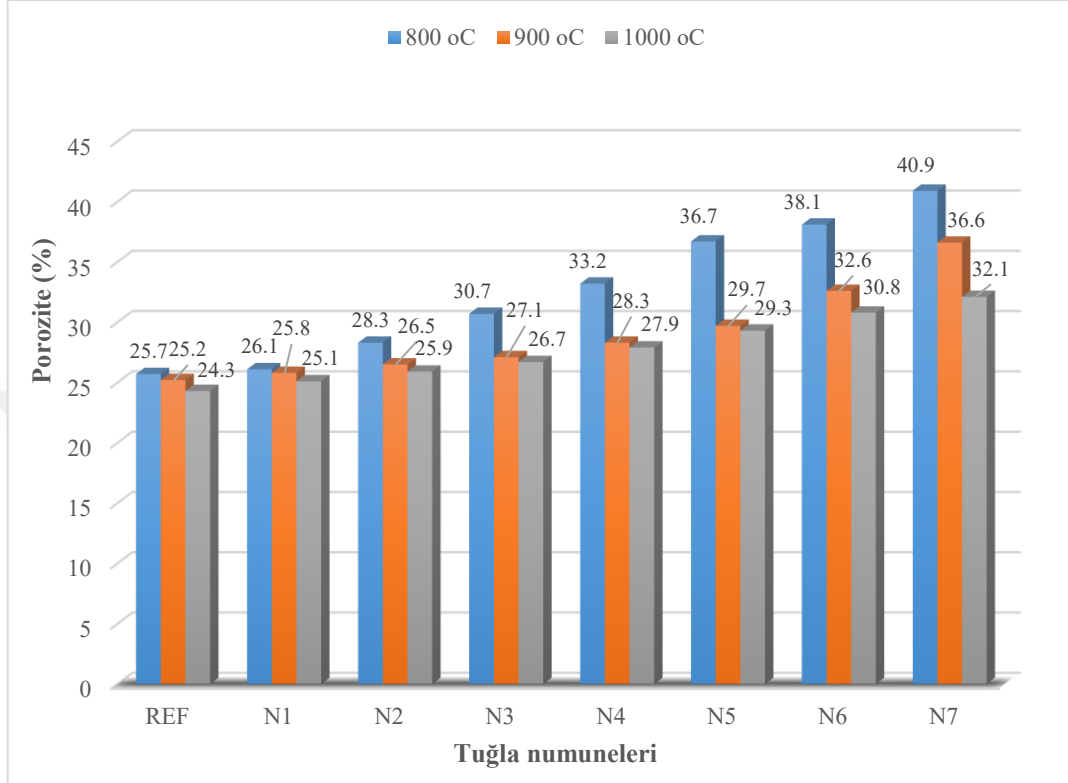
4.2. Porozite

Malzemenin birçok fiziksel özelliği üzerinde etkisi olan ve malzemenin gözeneklilik durumu olarak tanımlanan porozitenin değerlerini yer aldığı grafik Şekil 4.2’de verilmiştir.

Grafiğe göre; porozite değerlerinin %24,3 ila %40,9 arasında değiştiği görülmüştür. Tüm sıcaklıklarda katkı oranı farketmeksizin porozite değerinin arttığı görülmüştür. Tinkal atığı ikame oranının artması porozite değerlerini düşük oranda arttırdığı, aerjel ikamesi ile bu artış oranının yüksek olduğu görülmüştür. En yüksek oran %30 granül aerjel ikameli numuneden elde edilmiştir. Pişirme sıcaklıklarının porozite artış oranı üzerinde etkili olduğu görülmüştür. En yüksek poroziteli numunelerin 800 °C’de pişirilen numunelerden elde edildiği anlaşılmıştır. Bunun nedeninin tinkal atıklarının yüksek sıcaklıklarda eriyerek boşlukları doldurma özelliğinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Granül aerjelin yüksek gözenekli yapısı porozitenin artışının önemli bir nedeni olarak görülmüştür. Ayrıca sıcaklık artışının numunelerin porozite değerleri üzerinde etkili olduğu anlaşılmıştır.

Çimen ve ark. (2020) yılında yaptığı çalışmada, tuğla üretiminde perlit kullanımının porozite değerini arttırdığını, Merli ve ark. (2024) ve Mazın (2024) aerjelin porozite değerinde artışa neden olduğunu ifade etmişlerdir. Kavas (2006), Kılıçarslan ve

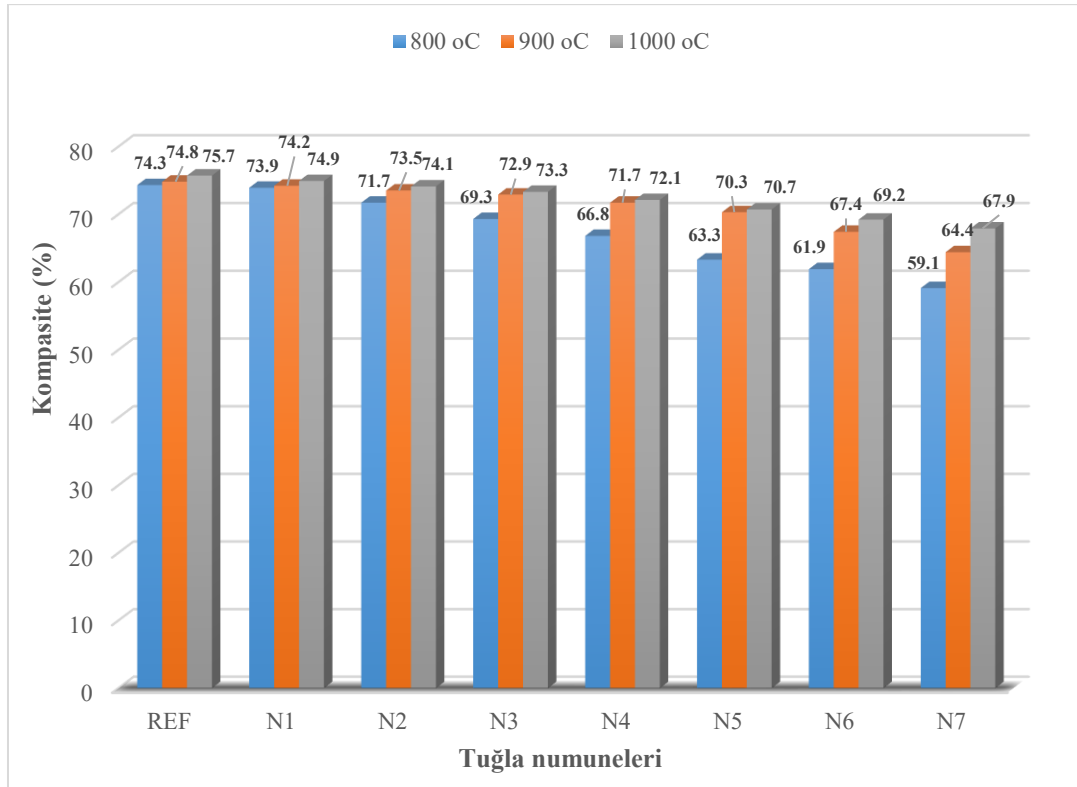
ark. (2013) ve Çağlar (2018) çalışmalarında, tinkal atıklarının tuğlanın porozite değerini yükselttiğini bildirmişlerdir. Bu çalışmalarda tez çalışmasıyla paralel sonuçlar elde edildiği görülmüştür.



Şekil 4.2. Porozite grafiği

4.3. Kompasite

Malzemenin doluluk oranı olarak bilinen kompasite değerleri Şekil 4.3’de verilmiştir. Şekle göre; üretilen REF ve ikame malzemeli tuğlaların kompasite değerlerinin %59,1 ile %75,7 arasında değiştiği görülmüştür. Porozite değeri en yüksek olan ve 800 °C’de pişirilen N7 numunesinin (%30 Granüler aerojel+%0 tinkal atığı) en düşük kompasite değerine sahip olduğu görülmüştür. Porozite değerleriyle ters orantılı olan kompasite değeri, tüm sıcaklıklarda azalmıştır. En düşük kompasite değeri 800 °C’de pişirilen numunelerden elde edilirken, en yüksek değerin 1000 °C’de pişirilen numunelerden elde edildiği görülmüştür. Yani pişirme sıcaklığının kompasite değerleri üzerinde de etkili olduğu anlaşılmıştır.



Şekil 4.3. Komposite grafiği

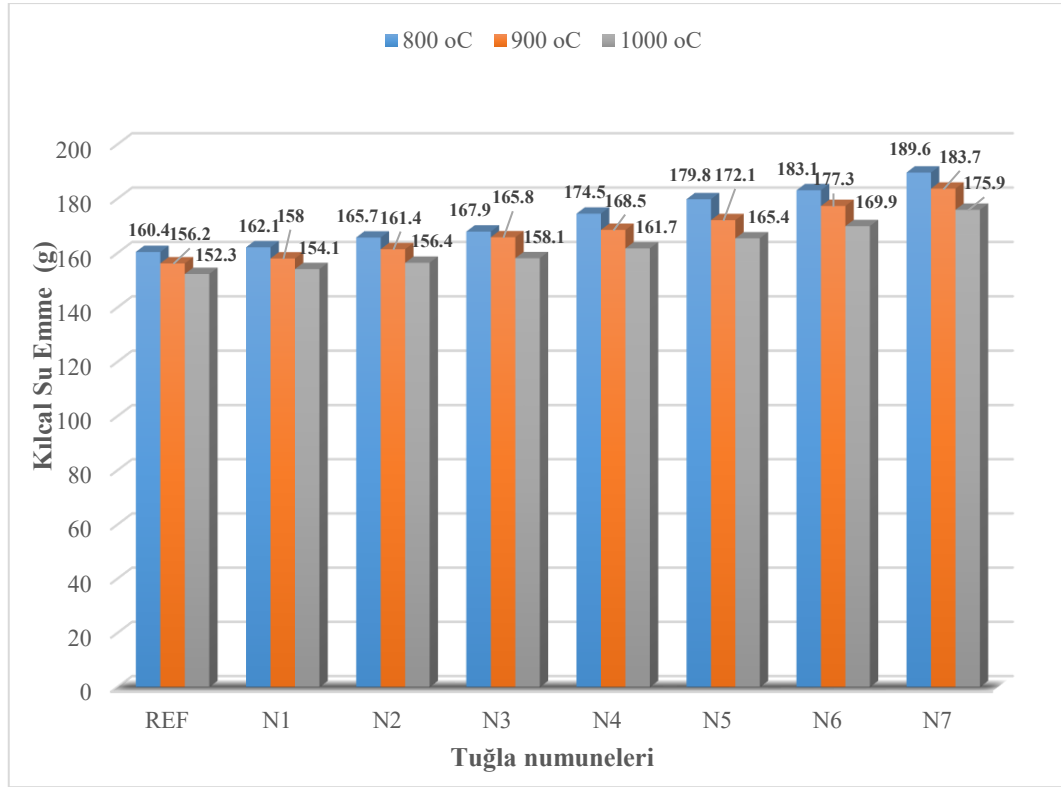
4.4. Kılcal Su Emme

Kılcal su emme miktarı, malzemenin bünyesinde bulunan kılcal boşluklarla ilişkilidir. Yani malzeme bünyesinde bulunan kılcal boşluk oranının yüksek olması, kılcal su emme miktarının artmasına neden olmaktadır.

Şekil 4.4’de REF ve ikame malzemeli tuğla numunelerinin kılcal su emme miktarlarının verildiği grafik sunulmuştur. Grafiğe göre; en düşük kılcal su emme miktarı 152,3 g ile 1000 °C’de pişirilen REF numunesinden elde edilirken, en yüksek kılcal su emme miktarı 189,6 g ile 800 °C’de pişirilen N7 numunesinden elde edilmiştir. Tüm sıcaklıklarda kılcal su emme oranının arttığı görülmüştür. Sıcaklık artışının kılcal su emme oranı üzerinde etkili olduğu düşünülmektedir. Kılcal su emme miktarlarının en yüksek olduğu 800 °C’de pişirilen N7 numunesinin aynı zamanda en yüksek porozite oranına sahip olması, porozite oranı ile kılcal su emme miktarının ilişkili olduğunu göstermektedir.

Tuğla numunelerinin tinkal atığı ikamesiyle kılcal su emme miktarının düşük oranlarda artarken, granüler aerjel miktarının artmasıyla artış oranının daha yüksek olduğu görülmüştür. Buna granül aerjelin yüksek oranda boşluk içermesiyle tuğla bünyesini daha gözenekli hale getirdiği, böylelikle kılcal su emme miktarının artmasına neden olduğu düşünülmüştür.

Literatürde yer alan Samath ve ark. (2015), Çimen ve ark. (2020) ve Sahah ve ark. (2020) çalışmaları perlitin su emilimini arttırdığını, Merli ve ark. (2024) ve Çağlar (2024) çalışmaları aerogelin numunelerin su emilimi üzerinde olumsuz etki gösterdiğini bildirmişlerdir. Kavas (2006) ve Elbeyli ve ark. (2004) ve Çağlar (2018) çalışmalarında, tinkal atıklarının %10 oranından fazla kullanılması ile su emme kabiliyetlerinin arttığını bildirmişlerdir. Elde ettikleri sonuçlar tez çalışmasını destekler niteliktedir.



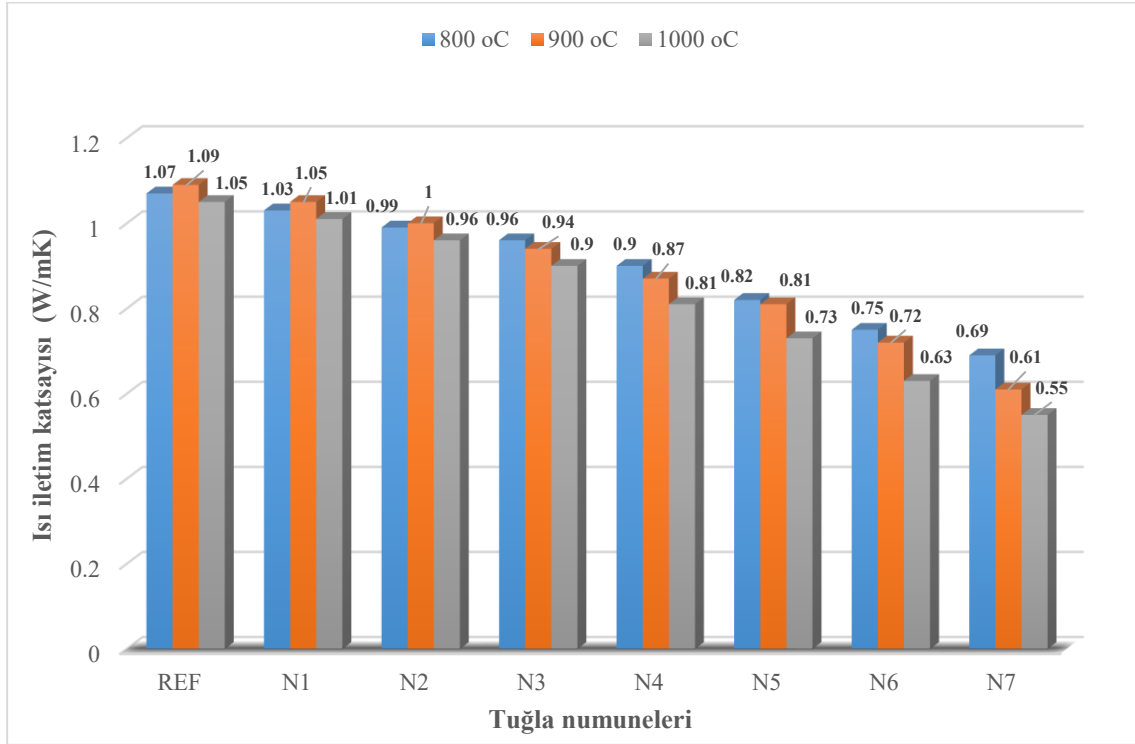
Şekil 4.4. Kılcal su emme grafiği

4.5. Isı İletim Katsayısı Tayini

Isı iletim katsayısı, bir malzemenin ısıyı ne ölçüde ilettiği ile ilişkilidir. Bu konuda malzemenin fiziksel özelliği ve kimyasal bileşenleri de önemlidir. Enerji korunumu açısından bir malzemenin ısıyı iletme kapasitesinin düşük olması istenmektedir.

Şekil 4.5’de 800, 900 ve 1000 °C’de pişirilen REF ve ikame malzemeli tuğla numunelerinin ısı iletim katsayısının verildiği grafik sunulmuştur. Grafiğe göre; ısı iletim katsayıları 800 °C’de 1,07-0,69 W/mK, 900 °C’de 1,09-0,61 W/mK, 1000 °C’de ise 1,05-0,55 w/mK arasında değişmektedir. Değerler detaylı incelendiğinde sıcaklığın ısı iletim katsayısının azalmasında etkili olduğu görülmüştür. Granüler aerogel ikamesinin tuğlanın ısı iletim katsayısını düşürme oranı tinkal atığı ikamesininkinden daha yüksektir. Bunun en önemli nedeni granüler aerogelin yüksek gözenek yapısına sahip olmasıdır.

Literatür incelendiğinde, tuğla üretiminde perlit kullanımının ısı iletim katsayısını düşürdüğünü (Arıcı ve ark., 2016) ayrıca tinkal atığı ve granüler aerogelin tuğlanın ısı iletim katsayısını iyileştirdiğini ifade etmişlerdir (Maaloufa, 2016; Wernery ve ark., 2017; Ganobjak ve ark., 2019; Çimen ve ark., 2020; Çağlar, 2023). Çalışmalarından elde ettikleri sonuçlar tez çalışmasıyla örtüşmekte ve tez çalışmasını desteklemektedir.



Şekil 4.5. Isı iletim katsayısı grafiği

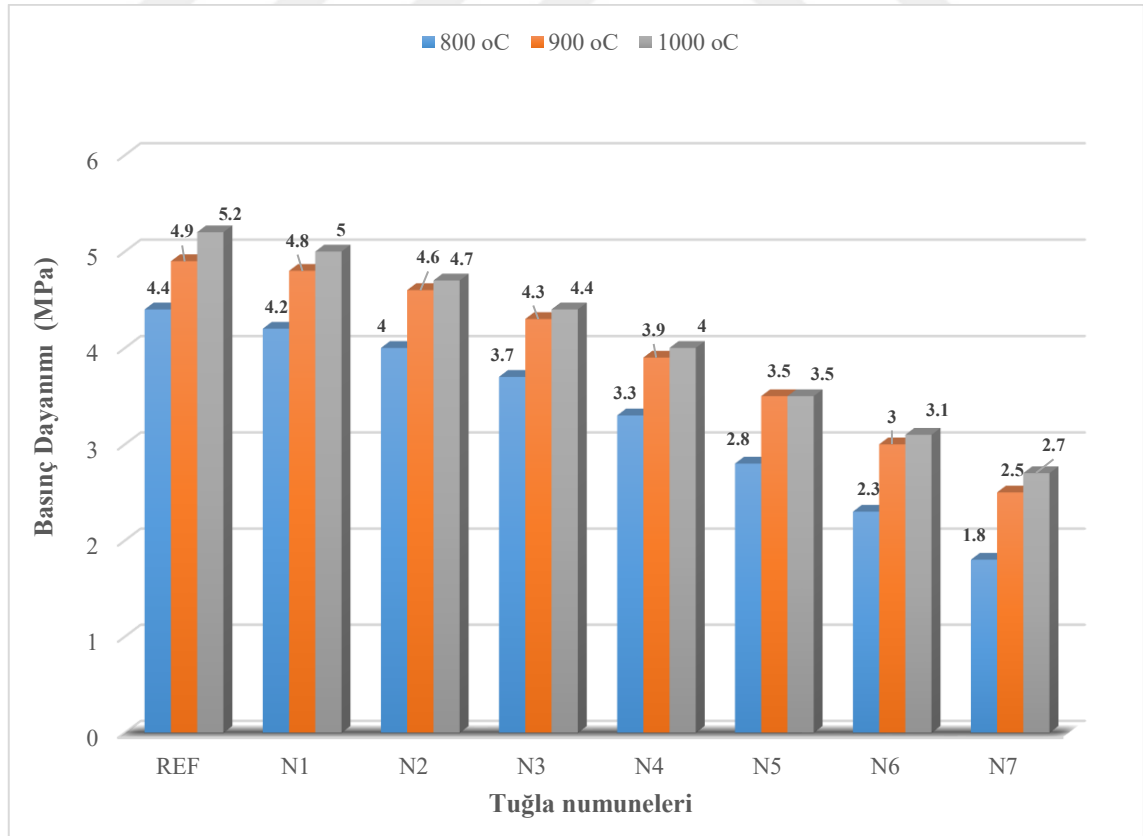
4.6. Basınç Dayanımı

REF ve granüler aerogel ve tinkal atığı ikameli tuğla numunelerinin basınç dayanım değerleri Şekil 4.6'da verilmiştir. Şekilde verilen grafiğe göre; 800 °C'de pişirilen tuğla numunelerinin basınç dayanımı değerleri 4,4-1,8 MPa, 900 °C'de 4,9-2,6 MPa, 1000 °C'de 5,2-2,7 MPa arasında değişmektedir. Tüm sıcaklıklarda en yüksek basınç dayanımının REF numunesinden elde edildiği görülmüştür.

Numunelere tinkal atığı ikame edildiğinde basınç dayanımını azaldığı görülmüştür. Granüler aerogel ikamesinin de tuğlanın basınç dayanımını azalttığı tespit edilmiştir. Tinkal atığını ikamesiyle yaşanan azalma oranının granüler aerogel ikamesine göre daha az olduğu anlaşılmıştır. Bunun nedenini granüler aerogelin tinkal atığından daha gözenekli ve daha kırılgan bir yapıda olmasıdır.

800 °C’de pişirilen tuğla numunelerinden REF, N1 ve N2 numuneleri orta dayanımlı, N3, N4 ve N5 numuneleri az dayanımlı tuğla numuneleri sınıfına girmektedir. 900 °C’de pişirilen tuğla numunelerinden REF, N1, N2 ve N3 numuneleri orta dayanımlı tuğla, N4, N5, N6 ve N7 numuneleri az dayanımlı tuğla sınıfında yer almaktadır. 1000 °C’de pişirilen tuğla numunelerinden REF, N1, N2, N3 ve N4 numuneler orta dayanımlı tuğla, N5, N6 ve N7 ise az dayanımlı tuğla sınıfına girmektedir. Orta dayanımlı sınıfa giren tuğlalar yapısal uygulamalarda kullanılırken, az dayanımlı tuğlaların daha çok restorasyon ve dekorasyon uygulamalarında kullanılması önerilmektedir.

Literatürde yer alan çalışmalardan Çimen ve ark. (2020) ve Joo ve ark. (2021) yılında yapmış oldukları çalışmada perlit ikamesinin tuğla numunelerinin basınç dayanımını düşürdüğünü, Kavas (2006) ve Elbeyli ve ark. (2004) yapmış oldukları çalışmada bor atıklarının tuğlanın basınç dayanımını olumsuz yönde etkilediğini bildirmişlerdir. Ayrıca, aerojelin tuğla bünyesine ikame edilmesi de tuğlanın basınç dayanımının azalmasına neden olmaktadır (Çağlar, 2023; Merli ve ark., 2024; Mazın, 2024). Perlit, tinkal atığı ve aerojelin tuğlanın basınç dayanımı üzerine yapılan çalışmalar tez çalışmasını desteklemektedir.

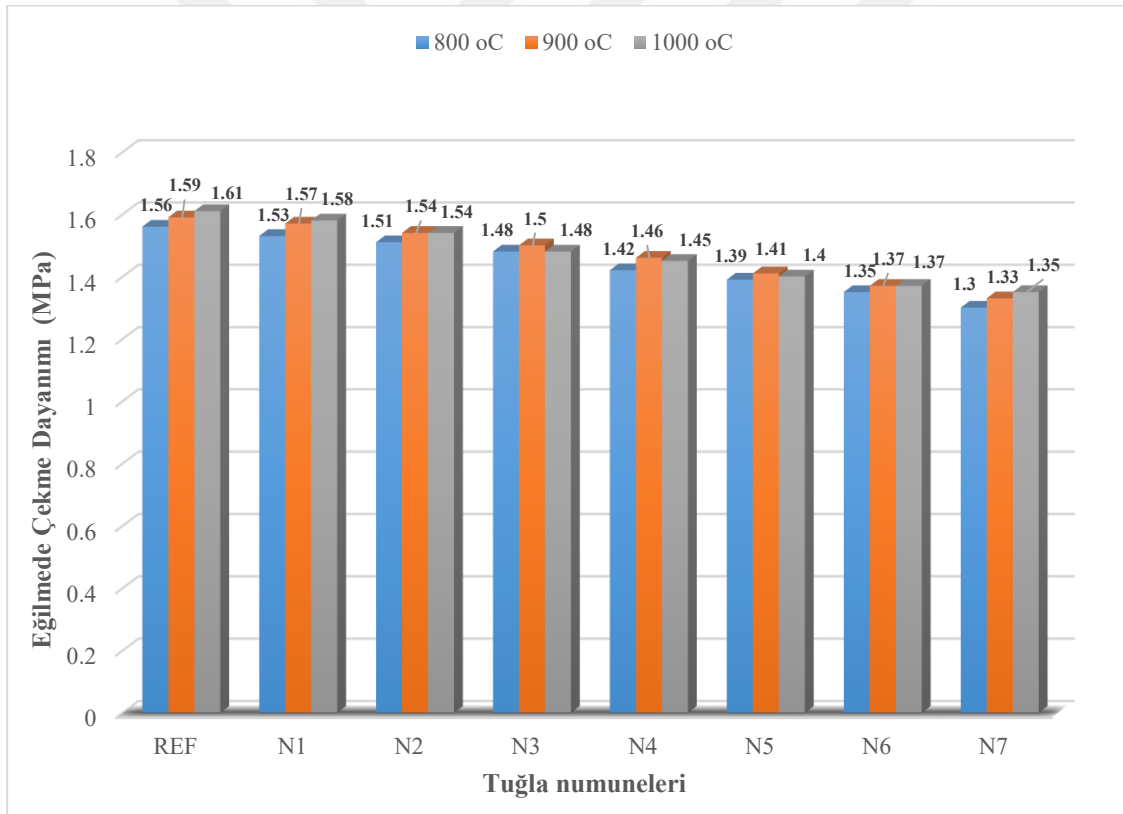


Şekil 4.6. Basınç dayanımı grafiği

4.7. Eğilmede Çekme Dayanımı

Şekil 4.7’de 800 °C, 900 °C ve 1000 °C pişirilen REF ve tinkal atığı ve granüler aerojel ikameli tuğla numunelerinin eğilmede çekme dayanım değerlerinin yer aldığı grafik verilmiştir. Grafiğe göre; eğilmede çekme dayanımı değerleri 800 °C’de 1,56-1,30 MPa, 900 °C’de 1,59-1,33 MPa, 1000 °C’de ise 1,61-1,35 MPa arasında değiştiği görülmüştür. Tüm sıcaklıklarda en yüksek eğilmede çekme dayanımı REF numunesinden, en düşük değer ise N7 numunesinden elde edilmiştir. Tüm sıcaklıklarda, granüler aerojelin eğilmede çekme dayanımı üzerindeki etkisi tinkal atığından daha fazladır.

Literatürde yer alan çalışmalarda perlit, tinkal atığı ve granüler aerojelin tuğla eğilmede çekme dayanımını düşürdüğünü ifade etmişlerdir (Elbeyli ve ark., 2004; Çimen ve ark., 2020; Joo ve ark., 2021; Merli ve ark., 2024).



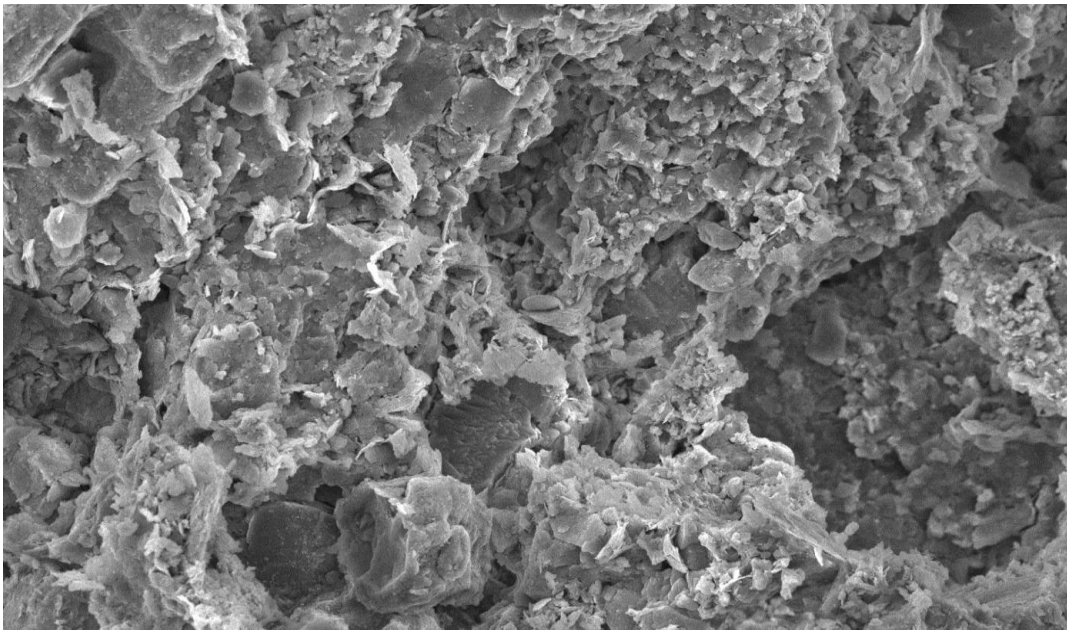
Şekil 4.7. Eğilmede çekme dayanımı grafiği

4.8. Numunelerin SEM Analizi

Numunelerin SEM analizi için optimum pişirme sıcaklığında (900 °C) fırınlanan REF, N1 ve N7 numuneleri kullanılmıştır. Bu numuneler basınç dayanımı değerleri baz alınarak tercih edilmiştir. REF numunesi en yüksek basınç dayanımına sahip olduğu için, N1 en yüksek tinkal atığı oranına sahip olduğu için, N7 ise en yüksek granüler aerojel

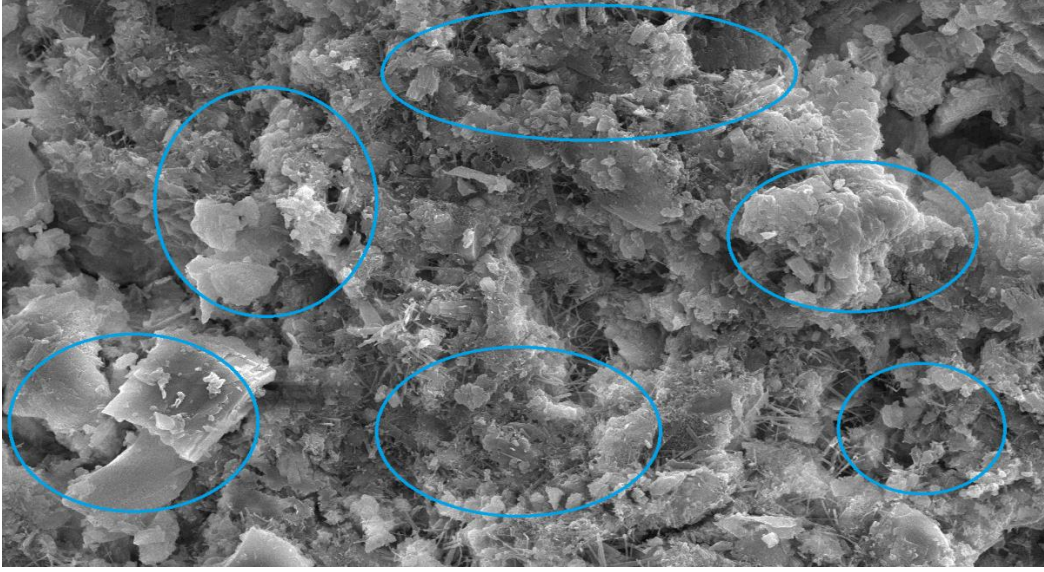
oranına sahip olduğu için seçilmiştir. REF numunesinin SEM görüntüsü Şekil 4.8’de, N1 numunesinin SEM görüntüsü Şekil 4.9’de, N7 numunesinin SEM görüntüsü Şekil 4.10’da verilmiştir.

Şekil 4.8’de verilen görüntüde, REF numunesinin tabakalı yapıda olduğu görülmüştür. Perlit ile üretilen REF numunesinin perlit yapısından kaynaklı küçük mikro gözeneklerden oluştuğu görülmüştür. Sıkı bir bağ yapısına sahip olduğu anlaşılmaktadır. Bu durum numunenin basınç dayanımının yüksek olduğunu göstermektedir. Basınç dayanımı deney sonuçlarına bakıldığında en yüksek basınç dayanımın REF numunesine ait olduğu görülmüştür. SEM görüntüsünün deneysel sonuçlarla örtüştüğü görülmüştür.



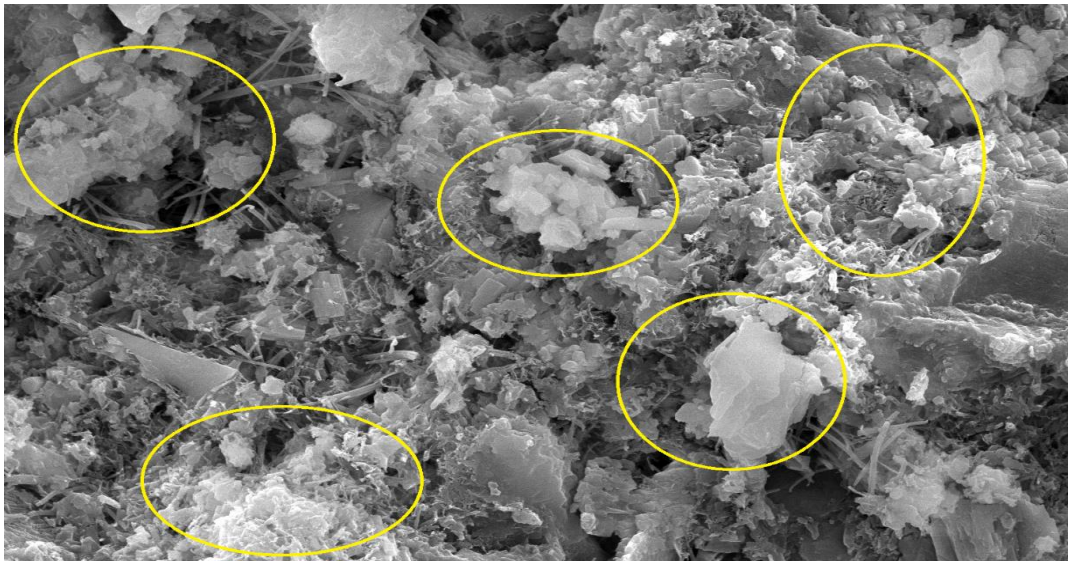
Şekil 4.8. REF numunesinin SEM görüntüsü

Tinkal atığı oranının en yüksek olduğu N1 numunesine ait SEM görüntüsünde (Şekil 4.9), tinkal atığının tuğla bünyesi içerisinde homojen bir şekilde dağıldığı görülmüştür. Mavi renk ile işaretlenmiş alanlar tinkal atığının net bir şekilde gözlemlendiği alanlardır. Mikro gözenekli yapıda olan REF numunesine tinkal atığı ikamesiyle makro gözeneğe dönüştüğü görülmüştür. Amor yapı oranının arttığı tespit edilmiştir. N1 numunesinin sıkı bağ dokusunun REF numuneye kıyasla daha gevşek olduğu görülmüştür. Bu gevşek yapı basınç dayanımının azalmasına neden olmaktadır. Basınç dayanım deney sonuçları N1 numunesinin basınç dayanımının REF numunesinden daha az olduğunu göstermektedir.



Şekil 4.9. N1 numunesinin SEM görüntüsü

Granüler aerogel oranının en yüksek olduğu N7 numunesinin SEM görüntüsünde (Şekil 4.10), granüler aerogelin homojen bir şekilde dağılım sergilediği görülmüştür. Sarı renkle işaretlenmiş alanda granüler aerogelin belirgin bir şekilde görüldüğü alanları göstermektedir. SEM görüntüsünde amorf yapının yoğun bir şekilde olduğu görülmektedir. Mikro gözeneklerin yerini makro gözeneklere bıraktığı anlaşılmaktadır. SEM görüntüsünde, numune iç yapısının gevşek bağ dokusuna sahip olduğu ve bazı alanların kırılmış ya da çatlamış olduğu görülmektedir. Bu durum numunenin basınç dayanımının düşmesine neden olmaktadır. Nitekim yapılan deneysel çalışmada en düşük basınç dayanım değerleri N7 numunesine aittir. Bu değerler SEM görüntüsünü desteklemektedir.



Şekil 4.10. N7 numunesinin SEM görüntüsü

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, perlit tabanlı hafif tuğla üretiminde, tinkal atığı ve granüler aerogel kullanımının etkisi araştırılmıştır. Araştırma kapsamında çeşitli deneyler yapılmış ve edinilen sonuçlar aşağıda verilmiştir.

1. Granüler aerogel ve tinkal atığının artmasıyla kuru birim hacim ağırlık değerlerinin azalmıştır.
2. Sıcaklığın kuru birim hacim ağırlık değerleri üzerinde etkili olduğu görülmüştür. En düşük kuru birim hacim ağırlık değerinin 800 °C’de pişirilen numunelerden elde edilmiştir.
3. Granüler aerogel ikamesi tuğlanın porozite değerini tinkal atığından daha fazla arttırmıştır.
4. Tüm sıcaklıklarda katkı oranı farketmeksizin porozite değeri artmıştır.
5. Tüm sıcaklıklarda katkı oranı arttıkça kompasite değeri azalmıştır.
6. En düşük kılcal su emme değeri porozite değeri en düşük olan 1000 °C’de REF numunesinden elde edilmiştir.
7. Katkı malzemesi oranının artmasıyla kılcal su emme oranının arttığı görülmüştür.
8. Kılcal su emme oranının porozite ile doğru orantılı olduğu anlaşılmıştır.
9. Pişirme sıcaklığının kılcal su emme değerleri üzerinde etkili olmuş ve en yüksek kılcal su emme değerlerinin 800 °C’de pişirilen numunelerden elde edilmiştir.
10. Sıcaklık ısı iletim katsayısı değeri üzerinde etkili olmuştur.
11. Granüler aerogelin gözenekli yapısının tinkal atığından daha fazla olması nedeniyle granüler aerogel katkısının ısı iletim katsayısını tinkal atığından daha fazla düşürdüğü anlaşılmıştır.
12. Granüler aerogel ve tinkal atığı tuğlanın basınç dayanımını düşürmüştür.
13. En düşük basınç dayanımı 800 °C’de pişirilen numunelerden elde edilmiştir.
14. 800 °C’de pişirilen tuğla numunelerinden REF, N1 ve N2 numuneleri orta dayanımlı, N3, N4 ve N5 numuneleri az dayanımlı tuğla numuneleri sınıfına girmektedir.
15. 900 °C’de pişirilen tuğla numunelerinden REF, N1, N2 ve N3 numuneleri orta dayanımı tuğla, N4, N5, N6 ve N7 numuneleri az dayanımlı tuğla sınıfında yer almaktadır.

16. 1000 °C’de pişirilen tuğla numunelerinden REF, N1, N2, N3 ve N4 numuneler orta dayanımlı tuğla, N5, N6 ve N7 ise az dayanımlı tuğla sınıfına girmektedir.
17. Orta dayanımlı sınıfına giren tuğlalar yapısal uygulamalarda kullanılırken, az dayanımlı tuğlaların daha çok restorasyon ve dekorasyon uygulamalarında kullanılması önerilmektedir.
18. Tüm sıcaklıklarda en yüksek eğilmede çekme dayanımı REF numunesinden elde edilmiştir.
19. Tüm sıcaklıklarda, granüler aerojelin eğilmede çekme dayanımı üzerindeki etkisi tinkal atığından daha fazladır.
20. Numunelerin optimum pişirme sıcaklığının 900 °C olduğu tespit edilmiştir.
21. SEM
22. Tinkal atıklarının tuğla üretiminde kullanımı ile çevreye verdiği zarar azalacak, bu durum insan ve toprak sağlığını korumaya yardımcı olacaktır.
23. Tinkal atığı gibi değerli atıklar sadece tuğla değil diğer yapı malzemelerinin üretiminde de kullanılmalıdır.
24. Atık kullanımı ile ilgili çalışmalar gerek üniversiteler gerekse kamu kurum ve kuruluşlarınca desteklenmelidir.
25. Tinkal atığı ve granüler aerojelin tuğla üzerindeki etkileri detaylı araştırılmalıdır.

KAYNAKLAR

- Aegerter, M.A, Leventis, N., Koebel, M.M. Aerogels Handbook, Springer, New York, 2011.
- Ahmad, S., Ahmad, S., & Sheikh, J. N. (2011). Silica centered aerogels as advanced functional material and their applications: A review. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 611, 122322.
- Ahmadi, P. F., Ardeshtir, A., Ramezaniapour, A. M., & Bayat, H. (2018). Characteristics of heat insulating clay bricks made from zeolite, waste steel slag and expanded perlite. *Ceramics International*, 44(7), 7588-7598.
- Ait Khouya, O., EL farissi, L., Belouaggadia, N., Jammoukh, M., & Zamma, A. (2024). Green recycling of red brick waste into aerogel panels for thermal insulation in buildings. *Journal of Sol-Gel Science and Technology*, 110(1), 62-73.
- Akgöl, U. (2023). *Synthesis of Aerogel Coatings and Investigation of Anti-Icing Performances*, Master's Thesis, Ege University Graduate School Of Natural And Applied Sciences, İzmir, 24-27s.
- Aksoy, Ö., Alyamaç, E., Mocan, M., Sütçü, M., Özveren-Uçar, N., & Özgür Seydibeyoğlu, M. (2022). Characterization of perlite powders from İzmir, Türkiye region. *Physicochemical Problems of Mineral Processing*, 58(6), 1-15.
- Al-Akashi, R.B.S. (2024). *Development of A Bioactive Glassceramic Co-Doped with Lanthanum and Boron and Its Biological in Vitro Studies For Bone Regeneration Applications*, Master's Thesis, Karabük University Institute of Graduate Programs, Karabük, 23s.
- Alan, S. (2022). *Energy Performance Analysis and Materials Characterization of Aerogel Insulation Blankets*, Master's Thesis, The Graduate School of Engineering and Sciences of İzmir Institute of Technology İzmir, 40s.
- Alghadi, A. M., Tirkes, S., & Tayfun, U. (2019). Mechanical, thermo-mechanical and morphological characterization of ABS based composites loaded with perlite mineral. *Materials Research Express*, 7(1), 015301.
- Al-Kroom, H., Abd Elrahman, M., Meddah, M. S., Arif, M., Sikora, P., Stephan, D., & Abdel-Gawwad, H. A. (2023). The impact of red clay brick and perlite wastes on the reusability of katoite-based binder after exposure to elevated temperatures. *Materials Letters*, 353, 135281.

- Allameh-Haery, H., Kisi, E., & Fiedler, T. (2017). Novel cellular perlite–epoxy foams: Effect of density on mechanical properties. *Journal of Cellular Plastics*, 53(4), 425-442.
- Al-Muhtaseb, S. A., & Ritter, J. A. (2003). Preparation and properties of resorcinol–formaldehyde organic and carbon gels. *Advanced Materials*, 15(2), 101-114.
- Alpaydm, G.Ş. (2019). *An Investigation of Effects of Boron Additives on The Permeability and Shear Strength Behavior of Sand Bentonite Mixtures Under High Temperatures*, Master’s Thesis, Dokuz Eylül University Graduate School Of Natural And Applied Sciences, İzmir, 22s.
- Altınbaş, B.F. (2023). *Synthesis of Natural Adsorbents From Lignocellulosic Biomass For The Recovery of Boron From Water Resources*, Master’s Thesis, the Graduate School of Engineering and Sciences of İzmir Institute of Technology, İzmir, 52s.
- Anthony, M.C., John W.; Bideaux, Richard A.; Bladh, Kenneth W. and Nichols, “Handbook of Mineralogy V (Borates, Carbonates, Sulfates),” English, 2005.
- Arıcı, M. Ü. S. L. Ü. M., Yılmaz, B., & Karabay, H. A. S. A. N. (2016). Investigation of heat insulation performance of hollow clay bricks filled with perlite. *Acta Physica Polonica A*, 130(1), 266-268.
- ASTM C20 standardına (2005), Standard Test Methods for Apparent Porosity, Water Absorption, Apparent Specific Gravity, and Bulk Density of Burned Refractory Brick and Shapes by Boiling Water, Advancing Standards Transforming Markets.
- Ayberk, M. (1995). Perlitin yapı gereci olarak kullanımı ve yapı maliyetine etkisi. Endüstriyel Hammaddeler Sempozyumu, İzmir.
- Bánhidi, V., & Gömze, L. A. (2008, September). Improvement of insulation properties of conventional brick products. In Materials science forum, 589, pp. 1-6. Trans Tech Publications Ltd.
- Begum, H., Horoshenkov, K. V., Conte, M., Malfait, W. J., Zhao, S., Koebel, M. M., Bonfiglio, P., & Venegas, R. (2021). The acoustical properties of tetraethyl orthosilicate based granular silica aerogels. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 149(6), 4149–4158.
- Birawidha, D. C., Sudibyo, Hendronursito, Y., Amin, M., Prasetyo, E., Marjunus, R., ... & Prinanti. (2024, February). Analysis of adhesive variation and pressure on light bricks made from perlite and basalt. In AIP Conference Proceedings 3003(1), p. 020016. AIP Publishing LLC.

- Bheekhun, N., Abu Talib, A. R., & Hassan, M. R. (2013). Aerogels in aerospace: an overview. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2013(1), 406065.
- Bozbag, S. E., Yasar, N. S., Zhang, L. C., Aindow, M., & Erkey, C. (2011). Adsorption of Pt (cod) me₂ onto organic aerogels from supercritical solutions for the synthesis of supported platinum nanoparticles. *The Journal of Supercritical Fluids*, 56(1), 105-113.
- Bozdağ, S.E. (2012). *A Fundamental Study on The Synthesis of Aerogel Supported Bimetallic Nanoparticles Using Supercritical Deposition*, Doctoral Thesis, Koç University Graduate School of Sciences and Engineering, İstanbul, 35-38s.
- BS EN 196-1, (2005). İngiliz Standart Çimento Test Yöntemleri - Çimento Test Yöntemleri Bölüm 1 Mukavemet Tayini, British Standard, UK.
- Bullibabu, K., & Ali, M. A. (2018). Production and characterization of low thermal conductivity clay bricks by admixture of bagasse and perlite. *International Journal of Mechanical and Production Engineering Research and Development (IJMPERD)*, 8(3), 809-816.
- Buratti, C., Merli, F., Belloni, E., & Spaccini, F. (2022, December). Thermal and acoustic performance of additive aerogel-clay bricks. In *Journal of Physics: Conference Series* 2385(1), p. 012016. IOP Publishing.
- Buratti, C., Greco, P. F., Susta, S., & Merli, F. (2025). Clay-aerogel mixtures for bricks fabrication: Experimental characterization and thermal performance simulation. *Applied Thermal Engineering*, 269, 126097.
- Burgos, L. R. (2020). Mechanical characterization of Raw-Perlite Solid Bricks for use in construction. *Revista De La Construcción*, 19(1), 170-179.
- Cebeci, H. (2025). *Ham Perlit Agregalı Betonda Geri Kazanılmış İnce Agregalı İkamelerinin Betonların Mekanik, Kılcallık Ve Yüksek Sıcaklık Direnci Özellikleri Üzerindeki Etkisinin İncelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Erzincan Binali Yıldırım Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzincan, 47s.
- Chen, Q., Long, D., Chen, L., Liu, X., Liang, X., Qiao, W., & Ling, L. (2011). Synthesis of ultrahigh-pore-volume carbon aerogels through a “reinforced-concrete” modified sol-gel process. *Journal Of Non-Crystalline Solids*, 357(1), 232-235.
- Chesterman, C. W. Industrial minerals and rocks. AIME, New York (1975).
- Ciullo P.A. (1996). Industrial Minerals and their Uses: a Handbook and Formulary. William Andrew.

- Çağlar, A. (2018). *Geleneksel Kastamonu Evlerinde Kullanılan Harman Tuğlası Özelliklerinin Bor Atığı Katkısı İle İyileştirilmesi Üzerine Deneysel Araştırma*, Doktora Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya, 74s.
- Çağlar, A. (2023). Bor Atıklarından Üretilen Silika Aerojelin Çevre Dostu Tuğlaların Basınç Dayanımına ve Isıl Performansına Etkileri. *Türk Doğa ve Fen Dergisi*, 12(3), 24-32.
- Çağlar, A. (2024). Use of Granular Aerogel in Lightweight Blend Brick: On Thermal Properties and Compressive Strenght. *Sürdürülebilir Mühendislik Uygulamaları ve Teknolojik Gelişmeler Dergisi*, 7(2), 197-206.
- Çağlar, H. (2021). Investigation of the effect of fly ash and boron waste additive on brick structure material. *Türk Doğa ve Fen Dergisi*, 10(1), 137-143.
- Çalık, A. (2002). Türkiye'nin bor madenleri ve özellikleri. *Mühendis ve Makine Dergisi*, 508, 36-41.
- Çavdaroglu, C. (2025). *Doğal Genleşmiş Perlit Ve Lignoselüloz Dolgulu Epdm Kauçuk Kompozitlerin Geliştirilmesi Ve Karakterizasyonu*, Doctoral Thesis, Sakarya University Institute Of Science, Sakarya, 40s.
- Çelik, A. G. (2015). Investigation on characteristic properties of potassium borate and sodium borate blended perlite bricks. *Journal of Cleaner Production*, 102, 88-95.
- Çelik, E. (2020). Synthesis of Graphene Aerogel and Its Applications. Master's Thesis, Koç University Graduate School of Sciences and Engineering, İstanbul.
- Çiçek, B. (2013). *Development Of Glass-Ceramics From Combination Of Industrial Wastes With Boron Mining Waste*, Doctoral Thesis, Alma Mater Studiorum – Università di Bologna, İtalya, 32s.
- Çimen, S., Çağlar, H., Çağlar, A., & Can, Ö. (2020). Effect of boron wastes on the engineering properties of perlite based brick. *Türk Doğa ve Fen Dergisi*, 9(2), 50-56.
- Çok, G., Erdinç, M., Erdinç, E. (2003). Mesleki perlit maruziyetinde bronkoalveoler lavaj sıvısı ve difüzyon kapasitesi sonuçları. *Solunum Hastalıkları*, 14(3), 165-168.
- Demir, İ., Başpınar, S., & Kahraman, E. (2017, March). Production of insulations and construction materials from expanded perlite. In *International Sustainable Buildings Symposium* (pp. 24-32). Cham: Springer International Publishing.
- Dheyaaldin, M. H., Mosaberpanah, M. A., & Alzebaree, R. (2022). Performance of fiber-reinforced alkali-activated mortar with/without nano silica and nano alumina. *Sustainability*, 14(5), 2527.

- Dorcheh, A. S., & Abbasi, M. H. (2008). Silica aerogel; synthesis, properties and characterization. *Journal Of Materials Processing Technology*, 199(1-3), 10-26.
- Dos Santos, W. N. (2008). Advances on the hot wire technique. *Journal of the European Ceramic Society*, 28(1), 15-20.
- DPT (Devlet Planlama Teşkilatı), (2001), Madencilik Özel İhtisas Komisyonu Raporu, Sekizinci Beş Yıllık (2001-2005) Kalkınma Planı, DPT: 2617-ÖİK: 628, Ankara, 73s.
- Du, A., Zhou, B., Zhang, Z., & Shen, J. (2013). A special material or a new state of matter: a review and reconsideration of the aerogel. *Materials*, 6(3), 941-968.
- Elbeyli, Y., Kalpaklı, Y., Gülen, J., Pişkin, M., & Pişkin, M. (2004, September). Utilization of borax waste as an additive in building brick production. In *Proceedings of the International Boron Symposium* (pp. 23-25).
- Ekin, G., & Toklu, E. (2020). Analysis of heat transfer properties and advantages of perlite-filled insulation bricks. *Journal of Engineering Research and Applied Science*, 9(2), 1588-1596.
- Etimaden, (2019). Boron minerals. (n.d.). Retrieved April 19, 2019, from <http://www.etimaden.gov.tr/en/boron-minerals>.
- Evcin, A., Ersoy, B., & Çiftçi, H. (2019). Utilization of marble and boron waste in brick products. *International Journal of Computational and Experimental Science and Engineering*, 5(1), 19-22.
- Fikry, M., Herranz, J., Leisibach, S., Khavlyuk, P., Eychmüller, A., & Schmidt, T. J. (2023). PEMFC-Performance of Unsupported Pt-Ni Aerogel Cathode Catalyst Layers under Automotive-Relevant Operative Conditions. *Journal of The Electrochemical Society*, 170(11), 114524.
- Frost, R. L., Scholz, R., Ruan, X., & Lima, R. M. F. (2016). Thermal analysis and infrared emission spectroscopy of the borate mineral colemanite ($\text{CaB}_3\text{O}_4(\text{OH})_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$): Implications for thermal stability. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 124(1), 131–135.
- Ganobjak, M., & Kralova, E. (2017, October). Impact Verification of Aerogel Insulation Paint on Historic Brick Facades. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 245(8), p. 082021). IOP Publishing.
- Ganobjak, M., & Carstensen, J. V. (2019, November). Topology-optimized insulating facebrick with aerogel filling. In *Journal of Physics: Conference Series* 1343(1) 012195. IOP Publishing.

- Ganobjak, M., Brunner, S., & Wernery, J. (2020). Aerogel materials for heritage buildings: Materials, properties and case studies. *Journal of Cultural Heritage*, 42, 81-98.
- Ganobjak, M., Malfait, W. J., Just, J., Käppeli, M., Mancebo, F., Brunner, S., & Wernery, J. (2023). Get the light & keep the warmth-A highly insulating, translucent aerogel glass brick for building envelopes. *Journal of Building Engineering*, 64, 105600.
- García-González, C. A., Sosnik, A., Kalmár, J., De Marco, I., Erkey, C., Concheiro, A., & Alvarez-Lorenzo, C. (2021). Aerogels in drug delivery: From design to application. *Journal of Controlled Release*, 332, 40-63.
- Georgiev, A., Yoleva, A., Djambazov, S., Dimitrov, D., & Ivanova, V. (2018). Effect of expanded vermiculite and expanded perlite as pore forming additives on the physical properties and thermal conductivity of porous clay bricks. *Journal of Chemical Technology and Metallurgy*, 53(2), 275-280.
- Gu, X., & Ling, Y. (2024). Research progress of aerogel materials in the field of construction. *Alexandria Engineering Journal*, 91, 620-631.
- Guilminot, E., Fischer, F., Chatenet, M., Rigacci, A., Berthon-Fabry, S., Achard, P., & Chainet, E. (2007). Use of cellulose-based carbon aerogels as catalyst support for PEM fuel cell electrodes: Electrochemical characterization. *Journal of Power Sources*, 166(1), 104-111.
- Gül, D. (2016). *Characterization and Expansion Behaviour of Perlite*, Master's Thesis, The Graduate School of Engineering and Sciences of İzmir Institute of Technology, İzmir, 65s.
- Güneri, E. (2022). *Development Of Thermally Resistant Soil Material With Pumice, Perlite And Fiber Glass Additives*, PhD. Thesis, Graduate School of Natural and Applied Sciences of Dokuz Eylul University, İzmir, 32s.
- Güyagüler, T. (2001). Türkiye bor potansiyeli, 4. Endüstriyel Hammaddeler Sempozyumu, 18-19.
- Hamza, A., & Kocserha, I. (2020, April). The effect of expanded perlite on fired clay bricks. In *Journal of Physics: Conference Series* 1527(1), p. 012032). IOP Publishing.
- Hu, L., He, R., Lei, H., & Fang, D. (2019). Carbon aerogel for insulation applications: a review. *International Journal of Thermophysics*, 40(4), 39.

- Hussain, A. A., Kamran, K., Ishaq, M., Akram, A., & Hina, M. (2023). Optimization of electroosmotic flow to enhance the removal of contaminants from low-permeable soils. *Journal of Applied Electrochemistry*, 53(6), 1245-1258.
- Inkson, B. J. (2016). Scanning electron microscopy (SEM) and transmission electron microscopy (TEM) for materials characterization. In *Materials characterization using nondestructive evaluation (NDE) methods* (pp. 17-43). Woodhead publishing.
- Ishaq, M., Ali, A., Hussain, A. A., Kamran, K., Ghuffar, A., & Anwar, A. (2025). Industrial waste as clay substitute in brick manufacturing. *Construction and Building Materials*, 477, 141359.
- Ismael, S.N.I. (2025). *Utilization Of New Perlite Aggregate Strengthened By Cold-Bonding Process In Lightweight Self-Compacting Concrete Production*, Master Thesis, Harran University Graduate School Of Natural And Applied Sciences, Şanlıurfa, 55s.
- İpekoğlu, Ü., & Polat, M.. (1987). Bor Endüstrisine Genel Bakış. *Madencilik*, 26(1), 1-25.
- Jedidi, M., Benjeddou, O., & Soussi, C. (2015). Effect of expanded perlite aggregate dosage on properties of lightweight concrete. *Jordan Journal of Civil Engineering*, 9(3), 278-291.
- Jin, R., Zhou, Z., Liu, J., Shi, B., Zhou, N., Wang, X., Jia, X., Guo, D. & Xu, B. (2023). Aerogels for thermal protection and their application in aerospace. *Gels*, 9(8), 606.
- Joo, P., Yao, Y., Teo, N., & Jana, S. C. (2021). Modular aerogel brick fabrication via 3D-printed molds. *Additive Manufacturing*, 46, 102059.
- Kabra, S., Katara, S., & Rani, A. (2013). Characterization and study of Turkish perlite. *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*, 2(9), 4319-4326.
- Kale Perlit, (2025). <https://www.kaleperlit.com.tr/>. Erişim Tarihi: 20.07.2025.
- Kalkınma Bakanlığı, Madencilik Politikaları Özel İhtisas Komisyonu Raporu, 2018
- Karadağlı, E. (2019). *Utilization Of Boron Mining And Enrichment Wastes In The Production Of Ceramics And Frits*, Master's Thesis, Yıldız Technical University Graduate School Of Natural And Applied Sciences, İstanbul, 45-51s.
- Karaman, S, Karaipekli, A., Sari, A., & Biçer, A. (2011). Polyethylene Glycol (PEG)/Diatomite Composite as A Novel Form-Stable Phase Change Material for Thermal Energy Storage. *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 95, 1647-1653.

- Kavas, T. (2006). Use of boron waste as a fluxing agent in production of red mud brick. *Building and Environment*, 41(12), 1779-1783.
- Kaya, E. S. (2019). *Ham Perlit Ve Genleştirilmiş Perlitin Puzolanik Malzeme Olarak Kullanılabilirliği*. Yüksek Lisans Tezi, Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Balıkesir, 92s.
- Kıpçak, S.A. (2009). *Bazı Bor Bileşiklerinin Nötron Zırhlamasında Kullanılabilirliğinin Araştırılması*, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 10-11s.
- Kilicarslan, A., Kurttepli, Y., & Saridede, M. N. (2013). Using of boron wastes in red brick production. *Advanced Materials Research*, 699, 223-227.
- Kim, S. J., Chase, G., & Jana, S. C. (2016). The role of mesopores in achieving high efficiency airborne nanoparticle filtration using aerogel monoliths. *Separation and Purification Technology*, 166, 48-54.
- Kistler, S. S. (2002). Coherent expanded-aerogels. *The Journal of Physical Chemistry*, 36(1), 52-64.
- Kopar, İ., & Polat, P. (2020). Molla Tepe (Mollaköy-Erzincan) perlitik volkan konisi'nin jeolojik-jeomorfolojik özellikleri ve Molla Tepe perlitinin endüstriyel madde olarak değerlendirilmesi. *Atatürk Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, 24(3), 1529-1554.
- Künkül, A., Yapici, S., Kocakerim, M. M., & Copur, M. (1997). Dissolution kinetics of ulexite in ammonia solutions saturated with CO₂. *Hydrometallurgy*, 44(1-2), 135-145.
- La Rubia-García, M. D., Yebra-Rodríguez, Á., Eliche-Quesada, D., Corpas-Iglesias, F. A., & López-Galindo, A. (2012). Assessment of olive mill solid residue (pomace) as an additive in lightweight brick production. *Construction and Building Materials*, 36, 495-500.
- Lashen, Z. M., Shams, M. S., El-Sheshtawy, H. S., Slaný, M., Antoniadis, V., Yang, X., ... & Elmahdy, S. M. (2022). Remediation of Cd and Cu contaminated water and soil using novel nanomaterials derived from sugar beet processing-and clay brick factory-solid wastes. *Journal of Hazardous Materials*, 428, 128205.
- Law Yim Wan, D. S., Aslani, F., & Ma, G. (2018). Lightweight self-compacting concrete incorporating perlite, scoria, and polystyrene aggregates. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 30(8), 04018178.

- Le, C. T., Truong, T. Q., Nguyen, D. P. T., Bui, N. T. K., Goh, X. Y., Huynh, H. K. P., Nguyen, A.T., Phan, A.N., Ngo, T.M. & Nguyen, S. T. (2024). Advanced aerogels from waste tires and coal ash for thermal and acoustic insulation applications- insights into the effect of synthesis conditions and precursors contents on aerogel characteristics. *Journal of Porous Materials*, 31(1), 335-350.
- Li, V. C., & Qian, S. (2008). Simplified inverse method for determining the tensile properties of strain hardening cementitious composites. *Advanced Concrete Technology*, 6(2), 353-363.
- Li, W., Reichenauer, G., & Fricke, J. (2002). Carbon aerogels derived from cresol–resorcinol–formaldehyde for supercapacitors. *Carbon*, 40(15), 2955-2959.
- Liu, J., Dong, Y., Dong, X., Hampshire, S., Zhu, L., Zhu, Z., & Li, L. (2016). Feasible recycling of industrial waste coal fly ash for preparation of anorthitecordierite based porous ceramic membrane supports with addition of dolomite. *Journal of the European Ceramic Society*, 36(4), 1059–1071.
- Long, J. W., & Rolison, D. R. (2007). Architectural design, interior decoration, and three-dimensional plumbing en route to multifunctional nanoarchitectures. *Accounts of Chemical Research*, 40(9), 854-862.
- Maaloufa, Y., Mounir, S., Khabbazi, A., & Kettar, J. (2016). Effect of Calcination on the Thermal Properties of Bricks Done From Clay-Expanded Perlite on Insulating Walls. *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology*, 12(3), 304-311.
- Makrygiannis, I., & Tsetsekou, A. (2022). Effect of expanded perlite in the brick mixture on the physicochemical and thermal properties of the final products. *Journal of Composites Science*, 6(7), 211.
- Marin, M. A., Malleshally, R. R., & McHugh, M. A. (2014). Silk fibroin aerogels for drug delivery applications. *The Journal of Supercritical Fluids*, 91, 84-89.
- Maxim, L. D., Niebo, R., & McConnell, E. E. (2014). Perlite toxicology and epidemiology—a review. *Inhalation Toxicology*, 26(5), 259-270.
- Mazın, A.K.M. (2024). *Silika Aerojel ve Pirinç Kabuğu Külünün Tuğla Özelliklerine Etkisi*, Yüksek Lisans Tezi, Kırşehir Ahi Evran Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kırşehir, 22-28s.
- Mekonnen, B. T., Ragothaman, M., Kalirajan, C., & Palanisamy, T. (2016). Conducting collagen-polypyrrole hybrid aerogels made from animal skin waste. *RSC Advances*, 6(67), 63071-63077.

- Merli, F., Greco, P. F., Susta, S., & Buratti, C. (2025). Clay-Aerogel Mixtures for Bricks Fabrication: Experimental Characterization and Thermal Performance Simulation. Available at SSRN 5044098.
- Merzbacher, C. I., Meier, S. R., Pierce, J. R., & Korwin, M. L. (2001). Carbon aerogels as broadband non-reflective materials. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 285(1-3), 210-215.
- Mohamed, E. H. (2025). Enhancing mud brick sustainability using nanomaterials for restoration adobe enclosure of Dendera Temple, Qena, Egypt. *Materials Sciences and Applications*, 16(6), 307-326.
- Mohajerani, A., Kadir, A. A., & Larobina, L. (2016). A practical proposal for solving the world's cigarette butt problem: Recycling in fired clay bricks. *Waste Management*, 52, 228-244.
- MTA. (1985). Türkiye Perlit Envanteri. Ankara: Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü Yayınları.
- MTA, (2025). https://www.mta.gov.tr/v3.0/sayfalar/hizmetler/images/b_h/perlit_pomza.jpg. Erişim Tarihi:20.07.2025.
- Murımı, M. (2020). *Synthesis and Characterization of Perlite Filled Bio-Based Polyurethane Composites with Low Thermal Conductivity*, Master Thesis, Istanbul University-Cerrahpasa Institute Of Graduate Studies, İstanbul, 20-24s.
- Olsson, J. A., Hafez, H., Miller, S. A., & Scrivener, K. L. (2025). Greenhouse gas emissions and decarbonization potential of global fired clay brick production. *Environmental Science & Technology*, 59(4), 1909-1920.
- Özbakır, Y. (2018). *Development of Aerogel Based Optofluidic Microreactors*, Doctoral Thesis, Koç University Graduate School of Sciences and Engineering, İstanbul, 11-17s.
- Özorak, C., (2014). *Bor Atığı Katkılı Polimer Kompozitlerin Aşınma Ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Afyon, 45-49s.
- Papa, E., Medri, V., Murri, A. N., Laghi, L., De Aloysio, G., Bandini, S., & Landi, E. (2018). Characterization of alkali bonded expanded perlite. *Construction and Building Materials*, 191, 1139-1147.
- Pazar, Y. (2025). *Perlit Tabanlı Hafif Betonlarda Granüler Aerojelin Kullanılabilirliği*, Kırşehir Ahi Evran Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kırşehir, 30-33s.

- Pehlivan, Y., & Çetinkaya, M. (2004). Bor ve temiz enerji, *Aydınlanma* 1923. 49, 31–38.
- Pekala, R. W. (1989). Organic aerogels from the polycondensation of resorcinol with formaldehyde. *Journal of Materials Science*, 24(9), 3221-3227.
- Perlite Institute, 2022.
- Pieber, B., Shalom, M., Antonietti, M., Seeberger, P. H., & Gilmore, K. (2018). Continuous heterogeneous photocatalysis in serial micro-batch reactors. *Angewandte Chemie International Edition*, 57(31), 9976-9979.
- Pierre, A.C. “History of Aerogels,” in *Aerogels Handbook*, 2011.
- Pone, E., Dubois, C., Guo, N., Gao, Y., Dupuis, A., Boismenu, F., ... & Skorobogatiy, M. (2006). Drawing of the hollow all-polymer Bragg fibers. *Optics Express*, 14(13), 5838-5852.
- Raji, M., Nekhlaoui, S., El Hassani, I. E. E. A., Essassi, E. M., Essabir, H., Rodrigue, D., ... & el Kacem Qaiss, A. (2019). Utilization of volcanic amorphous aluminosilicate rocks (perlite) as alternative materials in lightweight composites. *Composites Part B: Engineering*, 165, 47-54.
- Raut, S. P., Ralegaonkar, R. V., & Mandavgane, S. A. (2011). Development of sustainable construction material using industrial and agricultural solid waste: A review of waste-create bricks. *Construction and Building Materials*, 25(10), 4037-4042.
- Riffat, S. B., & Qiu, G. (2013). A review of state-of-the-art aerogel applications in buildings. *International Journal of Low-Carbon Technologies*, 8(1), 1-6
- Roskill, “The Economics of Boron,” London, 1999.
- Rubin, M., & Lampert, C. M. (1983). Transparent silica aerogels for window insulation. *Solar Energy Materials*, 7(4), 393-400.
- Sallı Bideci, Ö. (2016). The effect of high temperature on lightweight concretes produced with colemanite coated pumice aggregates. *Construction and Building Materials*, 113, 631–640.
- Samart, N., Thapo, R., & Unchai, T. (2015). Developing of Clay Bricks Quality into Community Standard Product using Rice Husk Ash and Perlite. *Engineering Transactions: A Research Publication of Mahanakorn University of Technology*, 18(2), 134-139.

- Sarıağaç, G., (2012). *Kırka Tinkal Bor Atıklarından Gözenekli Agregat Üretimi Ve Uygulamaları*, Yüksek Lisans Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Afyon, 17-20s.
- Sarıhan, E. "Bor Sektör Profili," İstanbul Ticaret Odası, 2006.
- Sari, D., & Pasamehmetoglu, A. G. (2005). The effects of gradation and admixture on the pumice lightweight aggregate concrete. *Cement and Concrete Research*, 35(5), 936-942.
- Schmidt-München, M. (2007). The chemistry of borates, Part I, von P. H. Kemp., London 1956: Borax Consolidated Ltd.
- Silvestru, V. A., Bianchi, C., Wernery, J., & Ganobjak, M. (2024). Structural assessment of translucent walls built with a novel type of insulating aerogel-filled glass bricks. *Glass Structures & Engineering*, 9(2), 229-250.
- Shah, M. A. A., Adnan, S. H., Osman, M. H., Jeni, M. L. A., Jamellodin, Z., & Hamid, N. A. A. (2020). Sand Brick Using Perlite as a Cement Replacement. *Progress in Engineering Application and Technology*, 1(1), 142-150.
- Shanmugam, G., Gunasekaran, E., Karuppusamy, R. S., Ramesh, R., & Vellaichamy, P. (2020, November). Utilization of aerogel in building construction—A Review. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 955, No. 1, p. 012032). IOP Publishing.
- Shubhananda Rao, P., & Chandar, K. R. (2021). Development of energy efficient organic bricks in construction using IOT and perlite. *International Journal of Sustainable Engineering*, 14(4), 865-873.
- Smirnova, I., & Gurikov, P. (2017). Aerogels in chemical engineering: Strategies toward tailor-made aerogels. *Annual Review of Chemical and Biomolecular Engineering*, 8(1), 307-334.
- Song, Z., Su, L., Yuan, M., Shang, S., & Cui, S. (2024). Self-cleaning, energy-saving aerogel composites possessed sandwich structure: Improving indoor comfort with excellent thermal insulation and acoustic performance. *Energy and Buildings*, 310, 114098.
- Stefanidou, M., Pachta, V., & Konstantinidis, G. (2023). Exploitation of waste perlite products in lime-based mortars and grouts. *Sustainable Chemistry and Pharmacy*, 32, 101024.
- Sugozu, I., Mutlu, I., & Sugozu, K. B. (2016). The effect of ulexite to the tribological properties of brake lining materials. *Polymer Composites*, 39(1).

- Sutcu, M., Alptekin, H., Erdogmus, E., Er, Y., & Gencel, O. (2015). Characteristics of fired clay bricks with waste marble powder addition as building materials. *Construction and Building Materials*, 82, 1-8.
- Sutcu, M., Ozturk, S., & Gencel, O. (2023). Synergic effect of recycled paper sludge and expanded perlite on the engineering properties of porous clay bricks: A new mathematical modelling approach. *Construction and Building Materials*, 370, 130450.
- Tabata, M., Adachi, I., Kawai, H., Kubo, M., & Sato, T. (2012). Recent progress in silica aerogel Cherenkov radiator. *Physics Procedia*, 37, 642-649.
- Ting, W., Qingshan, W., Shenao, C., Haihe, Y., Tian, S., & Zhenyu, T. (2023). Effects of nanomaterials reinforced aggregate on mechanical properties and microstructure of recycled brick aggregate concrete. *Materials Science*, 29(3), 347-355.
- TS EN 772-1+A1 (2015), Kâğır birimler - Deney yöntemleri - Bölüm 1: Basınç dayanımının tayini, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 772-11 (2012), Kâğır birimler - Deney yöntemleri - Bölüm 11: Betondan, gazbetondan, yapay ve doğal taştan yapılmış kâğır birimlerde kapiler su emme ve kil kâğır birimlerde ilk su emme hızının tayini, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 772-13 (2002), Kağır birimler - Deney metotları - Bölüm 13: Kağır birimlerin net ve brüt kuru birim hacim kütlelerin tayini (doğal taş hariç), Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- Topçu, İ.B., Işıkdag, B. (2008). Effect of expanded perlite aggregate on the properties of lightweight concrete. *Journal of Materials Processing Technology* (204), 34-38.
- Ulker, Z., & Erkey, C. (2014). An emerging platform for drug delivery: Aerogel based systems. *Journal of Controlled Release*, 177, 51-63.
- Ulusal Bor Araştırma Enstitüsü (Boren). Boron minerals. (n.d.). Retrieved April 8, 2019, from <https://www.boren.gov.tr/pages/boron-minerals/102>.
- Uslu, T. & Arol, A. I. (2004). Use of boron waste as an additive in red bricks. *Waste Management*, 24(2), 217-220.
- Ülker, Z. (2011). *Preparation and Characterization of Silica Aerogel Polymer Composites*, Master's Thesis, Koç University Graduate School of Sciences and Engineering, İstanbul, 25-27s.
- Varamesh, A., Zhu, Y., Hu, G., Wang, H., Rezania, H., Li, Y., ... & Hu, J. (2024). Fully biobased thermal insulating aerogels with superior fire-retardant and mechanical properties. *Chemical Engineering Journal*, 495, 153587.

- Web ileti 1, (2025). Bor atomu. (<https://www.dreamstime.com/stock-illustration-boron-d-render-atomstructure-boron-isolated-over-white-background-protons-represented-as-red-spheres-neutron-as-yellow-image89682672>). Erişim Tarihi: 07.07.2025.
- Web ileti 2, (2025). <https://yenidunyadergisi.com/blog/bor-ve-tarihcesi>, Erişim Tarihi: 07.08.2025.
- Web ileti 3, <https://www.madenbilgi.com/boraks-tinkal-nedir-nerelerde-bulunur/>. Erişim Tarihi: 08.08.2025.
- Web ileti 4, <https://www.madenbilgi.com/kernit-razorit-nedir-nerelerde-bulunur/>. Erişim Tarihi: 08.08.2025.
- Web ileti 5, <https://ybm.org.tr/ybm/product/uleksit-4/>. Erişim Tarihi: 17.08.2025.
- Web ileti 6, <https://sberatemineralu.cz/de/eshop/herkunft/europa/probertit/>. Erişim Tarihi: 17.08.2025.
- Web ileti 7, https://indafelhayat.com/urun/kolemanit-bor-kristali/?srsltid=AfmBOorT-W5D3_HpaGjZ5ckECXpfoPvVI9AxSfiv1bW7iWibs_HkWCOM#&gid=1&pid=1. Erişim Tarihi: 21.08.2025.
- Web ileti 8. <https://www.madenbilgi.com/pandermit-priseit-nedir-nerelerde-bulunur/>. Erişim Tarihi: 21.08.2025.
- Wells, O.C (1974). Scanning Electron Microscopy, McGraw-Hill, New York.
- Wernery, J., Ben-Ishai, A., Binder, B., & Brunner, S. (2017). Aerobrick—An aerogel-filled insulating brick. *Energy Procedia*, 134, 490-498.
- WHO (World Health Organization), Guidelines for Drinking Water Quality, 2nd ed. Addendum to Vol. 2. Health Criteria and Other Supporting Information, Geneva(1998).
- Wolska, J., & Bryjak, M. (2013). Methods for boron removal from aqueous solutions—A review. *Desalination*, 310, 18-24.
- Wu, C., Wang, L., Yan, X., Huang, H., Pan, Y., Wang, H., Wang, W., Yuan, S., Fan, J., Jin, X., Hong, C. & Zhang, X. (2024). Environmental-friendly and fast production of ultra-strong phenolic aerogel composite with superior thermal insulation and ablative-resistance. *Composites Science and Technology*, 256, 110776.
- Xia, Y., Liu, Z., Huan, C., Song, Z., Guan, Y., Huang, G., ... & Yan, J. (2025). Upcycling MSWI fly ash leachate as a novel modifier in low-carbon cement-free binders. *Construction and Building Materials*, 460, 139785.

- Yang, K. L., Ying, T. Y., Yiacoumi, S., Tsouris, C., & Vittoratos, E. S. (2001). Electrosorption of ions from aqueous solutions by carbon aerogel: an electrical double-layer model. *Langmuir*, 17(6), 1961-1969.
- Yang, Q., Tan, X., Wang, S., Zhang, J., Chen, L., Zhang, J. P., & Su, C. Y. (2014). Porous organic–inorganic hybrid aerogels based on bridging acetylacetonate. *Microporous and Mesoporous Materials*, 187, 108-113.
- Yigitbasoglu, H. (2004). An important ore for turkey: Boron. *Coğrafi Bilimler Dergisi*, 2(2), 13–25
- Yim, T. J., Kim, S. Y., & Yoo, K. P. (2002). Fabrication and thermophysical characterization of nano-porous silica-polyurethane hybrid aerogel by sol-gel processing and supercritical solvent drying technique. *Korean Journal of Chemical Engineering*, 19(1), 159-166.
- Yu, W., Guo, H., Liu, Y., Zhou, Y., Xiao, Y., Bai, J., ... & Gao, H. (2025). Development of hydroxyapatite-based Carboxymethylcellulose-Al (III) aerogel beads for efficient and selective defluorination from brick tea infusions. *Carbohydrate Polymers*, 123802.
- Yue, J., Guo, Z., Zhao, L., Deng, Q., & Li, Y. (2025). Experimental Study on Silica-based Prepolymer Solution Aerogel Modification of Gray Bricks. *Journal of Building Engineering*, 112977.
- Yüksel, Z. (2024). *Genleştirilmiş Perlit/Kaprik Asit Kompoziti İçeren Köpük Betonların Üretimi, Karakterizasyonu Ve Termoregülasyon Performanslarının İncelenmesi*, Bartın Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Bartın, 58s.
- Zhai, C., & Jana, S. C. (2017). Tuning porous networks in polyimide aerogels for airborne nanoparticle filtration. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 9(35), 30074-30082.
- Zhang, L. (2013). Production of bricks from waste materials—A review. *Construction And Building Materials*, 47, 643-655.
- Zhang, X., Su, W., Lin, M., Miao, X., Ye, L., Yang, W., & Jiang, B. (2015). Non-supercritical drying sol–gel preparation of superhydrophobic aerogel ORMOSIL thin films with controlled refractive index. *Journal of Sol-Gel Science and Technology*, 74(3), 594-602.
- Zuo, L., Zhang, Y., Zhang, L., Miao, Y. E., Fan, W., & Liu, T. (2015). Polymer/carbon-based hybrid aerogels: preparation, properties and applications. *Materials*, 8(10), 6806-6848.



ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER	
Adı Soyadı:	Serkan Ünal
Uyruğu:	T.C.
Orcid Numarası:	0009-0004-8432-6127

EĞİTİM BİLGİLERİ	
Lisans	
Üniversite:	Şırnak Üniversitesi
Fakülte:	Mühendislik Fakültesi
Bölümü:	İnşaat Mühendisliği
Mezuniyet Yılı:	2021
Yüksek Lisans	
Üniversite:	Kırşehir Ahi Evran Üniversitesi
Enstitü:	Fen Bilimleri Enstitüsü
Anabilim Dalı:	İnşaat Mühendisliği
Mezuniyet Yılı:	2025

Tezden Üretilen Makaleler ve Bildiriler
Ünal, S., Çağlar, H., Çağlar, A., (2025), Usability Of Aerogel And Boron Wastes In Building Material Production: A Compilation, <i>I. International Warsaw Scientific Research And Innovation Congress</i> , 2025.