Kompozit Seramiklerin Üretilmesi ve Karakterizasyonu

Buse Erdoğan

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı

Şubat 2026

Production and Characterization of Composite Ceramics

Buse Erdoğan

MASTER OF SCIENCE THESIS

Department of Chemical Engineering

February 2026

Kompozit Seramiklerin Üretilmesi ve Karakterizasyonu

Buse Erdoğan

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliği Uyarınca
Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı
Kimyasal Teknolojiler Bilim Dalında
YÜKSEK LİSANS TEZİ
olarak hazırlanmıştır.

Danışman: Prof. Dr. Demet Topaloğlu Yazıcı

Şubat 2026

ONAY

Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı Yüksek Lisans öğrencisi Buse Erdoğan'ın YÜKSEK LİSANS tezi olarak hazırladığı "Kompozit Seramiklerin Üretilmesi ve Karakterizasyonu" başlıklı bu çalışma, jürimizce lisansüstü yönetmeliğin ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek oybirliği ile kabul edilmiştir.

Danışman **:** Prof. Dr. Demet Topaloğlu Yazıcı

İkinci Danışman **: -**

Yüksek Lisans Tez Savunma Jürisi:

Üye : Prof. Dr. Demet Topaloğlu Yazıcı

Üye : Prof. Dr. Hande Çelebi

Üye : Doç. Dr. Musa Şölener

Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun ..... tarih ve ..... sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Prof. Dr. Fatma TÜMSEK
Enstitü Müdürü

ETİK BEYAN

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kılavuzuna göre, Prof. Dr. Demet Topaloğlu Yazıcı danışmanlığında hazırlamış olduğum "Kompozit Seramiklerin Üretilmesi ve Karakterizasyonu" başlıklı Yüksek Lisans tezimin özgün bir çalışma olduğunu; tez çalışmamın tüm aşamalarında bilimsel etik ilke ve kurallarına uygun davrandığımı; tezimde verdiğim bilgileri, verileri akademik ve bilimsel ilke ve kurallara uygun olarak elde ettiğimi; tez çalışmamda yararlandığım eserlerin tümüne atıf yaptığımı ve kaynak gösterdiğimi ve bilgi, belge ve sonuçları bilimsel etik ilke ve kurallara göre sunduğumu beyan ederim. 19/02/2026

Buse Erdoğan

T.C.
ESKİŞEHİR OSMANGAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ÜRETKEN YAPAY ZEKÂ KULLANIMI BEYAN FORMU

Bu tezi/projeyi hazırlarken aşağıdaki Üretken Yapay Zekâ (ÜYZ) araçlarından destek aldığımı beyan ederim:

Aşağıdaki ÜYZ araçlarını kullandım. (Birden fazla seçenek işaretlenebilir)

☐ Claude
■ ChatGPT
☐ DeepSeek
☐ Gemini
☐ Copilot
☐ Diğer (Belirtiniz): .....

ÜYZ araçlarını tezimin/projemin aşağıdaki aşamalarında ilgili amaçlar için kullandım. (Birden fazla seçenek işaretlenebilir**.**

☐ Metin oluşturma
☐ Literatür tarama
■ Çeviri
☐ Düzenleme/dil kontrolü
☐ Veri işleme ve analizi
☐ Veri görselleştirme
☐ Görüntü üretme
☐ Kaynakça düzenleme
☐Diğer (Belirtiniz): ……

Bu çalışmada ÜYZ kullanımı ***Yükseköğretim Kurumları Bilimsel Araştırma ve Yayın Faaliyetlerinde Üretken Yapay Zekâ Kullanımına Dair Etik Rehber***'e ve akademik dürüstlük ilkelerine uygun şekilde gerçekleştirilmiş olup ÜYZ araçlarından alınan destek etik kurallar ve kaynak gösterme esaslarına uygun biçimde belirtilmiştir.

ÜYZ araçlarının sağladığı bilgilerin doğruluğunu kontrol ettiğimi, yanlış veya eksik bilgi bulunması halinde tüm sorumluluğun tarafıma ait olduğunu; ayrıca çalışmamla ilgili bu beyana aykırı bir durumun herhangi bir zamanda tespit edilmesi durumunda ortaya çıkabilecek akademik ve hukuki sonuçları kabul ettiğimi beyan ederim.

Buse Erdoğan
19/02/2026

ÖZET

Seramik karolar, yapı sektöründe iç ve dış mekanlarda yaygın bir şekilde kullanılan malzemelerdir. Bu ürünlerin üretim süreçlerinde ortaya çıkan atıkların değerlendirilmemesi, çevresel anlamda kirliliğe yol açmakta ve işletmeler için önemli bir ekonomik yük oluşturmaktadır. Bu çalışma, endüstriyel seramik üretiminde hammadde maliyetlerinde hedeflenen iyileşme ve artan çevre bilinciyle uyumlu üretim süreçlerinin geliştirilmesi amacıyla planlanmıştır.

Çalışma kapsamında; seramik karo gövde bileşimine, pişirim aşamasında kullanılan fırın rulo atığı ilave edilerek daha ekonomik ve atık bertarafını sağlayacak bir gövde hazırlanması planlanmıştır. Hazırlanan seramik karo gövdelerinin kullanım ömrünü ve yüzey aşınma direncini yükseltmek için ise yüzeylerine kaplama işlemi uygulanmıştır. Kaplama uygulama aşamasında öncelikle gövde yüzeyleri kimyasal olarak aşındırılmış, daha sonra epoksi ve silikon polimerleri ile kaplanmıştır. Hazırlanan seramik karo gövdelerine standart fiziksel testler uygulanmış, X-Işını Floresans Spektrometresi (XRF) analizi ile kimyasal analizleri, X-Işını Difraktometresi (XRD) analizi ile kristal faz analizleri ve deformasyon davranışını öngörmek amacı ile ısıl genleşme katsayısı ölçümü gerçekleştirilmiştir. Kaplanan seramik karo yüzeylerin temas açısı ölçülmüş, optik mikroskop ve Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) kullanılarak kesit görüntüleri alınmış, kaymazlık testi ve aşınma testi uygulanmıştır. Elde edilen bulgularda atık ilavesinin seramik gövde özelliklerinde gelişmelere yol açtığı ve standart aralıklara uyumlu değerler sergilediği tespit edilmiştir. Gerçekleştirilen analiz ve ölçümlerdeki sonuçlar göz önünde bulundurularak geliştirilen kompozit malzemenin sektörde üretilebilirliği değerlendirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Seramik Hammaddeleri, Karo, Sürdürülebilir Üretim, Yüzey Kaplamaları, Kompozit.

SUMMARY

Ceramic tiles are widely used materials both indoors and outdoors. The failure to utilize the waste generated during the production process of these products leads to environmental pollution and causes a significant economic burden for businesses. This study was planned with the aim of improving raw material costs in industrial ceramic production and developing production processes that are adaptable with increasing environmental awareness.

This study aims to prepare a more economical and environmentally less harmful ceramic tile body by adding kiln roller waste from the firing stage to the ceramic tile body composition. A coating process was applied to the surfaces of the prepared ceramic tile bodies to increase their lifetime and surface abrasion resistance. During the coating process, the body surfaces were first chemically etched and then coated with epoxy and silicone polymers. Standard physical tests were applied to the prepared ceramic tile bodies. Chemical analyses were performed using X-ray fluorescence spectrometry (XRF), crystal phase analyses were carried out using X-ray diffractometry (XRD), and thermal expansion measurements were taken to understand the deformation behavior. The prepared coated ceramic tile surfaces were examined by contact angle measurements, cross-sectional images were obtained using an optical microscope and a Scanning Electron Microscope (SEM), and slip resistance and abrasion tests were applied. The findings showed that the addition of the waste material improved some properties of the ceramic body and exhibited consistent values with standard ranges. Considering the analysis and measurement results, the industrial manufacturability of the developed composite material was evaluated.

Keywords: Ceramic Raw Materials, Tile, Sustainable Production, Surface Coatings, Composite.

TEŞEKKÜR

Araştırma sürecim boyunca beni destekleyen, kıymetli bilgi ve tecrübelerini paylaşan, çalışmam boyunca yanımda olan değerli danışmanım Prof. Dr. Demet Topaloğlu Yazıcı'ya, yüzey aşındırma/kaplama çalışmalarımda ve temas açısı ölçüm sürecinde beni yalnız bırakmayan değerli Arş. Gör. Fırat Yılmaz'a, temas açısı ölçümleri için cihazın kullanımına olanak sağlayan Prof. Dr. Ayşegül Aşkın'a,

Çalışma hayatımı ve akademik sürecimi bir arada yürütmeme büyük katkıda bulunan Seranit Granit Seramik San. ve Tic. A.Ş. Ar-Ge müdürüm Sn. Elif Ubay, Sn. Serdar Işıktaş başta olmak üzere tüm yöneticilerime ve laboratuvar sürecimde desteklerini esirgemeyen çalışma arkadaşlarıma,

Tez yazım sürecim boyunca tüm zor zamanlarımda desteğini hissettiğim değerli Oğuz Kaan Özgül'e,

Her daim arkamda duran çok kıymetli aileme sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET vii
SUMMARY viii
TEŞEKKÜR ix
İÇİNDEKİLER x
ŞEKİLLER DİZİNİ xiii
ÇİZELGELER DİZİNİ xv
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ xvi
1. GİRİŞ VE AMAÇ 1
2. SERAMİK KARO TEKNOLOJİSİ 3
2.1. Seramik Karo Üretim Süreci 4
2.1.1. Masse hazırlama 4
2.1.2. Şekillendirme 5
2.1.3. Kurutma 5
2.1.4. Sırlama 5
2.1.5. Pişirme 6
2.2. Seramik Karo Hammaddeleri 7
2.2.1. Massede kullanılan hammaddeler 7
2.2.2. Engop/Sırda kullanılan hammaddeler 9
2.3. Seramik Karolar ve Kompozit Malzemeler 10
2.3.1. Kompozit malzemeler 10
2.3.2. Seramik karolarda kompozit 12
3. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI 13
3.1. Atık Malzemelerin Seramik Karo Üretiminde Kullanımı 13
3.2. Seramik Karolarda Polimer Uygulamaları 15
3.3. Seramik Karolarda Kompozit Uygulamaları 16
4. MALZEME VE YÖNTEM 18
4.1. Kullanılan Malzemeler 18
4.2. Gövde Hazırlama 18
4.2.1. Hammadde hazırlama 18

4.2.2. Öğütme 19
4.2.3. Granül biçimine getirme 20
4.2.4. Şekillendirme 20
4.2.5. Sinterleme 20
4.3. Yüzey Kaplama 21
4.3.1. Kimyasal aşındırma işlemi 21
4.3.2. Kaplama işlemi 22
4.4. Seramik Karoların İncelenmesi 22
4.4.1. Yoğunluk ve viskozite ölçümü 22
4.4.2. Elek bakiye ölçümü 23
4.4.3. Boyut ölçümü 23
4.4.4. Mukavemet ölçümü 24
4.4.5. Nem ölçümü 24
4.4.6. Su emme ölçümü 24
4.4.7. Kızdırma kaybı ölçümü 25
4.4.8. Renk ölçümü 25
4.4.9. Isıl genleşme analizi 26
4.4.10. XRF analizi 27
4.4.11. XRD analizi 27
4.4.12. Temas açısı ölçümü 27
4.4.13. Kaymazlık (pendulum) testi 28
4.4.14. Aşınma testi 28
4.4.15. Optik mikroskop analizi 29
4.4.16. SEM analizi 30
5. BULGULAR VE TARTIŞMA 31
5.1. Seramik Çamurunun Fiziksel Özellikleri 33
5.2. Boyut Kararlılık Sonuçları 33
5.3. Mukavemet Ölçümleri 34
5.4. Nem Sonuçları 35
5.5. Su Emme Bulguları 36
5.6. Kızdırma Kaybı Ölçüm Sonuçları 36
5.7. Renk Değerlendirme Bulguları 37
5.8. Isıl Genleşme Katsayıları 38

5.9. XRF Analizi Sonuçları 39
5.10. XRD Analiz Bulguları 40
5.11. Temas Açısı Değerleri 41
5.12. Kaymazlık Testi Sonuçları 44
5.13. Aşınma Testi Sonuçları 45
5.14. Optik Mikroskop Görüntüleri 47
5.15. SEM Görüntüleri 48
6. SONUÇ VE ÖNERİLER 50
KAYNAKLAR DİZİNİ 52

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil **Sayfa**

2.1. Endüstriyel seramik karo pişiriminde kullanılan fırının temel aşamalarının şematik gösterimi. Seramik karolar, fırın ruloları ile taşınarak ilk olarak ısıtılır, sinterlenir ve soğutulur 6
2.2. Tek pişirim (monoporöz) seramik karoların yaklaşık sıcaklıklar ile belirtilen temel fırınlama aşamaları 7
4.1. Fırın rulolarının öğütülmesi işleminde kullanılan havan 19
4.2. Çalışma sürecinde kullanılan endüstriyel fırın rejimi eğrisi, ... 20
4.3. APTES molekülünün, aktivasyonunun ve hidroksillenmiş oksit yüzeyiyle reaksiyonunun şematik gösterimi 22
4.4. Renk ölçümü için kullanılan spektrofotometre cihazı 25
4.5. CIELAB renk uzayı diyagramı 26
4.6. Temas açısı ölçüm cihazı 28
4.7. Aşınma testi için kullanılan cihaz 29
5.1. a) Atık ilaveli (A) ve b) Standart (S) gövde örneklerinin görselleri 31
5.2. a) AS ve b) SS örneklerinin görselleri 32
5.3. a) AE ve b) SE örneklerinin görselleri 32
5.4. a) S ve b) A seramik karo gövdelerinin kesit görüntüleri 38
5.5. S gövdesinin XRD difraktogramı 40
5.6. A gövdesinin XRD difraktogramı 40
5.7. S karosunda damlanın ilerleyen zamanla (a) 0. s b) 0,5. s c) 1,5. s d) 2. s e) 2,5. s f) 4. s) değişen görüntüleri 41
5.8. A karosunda damlanın ilerleyen zamanla (a) 0. s b) 0,5. s c) 1,5. s d) 2. s e) 2,5. s f) 4. s) değişen görüntüleri 42
5.9. Örneklerin (a) SE b) AE c) SS d) AS) üzerinde damla görüntüleri 43
5.10. Kaymazlık test düzeneğine yerleştirilmiş SE örneği 44
5.11. 600 devirde aşınma testi için cihaza yerleştirilen örnekler 45
5.12. a) S b) A reçeteleri ile hazırlanan epoksi kaplamalı seramik karoların c) 600, d) 1500 ve e) 2100 devirde aşınma testi sonucundaki yüzey görüntüleri 46

5.13. a) S b) A reçeteleri ile hazırlanan silikon kaplamalı seramik karoların c) 600, d) 1500 ve e) 2100 devirde aşınma testi sonucundaki yüzey görüntüleri 46
5.14. Kaplanmış seramik karo örneklerinin (a) SE b) AE c) SS d) AS) optik mikroskop kesit görüntüleri 48
5.15. Kaplanmış seramik karo örneklerinin (a) SE b) AE c) SS d) AS) SEM görüntüleri . 49

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge **Sayfa**

2.1. Kuru presleme yöntemi ile üretilen seramik karoların % su emme değerlerine göre gruplandırılması 4
4.1. Standart ve fırın rulo atığı ilaveli malzemelerde kullanılan reçeteler 19
4.2. Kullanılan çelik bilye miktarının çaplarına göre dağılımı 29
5.1. Masse çamurunun fiziksel özellikleri 33
5.2. Boyut ölçümleri ve genleşme/küçülme sonuçları 34
5.3. Yaş, kuru ve pişmiş örneklerin mukavemet değerleri 35
5.4. Seramik gövdelerin nem yüzdeleri 35
5.5. Örneklerin ortalama su emme yüzdeleri 36
5.6. Ortalama kızdırma kaybı sonuçları 37
5.7. L, a, b ölçüm sonuçları ve black core değerlendirmesi 37
5.8. Seramik karo gövdelerinin ısıl genleşme analiz sonuçları 38
5.9. Kullanılan atık ve hazırlanan seramik karo gövdelerinin XRF analiz sonuçları 39
5.10. S seramik karo gövdesi için ilerleyen zamanla değişen temas açısı değerleri 42
5.11. A seramik karo gövdesi için ilerleyen zamanla değişen temas açısı değerleri 42
5.12. Örneklerin temas açısı ölçümlerinin ortalamaları 43
5.13. Kaymazlık testi ölçüm sonuçları 44
5.14. TS EN 14231 standardına göre PTV değerlerinin karşılık geldiği kayma direnci 45
5.15. Yüzey aşınma test sonuçlarının sınıflandırılması 46
5.16. Farklı aşınma sınıfı için uygun olan kullanım alanları 47

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler	**Açıklama**
℃	Derece Santigrat
K	Kelvin
%	Yüzde
kg	Kilogram
g	Gram
µm	Mikron
m	Metre
cm	Santimetre
mm	Milimetre
mL	Mililitre
L	Litre
MPa	Megapaskal
kPa	Kilopaskal
kV	Kilovolt
rpm	Dakikadaki Devir Sayısı
dk	Dakika
s	Saniye
º	Derece
Ɵ	Teta
ν	Kinematik Viskozite

Kısaltmalar	**Açıklama**
APTES	3-Aminopropyltriethoxysilane
SEM	Taramalı Elektron Mikroskobu
UV	Ultraviyole

XRF	X-Işını Floresans Spektrometresi
XRD	X-Işını Difraktometresi

1. GİRİŞ VE AMAÇ

Doğal hammaddelerin tüketiminde payın önemli bir kısmı inşaat sektörü için üretilen yapı malzemelerine aittir. İnşaat sektöründe oldukça yaygın olarak kullanılan malzemelerden biri de seramik karolardır (Vieira vd., 2023). Seramik karolar, genellikle zemin ve duvar kaplaması olarak kullanılan, öğütülmüş hammaddelerden üretilen ve belirli teknik ve görsel özellikler kazandırılan ince levhalardır (Bovea vd., 2010). Çevreye duyarlı inşaata yönelik artan talep ve mevzuattan kaynaklanan, giderek daha kısıtlayıcı hale gelen gereksinimler nedeniyle, yapı malzemelerinin çevresel etkileri de incelenmektedir. Gelişen sektörde, endüstriyel sürdürülebilirliği ve rekabet gücünü korumak için doğal kaynaklara bağımlılığı azaltmanın ve çevresel etkileri en aza indirmenin yollarını bulmak amacıyla araştırma ve geliştirme girişimlerine odaklanmak zorunlu hale gelmiştir (Vieira vd., 2023).

Seramik endüstrisinde çevre ile barışık üretim yöntemlerinin geliştirilmesi ve düşük maliyetli hammadde kaynağı olarak kullanılan doğal hammaddelere alternatif katı atıkların kullanılması sektörün ihtiyaç duyduğu araştırma alanlarıdır (Pinheiro ve Holanda, 2013). Vitrifikasyon, tehlikeli atıkların işlenmesi ve bertarafı için en güvenli yaklaşımdır (Binhussain vd., 2014). Bu sebeple insan faaliyetleri sonucunda meydana gelen atık malzemelerin seramik karo üretiminde kullanımı, atığın kirletici yükünü ortadan kaldırmakla birlikte sürdürülebilir bir üretim sağlamaktadır (Yiga vd., 2025). Atık malzeme kullanımının şartı, endüstriyel sürecin değişmeden kalması ve ürün kalitesinin azalmamasını sağlayacak şekilde uygulanmasıdır (Luz ve Ribeiro, 2007). Bu şartların sağlanabilirliği geçmişteki araştırmalarda; cam tozu, kömür külü, kanalizasyon çamuru ve madencilik atıkları gibi bazı maddelerin reçetedeki temel bileşenler yerine veya katkı maddesi olarak kullanılmasıyla incelenmiştir. Bu araştırmalar sonucunda seramik karoların fiziksel ve mekanik özelliklerinde genel bir iyileşme gözlenmiştir (Yuan vd., 2020).

Seramik karoların fiziksel ve mekanik özelliklerinde iyileşme sağlayabilecek bir diğer yöntem de yüzeye kaplama yapılmasıdır. Son dönemlerde, seramikte daha iyi özellikler elde etmek için gerçekleştirilen kaplama çalışmalarının arttığı görülmektedir (Zanurin vd., 2022). Ev ve endüstriyel uygulamalar için seramik karoların yüzeyine uygulanan bu kaplamalar, geleneksel seramik karolara yüksek korozyon ve mekanik direnç

gibi fonksiyonel özellikler sağlayarak katma değerlerini artırmaktadır (Arenas vd., 2022). Bu kaplama malzemelerinden biri olan polimerler sağladıkları ürün çeşitliliği ve malzeme özellikleri ile öne çıkmaktadır. Geçmiş çalışmalarda, çeşitli polimerler ile modifiye edilmiş seramik karoların, standart seramik karolara göre daha iyi eğilme dayanımı ve su emme gibi özellikler sergilediği belirtilmiştir (Constancio vd., 2010).

Bu çalışmada, sürdürülebilir ve düşük maliyetli bir üretim sağlanması amacıyla, seramik karo pişirim sürecinde taşıyıcı olarak kullanılan fırın rulo atıklarının gövde reçetesinde kullanılması ile epoksi ve silikon malzemelerinin seramik karo yüzeyinde kaplama malzemesi olarak kullanılabilirliğinin araştırılması hedeflenmiştir. Bu kapsamda oluşturulan atık ilaveli seramik karo gövdelerine standart fiziksel testler ile ısıl genleşme katsayısı ve temas açısı ölçümleri, XRF ve XRD analizleri uygulanmıştır. Kaplama işlemi gerçekleştirilmiş seramik karo yüzeylerine ise; temas açısı ölçümleri, kaymazlık ve aşınma testleri uygulanmış, SEM ve optik mikroskop görüntüleri alınmıştır.

2. SERAMİK KARO TEKNOLOJİSİ

Seramik karolar; sert, dayanıklı, yüksek su geçirmezliğe sahip ve estetik görünümlü levha biçimindeki yapı malzemeleridir. Duvar ve yer kaplamaları olarak iç ve dış mekanlarda yaygın olarak kullanılırlar. Kil, kaolen, feldspat gibi hammaddelerin yüksek sıcaklıkta pişirilmesiyle elde edilirler.

Seramik karonun kökeni Mısır, Asur ve Babil gibi antik uygarlıklara dayanır. Bu toplumlar doğada bulunan kili pişirerek ürettikleri karoları tapınak gibi önemli yapılarda kullanmışlardır (Michalak, 2021). Seramik karoların yaygınlaşması sanayi devrimi ile gerçekleşmiştir. Günümüzde seramik karolar çeşitli ebatlarda ve yüzeylerde üretilerek inşaat sektörünün vazgeçilmez bir yapı malzemesi haline gelmişlerdir. Seramik karolar; duvar karosu, yer karosu ve porselen karo olarak üç sınıfa ayrılmıştır.

Duvar karoları, su emme değeri %10'dan yüksek olan seramik karo grubudur (BS EN 14411:2016). Bu değeri sağlamak için oluşturulan gözenekli yapı; duvar karolarının yoğunluğunu düşürmektedir. İç mekan duvar kaplaması olarak kullanılan bu ürünler için belirtilen yoğunluk ve su emme özelliği avantaj sağlamaktadır. Bu gruptaki karolar için sektörde uzun yıllar boyunca çift pişirim yöntemi uygulanmıştır. Daha sonra hızlı çift pişirim ve tek pişirim süreçlerinin işletilebilir olmasıyla birlikte hammadde kompozisyonlarının geliştirilmesi gerekmiştir.

Yer karoları, su emme değeri %0,5-%3; %3-%6; %6-%10 aralıklarında olan üç ayrı grubu kapsamaktadır (Çizelge 2.1 (BS EN 14411:2016)). Bu seramik karo grubunda su emme değeri yükseldikçe eğilme dayanımı değeri düşmektedir. Dolayısıyla teknik özellikleri, kullanım alanı ve amacı doğrultusunda değerlendirilmelidir.

Porselen karoların su emme değeri %0,5'e eşit veya küçük olduğundan en düşük su emme değerine sahip olan seramik karo grubunu teşkil eder (BS EN 14411:2016). Bu nedenle eğilme dayanımları, aşınma ve lekelenme dirençleri oldukça yüksek olup kamusal alanlarda, dış mekan zeminlerinde, dış cephe kaplamalarında ve fabrika, hangar gibi alanların zeminlerinde kullanıma en uygun karolardır.

Çizelge 2.1. Kuru presleme yöntemi ile üretilen seramik karoların % su emme değerlerine göre gruplandırılması

Şekillendirme	**Su Emme *(E_b)***			
	Grup I $E_b \leq 3\%$	**Grup IIa** $3\% < E_b \leq 6\%$	**Grup IIb** $6\% < E_b \leq 10\%$	**Grup III** $E_b > 10\%$
Kuru Presleme (Granül formdaki malzemenin tek eksende sıkıştırılması yöntemidir.)	Grup BI_a $E_b \leq 0{,}5\%$	Grup BII_a	Grup BII_b	Grup $BIII_b$
	Grup BI_b $0{,}5\% < E_b \leq 3\%$			

2.1. Seramik Karo Üretim Süreci

Seramik karo üretim süreci başlıca; masse hazırlama, şekillendirme, sırlama ve pişirme temel aşamalarından oluşmaktadır.

Hammaddelerin karıştırılıp granül biçimine getirildikten sonra şekillendirilmesi ve pişirilmesi temel süreci oluşturur. Bu aşamalara ek olarak farklı ürün sınıfları (duvar karosu, yer karosu, porselen karo) için farklı uygulamalar (çift pişirim, polisaj vs.) sürece dahil edilebilir. Bunun sonucunda teknik özellikleri ve/veya estetik görünümleri farklı seramik karo grupları üretilebilir.

2.1.1. Masse hazırlama

Seramik karonun gövdesini oluşturmak için öncelikle belirli tane boyutuna indirgenmiş olan kil, kaolen, feldspat vb. hammaddeler karıştırılır. Ardından bu hammadde karışımı su ile değirmende öğütülür. Öğütmenin amacı hammaddelerin, sabit tane boyut dağılımı gerçekleşene kadar, boyutunu azaltmaktır. Öğütme işlemini genellikle değirmen içerisinde bulunan alümina bilyeler gerçekleştirir. Öğütme sonrasında 63 μm için elek bakiye, monoporöz veya çift pişirim karolarda genellikle %4-6; kilin yüksek oranda kullanıldığı kırmızı gövdelerde ise %3-4 dolaylarındadır (Sacmi, 2008). Oluşan sulu

hammadde karışımı elekten geçirilerek stok havuzlarına alınır ve burada pervaneler aracılığıyla sürekli karıştırılarak çamurun çökelmesi engellenir. Sulu karışım havuzlardan püskürtmeli kurutuculara beslenir. Püskürtülen sulu karışım kurutucuya beslenen 450-500 ℃ sıcaklıkla karşılaştığında karışımdaki su uzaklaşır ve granül masse elde edilir. Şekillendirme aşamasında bütünlük sağlanabilmesi için oluşan granül masse yapısında %5-6 kadar nem bulundurur.

2.1.2. Şekillendirme

Püskürtmeli kurutuculardan pres silolarına gönderilen masse kalıplara doldurularak şekillendirilir. Masse içerisindeki havanın çıkışını sağlamak için ilk olarak bir ön basınç uygulanır. Uygulanan ikinci basınç, karo sınıfına göre değişmektedir.

2.1.3. Kurutma

Seramik karolar presten çıktıktan sonra kurutucuya girer ve kalan nemin buharlaşması ile ham karonun eğme mukavemeti artar. Bunun nedeni taneciklerin birbirine yaklaşarak daha kuvvetli bağ kurmalarıdır. Tek pişirim karolarda eğme mukavemeti pişirme işleminden önceki aşamalarda oluşabilecek gerilimler açısından önemlidir. Kurutma sırasında boyutsal değişimin %0-0,3 aralığında kalması, karolarda oluşabilecek çatlakların önlenmesi açısından önemlidir.

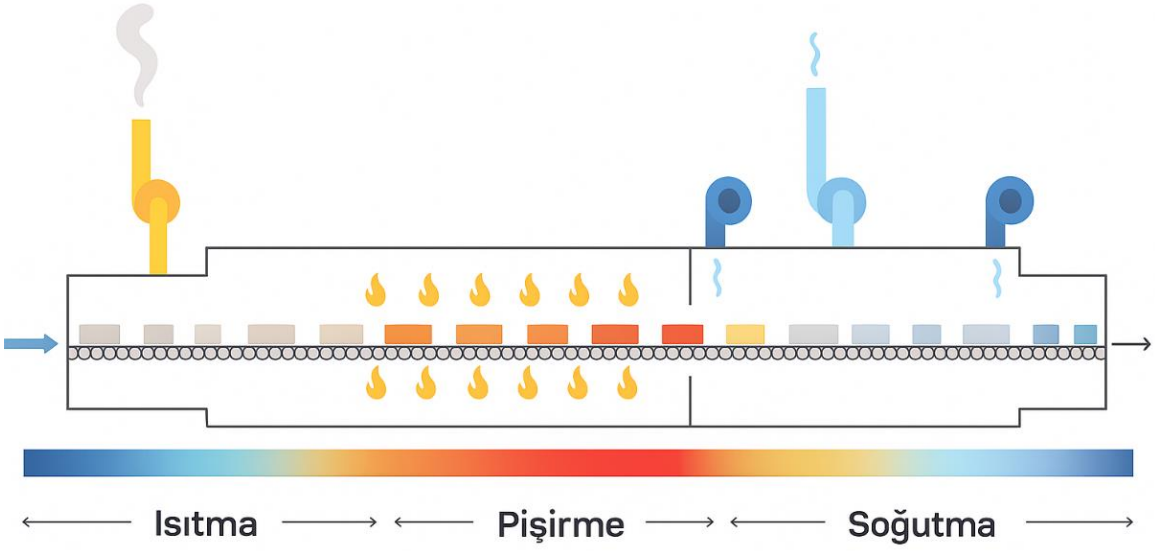
2.1.4. Sırlama

Sırlama aşamasında, karo yüzeyine genellikle engop ve sır ile kaplama işlemi gerçekleştirilir. Fazla nemini atan karoların yüzeyine ilk olarak engop uygulanır. Engop; gövdenin rengini kapatmak ve yüzeyi sırlama uygulamasına hazırlamak için kullanılır. Ayrıca, seramik karonun yapısında, piştikten sonra oluşan konvekslik-konkavlık (deformasyon) değişiminin kontrol edilmesine de yardımcı olur. Yüzeye yayılan engop kuruduktan sonra sırlama işlemi gerçekleşir. Sır; yüzeye estetik görünüm, kolay temizlenebilirlik ve düzgünlük sağlar. Aynı zamanda gözenekliliği azaltarak sıvılara karşı dayanımı yükseltir. Sırın reolojisi ve uygun şekilde elenmesi bu özellikleri sağlayabilmesi için önemli parametrelerdir. Sır ve engop, makinelerden ya düzgün bir akışla perde şeklinde akar ya da püskürtme yöntemi ile yüzeye uygulanır.

Baskı yöntemi olarak başlıca dijital veya elek baskı yöntemleri kullanılır. Dijital baskı yönteminde, dijital ortamda hazırlanan görsel mürekkep baskı makinesine gönderilir. Karolar üzerine istenen baskı, makine tarafından mürekkepler ile kolaylıkla uygulanır. Elek baskı yönteminde ise istenen desen, eleklere manuel olarak işlenir. Elekler üzerinden gönderilen mürekkepler ile desen karo yüzeyine yansıtılır. Son yıllarda sektörün gelişmesiyle birlikte; iş gücünün daha az olması, daha modern görünüm ve çeşitlilik sağlaması gibi avantajlar sebebiyle dijital baskı daha sık kullanılır hale gelmiştir.

2.1.5. Pişirme

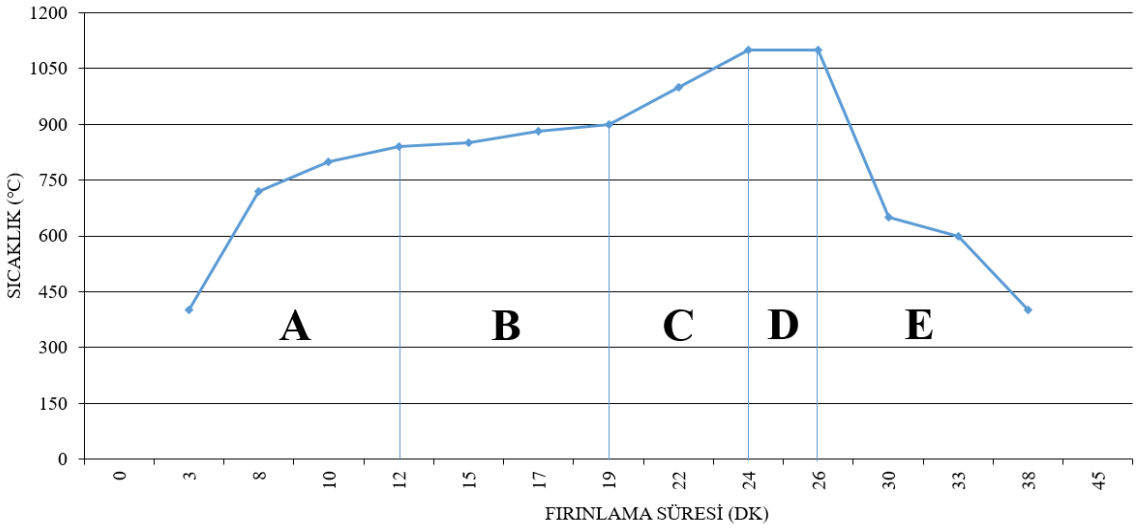
Pişirme (sinterleme) aşaması (Şekil 2.1 (Ferrer vd., 2019)) seramik karo üretimi için en önemli aşamalardan biridir. Bunun nedeni, ürünün son özellikleri için belirleyici faktör olan reaksiyonların bu aşamada gerçekleşmesidir.



Şekil 2.1. Endüstriyel seramik karo pişiriminde kullanılan fırının temel aşamalarının şematik gösterimi. Seramik karolar, fırın ruloları ile taşınarak ilk olarak ısıtılır, sinterlenir ve soğutulur

Şekil 2.2'de gösterilen A aşaması, malzemenin ısıl işlem öncesi fazını ve kil minerallerinin bozunmasını içerirken B aşamasında karbonatlar bozunarak CO_2 çıkışına neden olur. 900-1100 °C aralığındaki C aşamasında ise CaO, MgO gibi alkali oksitlerin sentez reaksiyonları gerçekleşir. Oluşan bu bileşikler ürünün fiziksel/mekanik özelliklerini

belirlemek için önemlidir. D aşaması, gövdenin maksimum sıcaklıkta sinterlendiği ve sır yayılımının optimize olduğu bölgedir. Karo gövdesindeki kimyasal dönüşümler ve fiziksel değişimler minimum 1000 ℃ dolaylarında gerçekleşmektedir. E bölgesi ise hızlı soğutma aşamasıdır. Bu bölgeyi yavaş soğutma bölgesi takip eder. Böylece gövdede bulunan serbest kuvarsın dönüşümü dolayısıyla oluşan gerilimler sınırlandırılmış olur (Sacmi, 2008).



Şekil 2.2. Tek pişirim (monoporöz) seramik karoların yaklaşık sıcaklıklar ile belirtilen temel fırınlama aşamaları

2.2. Seramik Karo Hammaddeleri

Seramik karo üretim sürecinde kullanılan hammaddeler; masse hazırlama ve engop/sır hazırlama aşamasında kullanılan hammaddeler olarak ikiye ayrılır. Kullanılan bazı hammaddeler masse ve engop/sır hazırlama için ortaktır. Bu hammaddeler üretilecek seramik karonun fiziksel, mekanik özelliklerini ve yüzey görünümlerini belirler.

2.2.1. Massede kullanılan hammaddeler

Massede kullanılan hammaddeler; plastik hammaddeler, akışkanlaştırıcı hammaddeler, inert hammaddeler ve destek hammaddeleri olarak dört ayrı başlıkta incelenebilir. Plastik hammaddeler esas olarak killerdir. Akışkanlaştırıcı hammadde olarak ise genellikle feldspat ve feldspatik kumlar kullanılırken silis kumu ve kuvars inert madde olarak adlandırılabilir. Massenin istenen spesifik özelliklere sahip olmasını sağlayan başlıca

destek hammaddeleri ise talk, dolomit ve kalsittir (Khanal ve Parajuli, 2021). Plastik malzemeler bağlayıcılığı arttırarak gövdeye mukavemet kazandırırken; plastik olmayan hammaddeler sinterleme, akışkanlaştırma ve ergimeyi sağlar (Aljarany, 2022).

Kil, geleneksel seramik malzemelerin ana bileşenidir ve maliyeti düşük alümina kaynağıdır. Bağlayıcılığı, şekillendirme aşamasında ihtiyaç duyulan plastik özelliği ve kuruma sonrasında eğilme dayanımı sağlar. Plastiklik, bir malzemenin stres altında kırılmadan işlenebilirliğini sağlar. Başka bir deyişle plastiklik, mekanik özelliklerin ve basıncın nasıl kullanılacağı hakkında bilgi verebilir (Maged vd., 2023).

Seramik endüstrisinde diğer bir hammadde olan kuvars, esas olarak dolgu maddesi olarak kullanılır ve yüksek derecede viskoz bir camsı faz oluşturduğu için seramiğin gövdesini destekler (El-Maghraby vd., 2021). Kurutmadan önceki eğilme dayanımını ve plastisiteyi azaltırken pişirme sırasında gaz çıkışını kolaylaştırır. Ayrıca pişme sonrasında gövdenin doğrusal küçülmesini azaltır ve beyazlığını artırır (Aljarany, 2022).

Feldspatlar, akışkanlaştırıcı madde olarak işlev gören alkali (Na ve K) kaynakları olarak kabul edilir. Seramik malzeme gövdesinde, camsı faz oluşumunu sağlaması ve kimyasal dönüşümün hızlanması avantajları nedeniyle kullanılırlar. Potasyum feldspat, ısıl büzülmeyi azaltırken; sodyum feldspat, ısıl genleşmeyi düşürür. Sodyum feldspat, diğer adıyla albit, diğer akışkanlaştırıcı maddelere kıyasla daha düşük sıcaklıklarda eridiği ve seramik gövdelerde kristal fazları bağladığı için özellikle seramik ve cam endüstrilerinde kullanılır (El-Maghraby vd., 2021).

Kalsit ve dolomit hammaddeleri karbonatlar sınıfında yer alırlar. Duvar karoları için temel malzemelerdir ve %8-15 aralığında kullanılırlar. Gövde yapısında gözenekli yapı oluşturarak su emme değerinin yükselmesine neden olurlar.

Son olarak seramik gövdelerde talk, kontrollü ısıl genleşmeyi ve hızlı pişirimi sağlar. Pişirimden sonra ise nem emmeden kaynaklanan genleşmeyi ve malzemenin çatlama riskini azaltır.

2.2.2. Engop/Sırda kullanılan hammaddeler

Engop yapımında çoğunluk olarak kil ve kaolen kullanılır. Bu malzemelerin yanında, istenen özellikler doğrultusunda (akışkanlık, sertlik, beyazlık vs.), daha düşük oranlarda aşağıda belirtilen diğer hammaddeler kullanılır.

Sır yapımında ise kullanılan ana malzeme frittir. Frit, yüzey kaplama için gerekli olan birçok oksidi içerisinde bulundurur fakat malzemenin kullanım alanını genişletmek için çeşitli oksit ve katkı maddeleri ilave edilir. İhtiyaç duyulan oksitler; kuvars, feldspat, dolomit, valostonit, alümina gibi hammaddelerden sağlanır. Bu hammaddeler, yapılarında bulundurdukları oksitlerin, fritin sağladığı cam özelliği ile etkileşimini sağlar.

Frit, çeşitli hammaddelerin öğütülüp karıştırıldıktan sonra eritilmesi ve bu eriyiğin ani bir şekilde soğutulması ile üretilir. Nispeten düşük sıcaklıklarda pişirilen seramik karolara uygulanacak sır bileşimlerinde yüksek oranda frit kullanılmaktadır. Bunun nedeni frit malzemesinin düşük sıcaklıklarda hızlı bir şekilde eriyik hale gelebilmesidir. Ayrıca sır ve engop bileşenlerinin pişirim sırasında meydana getireceği reaksiyonlar, öncelikle frit üretimi sırasında gerçekleşerek seramik karonun pişirilmesinden sonra daha düzgün bir yüzey elde edilmesini sağlar. Frit, yüzeyde istenen camsı yapıyı oluşturur. Bu nedenle piyasada çeşitli fritler vardır. Bu çeşitlenmeyi sağlayan ana sebep, fritin içerdiği oksitlerdir ve bu oksitler erime sonrasında opaklık, transparanlık özelliklerini de sağlarlar.

Silika (SiO_2), geniş sıcaklık aralığında camlaşma özelliğine sahip olup sır kompozisyonlarının temel bileşenidir. Yüksek silika içeriğine sahip malzemeler, sert ve aynı zamanda kimyasal ajanlara karşı oldukça dirençlilerdir. Engop/sır kompozisyonunda; silika kaynağı olarak çoğunlukla kuvars, kuvars kumları, sodyum feldspat ve potasyum feldspat kullanılmaktadır.

Diğer bileşenlerden biri olan alüminyum oksit (Al_2O_3), tek başına kullanıldığında cam yapma özelliğine sahip değildir fakat ilavesi camsı yapıyı kararlı bir hale getirir. Sır içine uygun oranlarda ilave edildiğinde; eğme dayanımında artma, genleşme katsayısında azalma, asit direncinde artma gibi özellikler sağlar. Mat ürünlerin sır bileşiminde kullanım

miktarı yüksek, parlak ürünlerde düşüktür. Alümina kaynağı olarak; kalsine alümina, korund, kil, kaolen ve feldspatlar kullanılmaktadır.

Alkaliler genellikle potasyum, sodyum feldspatlardan sağlanır ve tek başlarına cam kompozisyonu oluşturamazlar. İlave edildikleri kompozisyonda camın erimesini, genleşme katsayısını ve parlaklığını artırırlar.

Kalsiyum oksit (CaO) kaynağı olarak kalsit, dolomit ve volastonit kullanılmaktadır. Doğru oranda kullanıldığında kompoziyona; kimyasallara karşı yüksek dayanım ve eğme dayanımında iyileşme sağlarken yüksek oranda kullanımı matlığa neden olur.

Düşük oranda çinko oksit (ZnO) ilavesi yüzey parlaklığını arttırırken yüksek oranda ilavesi yüzeyi matlaştırır ve su geçirgenliğini oldukça azaltır. Çok yüksek yüzdede ilavesi ise yüzeyin asitlere karşı direncini arttırır.

Zirkonyum dioksit (ZrO_2) opaklaştırıcı özelliği sayesinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Mikronize zirkonyum silikatlar ince tane boyut dağılımı ile direkt olarak kompozisyon içerisinde kullanılırken daha büyük tane boyutuna sahip zirkonyum silikat tozu frit üretme aşamasında kullanılır. Sağladığı düzgün yüzey ve beyazlık nedeni ile seramik karoların sır kompozisyonunda zirkon içerikli fritler yaygındır (Karaveli vd., 2007).

Titanyum dioksit (TiO_2) ise yüzeyin çatlamasını engeller ve kimyasal direncini arttırır. Düşük yüzdede ilave edilse bile yüzeyi matlaştırır, sertleştirir ve malzemeye sarılık verir.

2.3. Seramik Karolar ve Kompozit Malzemeler

2.3.1. Kompozit malzemeler

Kompozit malzemeler; fiziksel, kimyasal ve mekanik özellik bakımından farklılık gösteren iki veya daha fazla malzemenin iyi özellikleri göz önünde bulundurularak bir araya getirilmesi ile meydana gelen malzemelerdir. Temel olarak matris ve destek malzemesi olmak üzere iki veya daha fazla bileşenden oluşurlar. Çoğu durumda matris fazı olarak polimer, metal veya seramik malzemeler kullanılırken destek malzemesi olarak lif veya

partiküller kullanılmaktadır (Arulprasanna ve Omkumar, 2024). Bu malzemelerin uygulama alanları arasında inşaat, otomotiv, biyomedikal, denizcilik, havacılık, enerji ve savunma sektörü önde gelmektedir. Temel avantajları; tek başına kullanılan malzemelere göre yüksek mukavemet, düşük yoğunluk, yüksek yorulma dayanımı, korozyon direnci ve estetik görünüm sağlamalarıdır (Singh vd., 2021).

Polimer matrisli kompozitler, farklı takviye maddeleri içerebilen polimerlerden oluşur. Diğer bileşen olarak sıkça kullanılan lif takviyeleri polimer matrisli kompozitlerin mekanik yükünü destekler; böylece sertlik, mukavemet, kırılma tokluğu vb. özellikleri iyileştirilmiş yeni bir malzeme meydana getirilir. Bu sayede, sağladıkları mekanik iyileşmenin yanında kimyasal kimlikleri de korunmuş olur. Bu malzemelerin üretimi seramik veya metal matrisli kompozit malzemelere kıyasla daha kolaydır ve maliyetleri daha düşüktür. Ayrıca sahip oldukları daha az aşındırıcılık ve daha düşük yoğunluk özellikleri sayesinde birçok alanda kullanılmaktadırlar (Sajan ve Selvaraj, 2021). Ancak kullanım alanına göre; bazı polimerlerin biyolojik olarak parçalanamamaları, yüksek ısıya karşı dayanımlarının düşük olması ve nem emiliminin yüksek olması gibi dezavantajları vardır. Bu dezavantajlar, malzemenin korozyona uğrama ve yorulma süresini hızlandırmaktadır (Yashas Gowda vd., 2018; Barreira-Pinto vd., 2023).

Metal matrisli kompozitler; farklı bir element veya metalin bir bağlayıcı yardımıyla takviye elemanı ile birleştirilmesinden meydana gelir (Senthil vd., 2021). Takviye elemanlarının homojen bir şekilde dağıtılması, kompozit malzemenin mukavemeti ve dayanıklılığını sağlamak açısından önemlidir. Ayrıca bileşenler arasındaki dağılım ve bağlantının sağlanabilmesi için doğru üretim yöntemi seçilmelidir. Bu kompozit malzeme grubunun daha yüksek kalite ve düşük maliyet ile etkin bir şekilde işlenip şekillendirilebilmesi için farklı yöntemler araştırılıp geliştirilmeye devam edilmektedir (Sarmah ve Gupta, 2024). Bu malzemeler; mekanik, elektriksel, kimyasal ve termal özellikleri sayesinde yüksek mukavemet ve düşük yoğunluklu malzemeler gerektiren inşaat, otomotiv, havacılık endüstrilerinde yaygın olarak kullanılmaktadır (Bhong vd., 2023).

Seramik matrisli kompozitler; silisyum karbür, alümina, silisyum nitrür, alüminyum nitrür ve zirkonyum gibi yaygın olarak kullanılan diğer seramiklerde ortaya çıkan sorunları kontrol etmek ve gidermek için geliştirilmiştir (Karadimas ve Salonitis, 2023). Yüksek

mukavemet, iyi kırılma tokluğu, yüksek aşınma direnci, ısıl kararlılığı ve yüksek sıcaklık şok direnci gibi özelliklerinin yanında işlevseldirler. Bu avantajları, malzemelerin havacılık, savunma, otomotiv, enerji, elektrik, kimya, biyomedikal mühendislik gibi endüstrilerde gerekli ve kullanılabilir duruma gelmelerini sağlamıştır (Sun vd., 2023).

2.3.2. Seramik karolarda kompozit

Seramik sektörünün uluslararası piyasada yaygınlaşmasıyla birlikte bu malzeme grubunun fiziksel ve kimyasal özelliklerinin iyileştirilmesi bir pazar talebi olarak ortaya çıkmıştır. Seramik endüstrisinin daha fazla gelişmesi için enerji tasarrufu ve çevre korumasına odaklanılmıştır (Zhang vd., 2017).

Geleneksel seramik karolar yıllardır birçok alanda kullanılsa da kullanım ömrü göz önüne alındığında dayanıklılıklarının artırılması gerekmektedir. Bunun nedeni büyük oranda kullanılan geleneksel sır malzemesidir. Bu kaplamalar yetersiz aşınma direncine sahiptir ve parlaklık, renk, doku gibi yüzey özelliklerini kolaylıkla kaybedebilmektedirler (Casasola vd., 2012).

Sır malzemelerinin teknik yetersizliklerinin yanı sıra seramik karo gövdesinin üretiminde kullanılan hammaddeler ise sürdürülebilirlik açısından dezavantajlara sahiptir. Hammadde rezervlerine bağımlılık ve bu hammaddelerin yeryüzüne çıkarılması için meydana getirilen arazi ve ekosistem tahribatı bu dezavantajlardan bazılarıdır. Bu nedenle araştırmacılar tarafından çoğunlukla gövde kompozisyonuna atık ilave edilerek çevresel etkiyi azaltarak teknik özellikleri iyileştirme yoluna gidilmiştir. Ayrıca alternatif yüzey kaplamaları geliştirilmiş veya var olan kompozisyonların içeriğine çeşitli nanopartiküller, oksitler veya polimerler ilave edilerek kompozit yapı oluşturulmuştur. Böylece mekanik, kimyasal ve fiziksel özelliklerin iyileştirilmesi hedeflenmiştir.

3. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

3.1. Atık Malzemelerin Seramik Karo Üretiminde Kullanımı

Sanayi devriminden bu yana artan nüfusla birlikte atık malzeme miktarı da dünya çapında hızla büyüyen bir sorun haline gelmiştir. Artan atık malzemelerin bertarafı, özellikle yüksek nüfuslu bölgelerde, baş edilmesi gittikçe zorlaşan bir problemdir (Batayneh vd., 2007).

Seramik karo endüstrisi, üretim boyunca birçok farklı bileşiği kapsar. Bu nedenle, seramik karo üretim süreci atık malzemelerin geri dönüşümünü sağlamak için uygun koşullar sunar. Bu kapsamda birçok farklı atığın seramik karo üretiminde geri kazanılması araştırılmış ve araştırılmaya devam edilmektedir. Yapılan çalışmalardan bazıları aşağıda belirtilmiştir.

Izak vd., bakır madenciliğinden açığa çıkan, kimyasal bileşiminde yüksek oranda SiO_2 bulunduran flotasyon atığının ve linyit madenciliğinde açığa çıkan kil esaslı atığın seramik karo üretiminde kullanılabilirliğini araştırmışlardır (Izak vd., 2025). Flotasyon çamuru ve kil esaslı atığın uygun oranlarda birlikte kullanılması ile bu iki atık birbirini tamamlamış olup sinterleme ve mekanik dayanım üzerinde olumlu yönde etki ettiği, diğer teknik özelliklerin ise standart üretim değerleri ile uyumlu olduğu belirtilmiştir. Ayrıca karışım oranları değiştirilerek "stoneware" ya da gözenekli yapıda karo elde edilebileceği bildirilmiştir.

Bir başka çalışmada; seramik yer karosu gövdesinde bulunan kil miktarını azaltmak amacıyla alternatif hammadde olarak yüksek derecede ekolojik tehlike oluşturan kanalizasyon çamuru kullanımını araştırmışlardır (Amin vd., 2018). 24 saat boyunca 110 °C'de kurutulan kanalizasyon çamuru, reçete içine ağırlıkça %5-35'e kadar farklı oranlarda eklenip 30 MPa basınçta şekillendirilmiş ve 1150 °C'de sinterlenmiştir. Sinterleme öncesi yapılan analizlerin sonucu olarak; çamur ilavesinin artması ile plastisitenin de arttığını fakat küçülme özelliğinde herhangi bir değişim olmadığını belirtmişlerdir. Sinterleme sonrasında

yapılan küçülme, su emme ve kırılma dayanımı testlerinden yola çıkarak standartların sağlanabilmesi için kanalizasyon çamurunun, belirtilen sinterlenme şartları için seramik yer karosu reçetesine %7'den az ilave edilebileceğini belirtmişlerdir.

Ke vd., yüksek mekanik mukavemet, aşınma ve kimyasal madde direncine sahip porselen karoların yüzey parlatma işleminde ortaya çıkan büyük miktardaki parlatılmış karo atığının, yine porselen karo reçetesinde kullanılmasını araştırmışlardır (Ke vd., 2016). Bu doğrultuda, parlatılmış porselen karo atığını reçete içine ağırlıkça %10-70 aralığında ilave ederek yedi farklı örnek hazırlamışlardır. Atık ilavesinin reçetedeki akışkan oksit miktarını arttırarak sinterlemeyi, karbonat parçacıklarının varlığının ise viskoz bir sıvı fazını ve yoğunlaşmayı desteklediğini belirtmişlerdir. %50 oranda atık içeren örneklerin sıfıra en yakın su emme değerine (%0,12) ve maksimum mukavemet değerine (47 MPa) sahip olduğunu gözlemişlerdir. Atık içeriği %70'e çıkarıldığında ise daha gözenekli, dolayısıyla mukavemeti daha düşük bir örnek elde etmişlerdir. Yapılan test ve analizler sonucunda; parlatılmış karo atığının porselen karo üretiminde düşük maliyetli bir hammadde olarak ağırlıkça %50 oranında kullanılabileceğini belirtmişlerdir.

Porselen karo gövdesinde bulunan kaolen hammaddesi yerine, alternatif hammadde olarak, tehlikeli atık olarak değerlendirilen katı petrol atığı kullanımının araştırıldığı bir çalışmada (Pinheiro ve Holanda, 2013); ağırlıkça %40 oranda kullanılan kaolen hammaddesi azaltılarak sırasıyla %1,25, 2,5 ve 5,0 oranlarında katı petrol atığı ilave etmişlerdir. Hazırlanan porselen karolar 1240 ℃'de 60 dk boyunca pişirilmiştir. Çalışma sonucunda; özelikle %2,5 oranında katı petrol atığı ilavesinin, uygun teknik özelliklere sahip porselen karo üretimine olanak sağlayabileceğini ve her yıl artan bu atık malzemenin yeniden kullanımıyla çevresel zararlarının azalacağını bildirmişlerdir.

Yiga vd., pirinç kabuğu külü ve plastik atıklarının geleneksel seramik karo hammaddesi olan kil yerine kullanılabilirliğini araştırmışlardır. Malzeme hazırlığı aşamasında; plastik atıklarını 1,5 cm çapında küçük parçalar haline getirerek eritmişlerdir. Pirinç kabuğu külünü ise pirinç kabuklarını 650 ℃ sıcaklıkta yakarak elde etmişlerdir. Plastik atıkların şok direnci sağladığını fakat oran yükseltildikçe basınç dayanımını düşürdüğünü, pirinç kabuğu külünün ise ısıl kararlılık sağladığını bildirmişlerdir (Yiga vd., 2025).

Bu tez çalışmasında seramik karo gövdesinde kullanılan fırın rulo atığı, bir başka çalışmada seramik karo yüzeyine uygulanan mat-opak sır bileşiminde alümina, kuvars ve zirkon hammaddelerinin yerine kullanıldığı görülmüştür (Oytac vd., 2024). Standart sır reçetesinin içinde %12 oranında bulunan alümina ve kuvars hammaddelerinin yerine %5 ve %9 oranlarında fırın rulo atığı kullanarak iki farklı reçete hazırlamışlardır. Üçüncü reçetede ise fırın rulo atığının opaklaştırıcı etkisini gözlemek için zirkon hammaddesini standart reçeteden tamamen çıkarmış ve yerine %3 oranında fırın rulo atığı ilave etmişlerdir. Hazırlanan sırlı karolar 1190 ℃ sıcaklıkta 44 dk boyunca pişirilmiştir. Çalışma sonucunda; zirkon yerine fırın rulo atığı kullandıklarında yüzey pürüzlülüğü ve mat görünümün arttığını, beyazlık değerinin düştüğünü belirtmişlerdir. Ancak %5 oranında atık eklenen reçetenin kullanılmasının mümkün olduğunu, mat görünüm kaybını önlemek için daha düşük SiO_2/Al_2O_3 oranlarıyla çalışmak gerekebileceğini bildirmişlerdir.

3.2. Seramik Karolarda Polimer Uygulamaları

İnşaat sektörünün gelişimi, yapı malzemelerinin gelişimini tetiklemektedir. Bu yapı malzemeleri arasında seramik karolar da bulunmaktadır. Polimer malzemeler sağladıkları su yalıtımı, korozyon ve aşınma direnci, hafiflik, yüksek mekanik dayanım, ses ve ısı yalıtımı gibi üstün özellikler sayesinde inorganik malzemelere kıyasla inşaat sektöründe kullanım potansiyeli yüksektir (Shen vd., 2020). Bu kapsamda yapılan çalışmalardan bazıları aşağıda belirtilmiştir.

Zhong vd., geleneksel seramik karoların mukavemet, darbe direnci ve tokluğunu iyileştirme amacı ile doğada bulunan kabuklu organizmalardan ilham alarak, katmanlı kompozitler geliştirmişlerdir (Zhong vd., 2023). Çalışma kapsamında; yüzey hidroksilasyonu ve sıcak presleme yöntemleri ile çok katmanlı seramik karo/kevlar kumaş kompoziti üretmişlerdir. Kevlar kumaşın sağladığı, katmanlar arası iyi bağlanma özelliği sayesinde kompozit malzemenin mukavemetinin aynı kalınlıktaki geleneksel seramik karolara göre arttığını belirtmişlerdir.

Seramik karolarda kaymazlık özelliğinin polimer bir kaplama ile sağlanabilirliğinin araştırıldığı bir çalışmada (Selli vd; 2021) poliüretan ve inorganik granül içeren bir bileşim geliştirilmiştir. Elde edilen polimer kaplama çözeltisi seramik karolara uygulanmıştır. Bir

hafta boyunca normal şartlar altında bekletilen örneklere aşınma, suya dayanım, kaymazlık, UV dayanımı ve lekelenme testleri uygulanmış ve kaplamalardan birisinde başarılı sonuçlara ulaşıldığı belirtilmiştir (Selli vd., 2021).

Bir başka çalışmada doğal ve geri dönüştürülmüş hammaddelerle hazırlanan farklı seramik karolara antibakteriyel işlev kazandırmak için gümüş kaplama işlemi gerçekleştirilmiştir. Antibakteriyellik üzerine etkisini incelemek için ayrıca polimer astar kullanılmıştır. Gerçekleştirilen mikro yapısal ve dokusal analizlerden yola çıkarak seramik karoların sergiledikleri leke direnci ve antibakteriyel özelliklerin pürüzlülük gibi parametrelere bağlı olduğu belirtilmiştir. Yapılan testler sonucunda; polimer astar uygulamasının, seramik yüzeyin (içerdiği hammadde türünden bağımsız olarak) mikro yapısı ve dokusu açısından performansını iyileştirdiği bildirilmiştir. Ayrıca seramik karoların sergiledikleri antibakteriyel aktivite, morfolojik ve dokusal parametrelerin yanı sıra polimer astarın varlığıyla ilişkilendirilmiştir (La Torre vd., 2021).

3.3. Seramik Karolarda Kompozit Uygulamaları

Seramik karo bileşiminin büyük kısmı madenlerden çıkarılan mineral kökenli hammaddelerden karşılanmaktadır. Bu sebeple üretilen seramik karo malzemelerinin teknik özellikleri sınırlıdır. Kompozit malzemeler bu sınırların genişletilmesine olanak sağlayabilir. Diğer bir yönden, pazar talebi arttıkça değişen kullanım beklentileri ve ekonomik sebepler, seramikte kompozit uygulamaların yolunu açmıştır. Seramik karo üretiminde kompozit uygulamalar alanında araştırmalar devam etmekte olup yapılan bazı çalışmalar aşağıda belirtilmiştir.

Lotus yaprağından ilham alınarak seramik karo yüzeyinde süperhidrofobiklik ve antibakteriyellik etkilerini sağlamak amacıyla Si_3N_4 katkılı sır ile bir yüzey kaplama sistemi geliştirilmiştir. Sinterleme aşamasından sonra gözenek oluşumu nedeni ile karo yüzeyinin ticari bir polimer ile kaplandığı belirtilmiştir. Bu sayede 155º temas açısına sahip süperhidrofobik ve S. aureus ile P. Aeruginosa bakterilerine karşı yüksek oranda etkili antibakteriyel seramik karo yüzeyleri elde edildiği bildirilmiştir (Açıkbaş ve Çalış Açıkbaş, 2021).

Diğer bir çalışmada; kurşun oksit nanopartiküllerinin sentezlenmesi ve seramik karo gövdelerine %0-10 aralığında farklı ağırlık yüzdelerinde ilave edilmesi ile γ-ışını kalkanlama performansı geliştirilmiş yeni kompozit malzemeler üretilmiştir. Analizler sonucunda; γ-ışını zayıflatma özelliğinin, ilave edilen kurşun oksidin ağırlık yüzdesinin artmasıyla ve ağırlık yüzdesi sabit tutulduğunda ise parçacık boyutunun artmasıyla büyük oranda arttığı bildirilmiştir (Mahmoud vd., 2021).

Zhang vd., yaptıkları bir çalışmada Ag/ZnO nanokompozit tozunu önce sentezleyip daha sonra seramik karo sırına ilave ederek yeni bir kompozit malzeme geliştirmişlerdir. Geliştirilen yeni sırın seramik karo yüzeyine uygulanmasıyla malzemenin çatlama direncini ve beyazlığını yükseltirken sinterleme sıcaklığını düşürdüğünü belirtmişlerdir. Ayrıca Ag iyonlarının varlığı ile seramik malzemenin E. coli'ye karşı mükemmel antimikrobiyal aktiviteye sahip olduğunu bildirmişlerdir (Zhang vd., 2017).

4. MALZEME VE YÖNTEM

4.1. Kullanılan Malzemeler

Bu çalışma kapsamında alternatif seramik karo gövdesi geliştirme aşamasında kullanılan malzemeler; kil (Ata Madencilik, Erel Madencilik), pegmatit (Çam Madencilik), kalsit (TEB Madencilik), silis kumu ve sodyum silikat [$Na_2(SiO_2)_nO$] (Lirkim Kimya)'tır. Atık fırın ruloları ise Seranit Granit Seramik San. ve Tic. A.Ş. fabrikasından temin edilmiştir.

Seramik karo yüzey kaplaması aşamasında kullanılan malzemeler; gallik asit (Merck), APTES (Sigma-Aldrich), epoksi bileşenleri olarak reçine ve reçine yardımcısı (Baran Boya), silikon (Poitner)'dur.

4.2. Gövde Hazırlama

İki çeşit seramik karo gövde üretimi gerçekleştirilmiştir. Birisi standart adı verilen seramik karo gövde, diğeri atık ilaveli seramik karo gövdedir. S standart gövdeyi, A atık ilaveli gövdeyi temsil etmektedir. Gövdelerin üretimi için öğütme, granül biçimine getirme, şekillendirme ve sinterleme aşamaları gerçekleştirilmiştir.

4.2.1. Hammadde hazırlama

Çalışmanın ilk aşamasında, fırın rulo atıklarının sert yapısından kaynaklanan uzun öğütme süresini önlemek amacıyla; Retsch marka, RM 200 model havan (Şekil 4.1) kullanılarak malzemenin tane boyutu 500 μm'a düşünceye kadar kuru öğütme işlemi gerçekleştirilmiştir. Bu aşama, atık ilaveli seramik karo gövdenin üretimi ile standart üretim arasındaki tek farktır.



Şekil 4.1. Fırın rulolarının öğütülmesi işleminde kullanılan havan

Kırıcıdan geçirilen hammaddeler, fırın rulo atığı ile Çizelge 4.1'de belirtilen reçeteye göre toplam 5 kg olacak şekilde tartılmıştır. Hammadde içeriğine ağırlıkça %50 oranında su, %1 oranında sodyum silikat ilave edilmiştir.

Çizelge 4.1. Standart ve fırın rulo atığı ilaveli malzemelerde kullanılan reçeteler

	Kil	**Pegmatit**	**Kalsit**	**Silis Kumu**	**Fırın Rulo Atığı**
S (%)	56	26	11	7	-
A (%)	44	20	9	17	10

4.2.2. Öğütme

Alümina bilyeli değirmenlere alınan hammaddeler 4 saat boyunca 200-390 rpm hızda karıştırılarak öğütülmüştür. İstenen yoğunluk, viskozite ve elek bakiye değerlerine ulaşan çamurlar değirmenlerden alınarak 200 ˚C sıcaklığındaki etüvde %0 neme ulaşana kadar kurutulmuştur.

4.2.3. Granül biçimine getirme

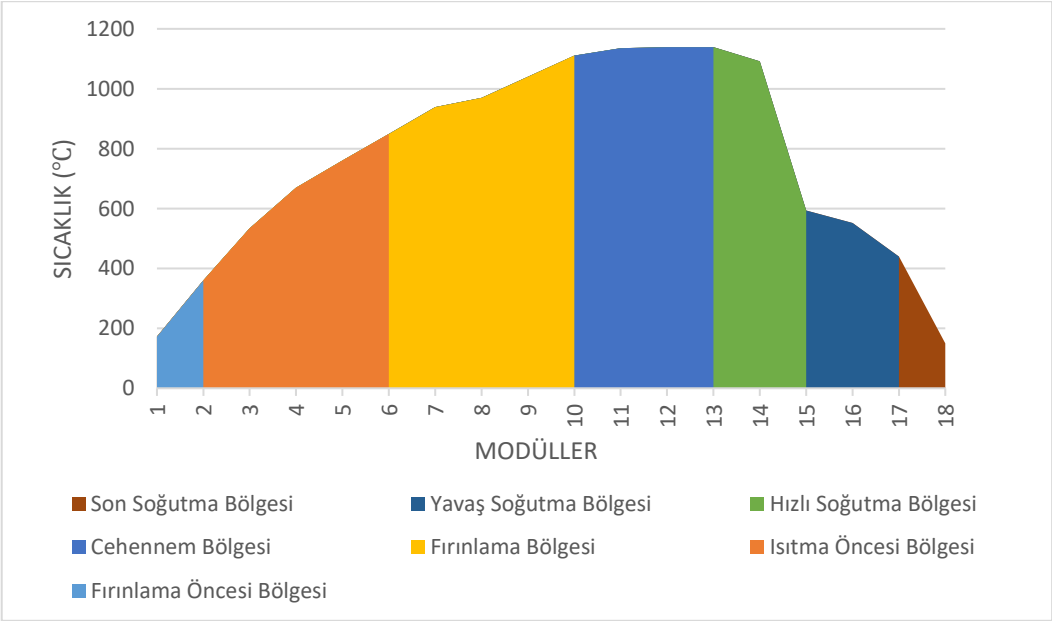
Kuruyan çamurlar ağırlıkça %6 oranında nemlendirilerek 1,2 mm'lik elekten geçirilmiştir. Böylece granül masse elde edilmiştir.

4.2.4. Şekillendirme

Granül biçimdeki masse, 10 cm × 20 cm boyutlarında çelik kalıba sahip bir el presi kullanılarak 140 bar basınç altında şekillendirilmiştir. Şekillendirilen karolarda buhar basıncına bağlı olarak çatlama, patlama ve yüzey düzgünlüğü bozulmalarının önlenmesi amacıyla, örnekler 100 °C'deki etüvde 1 saat boyunca kurutularak gövdelerindeki su uzaklaştırılmıştır.

4.2.5. Sinterleme

Seramik karo gövdeleri 1139 °C, 32,30 dk rejimindeki endüstriyel fırına beslenerek sinterlenme gerçekleştirilmiştir. Bu aşamada yaklaşık 120 m uzunluğunda çift pişirim gerçekleştiren bir endüstriyel fırın kullanılmıştır. Şekil 4.2'de fırın rejim grafiği verilmiştir.



Şekil 4.2. Çalışma sürecinde kullanılan endüstriyel fırın rejimi eğrisi,

4.3. Yüzey Kaplama

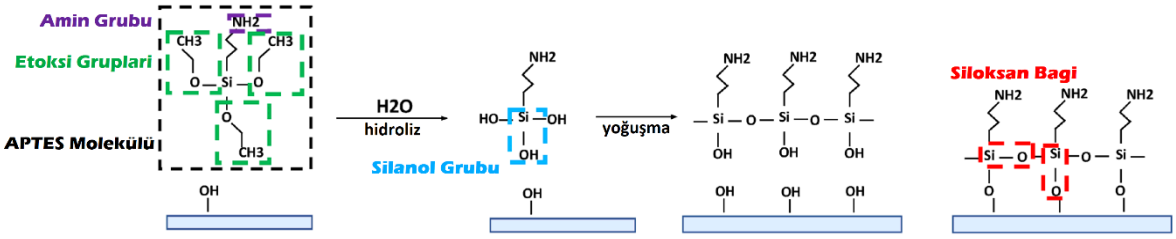
Yüzey kaplama işlemi kapsamında, kaplama olarak uygulanacak epoksi ve silikon malzemelerinin daha iyi tutunmasını sağlamak amacıyla yüzeye öncelikle kimyasal aşındırma uygulanmıştır. Daha sonra standart ve atık ilaveli gövdelere kaplama işlemleri gerçekleştirilmiştir.

SE standart reçeteli gövde yüzeyine epoksi, SS standart reçeteli gövde yüzeyine silikon, AE atık ilaveli gövde yüzeyine epoksi ve AS atık ilaveli gövde yüzeyine silikon kaplanmış seramik örnekleri temsil etmektedir.

4.3.1. Kimyasal aşındırma işlemi

Aşındırma işlemi için öncelikle gallik asit ($C_7H_6O_5$), 2 g/L derişimde deiyonize su içinde çözdürülmüştür. Çözeltiye, toplam hacime oranı %1,6 olacak miktarda APTES ilave edilerek karıştırılmıştır. Elde edilen çözelti çeker ocakta cam haznelere aktarılmış ve seramik karo örneklerinden her biri 100 mL çözelti içinde 40 dk boyunca bekletilmiştir (Zhu vd., 2023).

APTES, oksit içeren yüzeylerin özelliklerini değiştirmek, geliştirmek için sıklıkla kullanılan bir organosilan molekülüdür. Seramik karo, cam gibi oksit içeren yüzeylerde sık kullanılmasının nedeni bu yüzeylerin silan molekülleri ile hızla etkileşime girip kovalent bağ oluşturabilecek yüksek yüzey enerjisine sahip hidroksil gruplarını (-OH) içeren yüzeyler olmalarıdır (Sypabekova vd., 2022). APTES, amin ($-NH_2$) ve etoksi gruplarını ($-OCH_2CH_3$) içermektedir. Su ile temas ettiğinde etoksi gruplarını kaybederek silanol grupları (Si-OH) oluşmaktadır, yani hidroliz olayı gerçekleşmektedir. Hidrolize uğrayan APTES yüzeydeki –OH grupları ile Si-O-Si bağları oluşturur. Bu bağlara siloksan bağı da denmektedir (Şekil 4.3 (Sypabekova vd., 2022)) ve çok güçlü kovalent bağlardır. Molekülün serbest ve reaktif uçta bulunan amin ($-NH_2$) grubu ise polimerin bağlanmasını sağlar. Bu yöntemle yüzeylere polimer kaplamalar uygulanabilmekte, bu kaplamaların yüzeyde tutunma performansı artırılabilmekte ve yüzeylere başka kimyasal özellikler kazandırılabilmektedir.



Şekil 4.3. APTES molekülünün, aktivasyonunun ve hidroksillenmiş oksit yüzeyiyle reaksiyonunun şematik gösterimi

4.3.2. Kaplama işlemi

Kaplama işlemi; atık ilaveli ve standart seramik karo yüzeylerinin polimerlerle modifikasyonunun etkilerini incelemek amacıyla epoksi ve silikon olmak üzere iki farklı polimer ile gerçekleştirilmiştir. Uygulama kapsamında, sıvı silikon ve epoksi malzemeleri yeterli miktarda düz ve yatay havuzlara doldurulmuş ve yüzeyi aşındırılan seramik karo örnekler, üst yüzeyleri tamamen temas edecek şekilde bu havuzlara daldırılmıştır. Kronometre eşliğinde eşit hızda kaplama sıvısından çıkarılan karolar, düz ve delikli bir raf üzerinde oda sıcaklığında kurumaya bırakılmıştır. Bu yöntem, polimer kaplamanın seramik karo yüzeyine homojen olarak yayılmasını ve yüzeyin tamamının kaplanmasını sağlamıştır.

4.4. Seramik Karoların İncelenmesi

4.4.1. Yoğunluk ve viskozite ölçümü

Yoğunluk ölçümü için 100 mL'lik piknometrenin darası alınıp hazne örnek ile doldurulmuştur. Piknometre tartıldıktan sonra okunan değer g/L birimine çevrilerek yoğunluk bulunmuştur.

Seramik çamurunun viskozite ölçümünde, 4,0 mm orifis çapına sahip viskozite akış kabı (ford cup) kullanılmıştır. 100 mL örnek hazneye döküldükten sonra haznenin ucu ve kronometre aynı anda açılmış ve haznedeki örnek miktarı bitene kadar beklenmiştir. Örnek miktarı bittiği anda kronometre durdurulup süre kaydedilmiştir. Ölçülen yoğunluk, süre değerleri ve 4 numaralı akış kabı için ASTM D1200 standardında verilen Eşitlik 4.1 kullanılarak kinematik viskozite değeri hesaplanmıştır.

$$\nu = 3{,}85\ x\ (t - 4{,}49) \tag{4.1}$$

4.4.2. Elek bakiye ölçümü

Karışım 63 µm'luk elek üzerine dökülmüş ve tazikli su ile eleme işlemi gerçekleştirilmiştir. Elek üzerinde kalan kısım piset yardımıyla bir kaba aktarılarak etüvde kurutulmuştur. Nem %0'a indirildikten sonra elek üstünde kalan madde tartılıp, Eşitlik 4.2 ve 4.3 kullanılarak elek bakiye değeri hesaplanmıştır.

$$\text{Kuru Madde Miktarı} = \frac{d}{(d-1)\ x\ 10} \times (\text{D} - 1000) \tag{4.2}$$

$$\%\ \text{Elek Bakiye} = \frac{Kurutulan\ Madde\ Miktarı}{Kuru\ Madde\ Miktarı} \times 100 \tag{4.3}$$

Burada d katı maddenin gerçek yoğunluğunu (g/cm³), D süspansiyon yoğunluğunu (g/L) ve 1000 değeri suyun yoğunluğunu (g/L) temsil etmektedir. Elek bakiye tayini için süspansiyondan 100 mL örnek alınmıştır.

4.4.3. Boyut ölçümü

Örnek şekillendirme aşamasındaki kalıp boyu (L_1) kaydedilmiştir. Şekillendirilen karo örneğinin boyu (L_2) kumpas yardımı ile ölçülmüş ve Eşitlik 4.4 kullanılarak pres ekspansiyonu değeri hesaplanmıştır.

$$\%\ \text{Pres Ekspansiyonu} = \frac{L_1 - L_2}{L_1} \times 100 \tag{4.4}$$

Daha sonra karolar belirlenen sıcaklık ve sürede etüvde kurulmuştur. Kurutma işleminden sonra tekrar kuru boyut (L_3) ölçümü gerçekleştirilmiş ve Eşitlik 4.5 kullanılarak % kuru küçülme değeri hesaplanmıştır.

$$\%\ \text{Kuru Küçülme} = \frac{L_1 - L_3}{L_1} \times 100 \tag{4.5}$$

Belirlenen sıcaklık ve sürede sinterlenen karoların pişmiş boy (L_4) ölçümü yapıldıktan sonra Eşitlik 4.6 kullanılarak % pişme küçülme değeri hesaplanmıştır.

$$\% \text{ Pişme Küçülme} = \frac{L_1 - L_4}{L_1} \times 100 \quad (4.6)$$

4.4.4. Mukavemet ölçümü

Ölçümü gerçekleştirilmesi istenen örnek mukavemet cihazının mesnetleri üzerine örneğin kenar uzunluğu 18 cm ≤ boy ≤ 48 cm ($\pm$) 2 mm olarak düz yüzey yukarı bakacak şekilde yerleştirilmiştir. Mesnetler arası uzaklık (L) kaydedilip örneğe sabit hızla kuvvet uygulanmış ve kırıldığı andaki kırılma yükü (P) cihaz üzerinden okunmuştur. Örneğin kırıldığı bölgedeki genişliği (d) ve taban kalınlığı (b) ölçülüp Eşitlik 4.7 kullanılarak birim alana etki eden kuvvet (kg/cm^2) hesaplanmıştır.

$$\text{Birim alana etki eden kuvvet} = \frac{3}{2}\frac{P.L}{b^2.d} \quad (4.7)$$

4.4.5. Nem ölçümü

Örnek preslendikten sonra tartılmış ve ilk tartım (M_w) kaydedilmiştir. Tartılan örnek 100 °C'deki etüvde 2 saat bekletildikten sonra son tartımı (M_d) yapılmış ve Eşitlik 4.8 kullanılarak nem değeri (%) hesaplanmıştır.

$$\% \text{ Nem} = \frac{M_w M_d}{M_w} \times 100 \quad (4.8)$$

4.4.6. Su emme ölçümü

Su emme analizi uygulanacak örneklerin kuru tartımları (W_d) yapılmıştır. Daha sonra örnekler su emme cihazının haznesine dik olarak yerleştirilerek -90 kPa değerinde 30 dk vakumlanmıştır. Cihaz su almaya başladıktan sonra örnekler 15 dk boyunca suda bekletilmiştir. 15 dk sonunda cihaz otomatik olarak suyunu boşalttıktan sonra örnekler kurulanarak son tartımları (W_w) yapılmıştır. Su emme yüzdesi Eşitlik 4.9'a göre hesaplanmıştır.

$$\% \text{ Su Emme} = \frac{W_w - W_d}{W_d} \times 100 \quad (4.9)$$

4.4.7. Kızdırma kaybı ölçümü

Örnek gövdesindeki nem tamamen uzaklaştırılana kadar etüvde kurutulan örneklerin ham tartımı (W_h) gerçekleştirilmiştir. Daha sonra belirlenen fırın rejiminde sinterlenen örneğin pişirim sonrası tartımı (W_s) yapılmıştır. Böylece sinterlenme sırasında örneğin yapısında bulunan organik madde, bağlı su, karbonat vb. kayıpları ile oluşan kütle kaybı Eşitlik 4.10'a göre hesaplanmıştır.

$$\% \text{ Kızdırma Kaybı} = \frac{W_h - W_s}{W_h} \times 100 \quad (4.10)$$

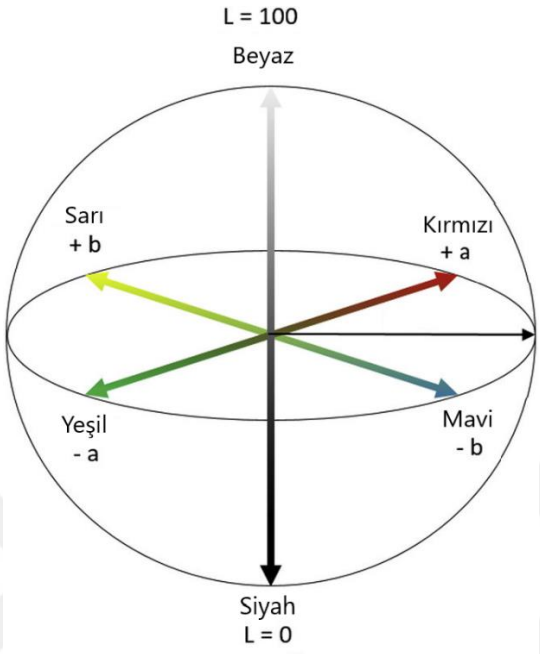
4.4.8. Renk ölçümü

Seramik karo gövdelerinin renk ölçümü, Şekil 4.4'te gösterilen Konica Minolta marka CM-26dG model spektrofotometre cihazı tarafından "renk uzayı" modeli kullanılarak gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4.4. Renk ölçümü için kullanılan spektrofotometre cihazı

Renk uzayı, renkleri belirli bir diyagramda (Şekil 4.5 (Ly vd., 2020)) tanımlanarak sayısal değer olarak ifade edilebilir ve karşılaştırılabilir olmalarına olanak tanır. Kullanılan cihaz CIELAB renk uzayı ile uyumludur.



Şekil 4.5. CIELAB renk uzayı diyagramı

Burada;
L = açıklık – koyuluk (0 = siyah, 100 = beyaz)
a = yeşillik – kırmızılık (negatif = yeşil, pozitif = kırmızı)
b = mavilik – sarılık (negatif = mavi, pozitif = sarı)

4.4.9. Isıl genleşme analizi

Boyutları 25-50 mm x 5 mm x 5 mm olarak kesilen seramik karo gövdelerinin ısıl genleşme analizinin gerçekleştirilmesi için örnekler, son iki tartımı arasındaki fark ~%0,1 olana kadar ~105°C±5 sıcaklığındaki etüvde bekletilmiştir. Daha sonra oda sıcaklığında bekletilen örneklere, ısıtma hızı 10 ℃/dk ile 700 ℃'ye kadar olan standart bir pişme periyodu uygulanmıştır. Analiz, Netzsch marka 402PC model dilatometre cihazı ile yapılmıştır.

4.4.10. XRF analizi

Fırın rulo atığı, standart ve atık ilaveli gövde örneklerinin XRF analizlerinin gerçekleştirilmesi için öncelikle örnekler tungsten halkalı öğütücü ile tane boyutu 63µm altına gelecek şekilde öğütülmüştür. Daha sonra örnekler ~105±5°C etüvde 4 saat kurutulmak üzere bekletilmiştir. Ham örneklerin kızdırma kaybına ~1000 °C'de bakılmıştır. Yarı kantitatif kimyasal analiz, Rigaku marka ZSX Primus model XRF cihazı ile gerçekleştirilmiştir.

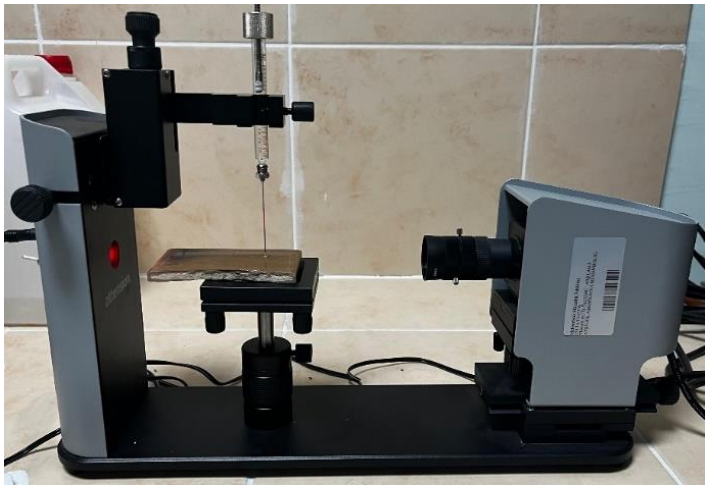
4.4.11. XRD analizi

Standart ve atık ilaveli gövde örneklerinin XRD analizlerinin gerçekleştirilmesi için öncelikle örnekler tungsten halkalı öğütücü ile tane boyutu 63 µm altına gelecek şekilde öğütülmüştür. Daha sonra örnekler ~105±5 °C etüvde 4 saat kurutulmak üzere bekletilmiştir. XRD analizi Rigaku marka Miniflex 600 model XRD cihazı ile standart tarama aralığında (2Ɵ=5°-70°) gerçekleştirilmiştir.

4.4.12. Temas açısı ölçümü

Temas açısı ölçümü, katı bir yüzeyin ıslanabilirliğini belirlemek için kullanılan bir yöntemdir. Bu açı, malzeme yüzeyinin hidrofobik – hidrofilikliği hakkında bilgi verir. Temas açısının yükselmesi, malzemenin hidrofobikliğinin arttığını göstermektedir.

Ölçüm, Attension Theta Optical Tensiometer cihazında (Şekil 4.6) gerçekleştirilmiştir. Analiz için; örnek, temas açısı ölçüm cihazına yerleştirilmiştir. Enjektör kullanılarak malzeme yüzeyinin 3 farklı bölgesine bir damla saf su enjektör ile damlatılmış ve damlanın davranışı kamera ile görüntülenmiştir. Elde edilen temas açıları kaydedilmiştir.



Şekil 4.6. Temas açısı ölçüm cihazı

4.4.13. Kaymazlık (pendulum) testi

Kaymazlık (pendulum) testi, yüzeyin kayma direncini ölçmek için kullanılan bir test yöntemidir. Cihaz sarkacının ucunda bulunan kauçuğun, örnek yüzeyine ilk ve son temas ettiği noktalar arası mesafe 124 ± 1 mm olacak şekilde ayarlanır. Yüzey saf su ile ıslatıldıktan sonra sarkaç örnek yüzeyine belirli yükseklikten bırakılmış ve bir salınım yapması sağlanmıştır. Yüzeydeki sürtünme bu salınımın şiddetini azaltır. Bu kaymazlık değeri PTV (Pendulum Test Value) olarak belirtilir ve cihaz üzerinden okunmaktadır. Okunan değer küçüldükçe yüzeyin kayma direnci azalır.

Kaymazlık değeri ölçümü için Munro – Stanley London marka pendulum cihazı kullanılmıştır.

4.4.14. Aşınma testi

Aşınma testi, yüzeyin mekanik etkilere karşı direncini ve oluşabilecek malzeme kaybını belirlemek için kullanılan bir yöntemdir. Bu yöntemde örnekler 10 cm x 10 cm boyutlarında kesilmiş ve cihaz içindeki tablalar üzerine sabitlendikten sonra yüzeyleri delikli kapaklar ile kapatılmıştır. Bu deliklerin her birine 20 mL saf su, 3 g korund ve farklı çaplardaki çelik bilyeler konulmuştur. Çalışmadaki çelik bilyelerin çaplarına göre kullanıldıkları miktarlar Çizelge 4.2'de belirtilmiştir. Test, Ceramic Instruments marka PEI/300/C model aşınma cihazı (Şekil 4.7) kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Çizelge 4.2. Kullanılan çelik bilye miktarının çaplarına göre dağılımı

Çap ***(mm)***	**Miktar** ***(g)***
1	8,75
2	43,75
3	52,50
5	70,00

Aşınma işlemi, örneklerden üçer adet cihaza yerleştirilerek sırasıyla 600, 1500 ve 2100 devirde gerçekleştirilmiştir. Üç kademede de aşındırma işlemi gerçekleştikten sonra örneklerin yüzeyi yıkanıp kurutulmuştur. 300 lükslük ışık altına yerleştirilen örneklerin yüzeyleri karartılmış odada, 1,65 m yüksekten ve 2 m uzaklıktan kontrol edilerek aşınma direnci sınıflandırılması gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4.7. Aşınma testi için kullanılan cihaz

4.4.15. Optik mikroskop analizi

Yüzey kaplaması uygulanmış seramik karo gövdelerinin optik mikroskop ile kesit görüntüleri 10X büyütmede, NSZ-606 model Zoom Stereo mikroskop ile analiz edilmiştir.

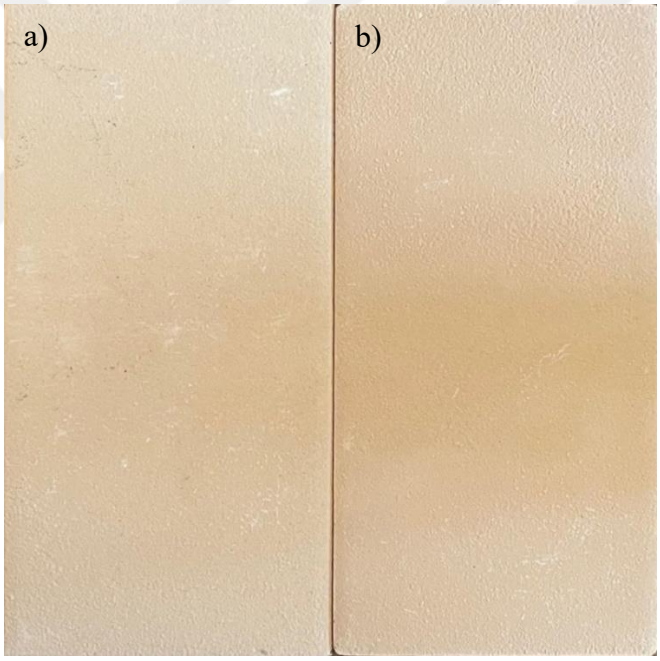
4.4.16. SEM analizi

Yüzey kaplaması uygulanmış seramik karo gövdelerin SEM analizi Phenom ProX G7 marka cihaz ile gerçekleştirilmiştir. Örnekler öncelikle iletkenliği sağlaması için altın-paladyum alaşımı ile kaplanmıştır. Örneklerin kesit görüntüleri ikincil elektron (SE) ve geri yansıyan elektronlarla (BSE) alınmıştır. Analiz, 20 kV çözünürlük değeri ve 1000X büyütme oranlarında gerçekleştirilmiştir.

5. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu çalışmada; seramik karo gövdesine seramik fırını rulolarının atığı eklenerek hazırlanan kompozit seramik gövdesi için standart kalite kontrol testleri ile yapı/yüzey karakterizasyonları (XRF, XRD ve ısıl genleşme analizi) yapılmıştır. Ayrıca seramik gövdelere uygulanan yüzey işlemi ardından iki polimer ile kaplama gerçekleştirilmiştir. Yüzey kaplamalarının etkilerinin incelenmesi için ise temas açısı ölçümü, SEM analizi, kaymazlık testi, aşınma testi ve optik mikroskop analizi uygulanmıştır.

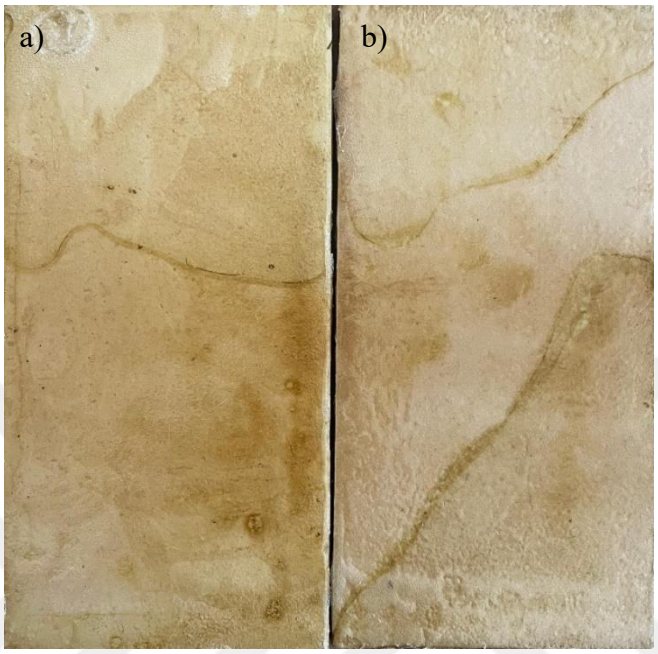
S, A, SE, SS, AE ve AS seramik örneklerinin görselleri Şekil 5.1-3'te verilmiştir.



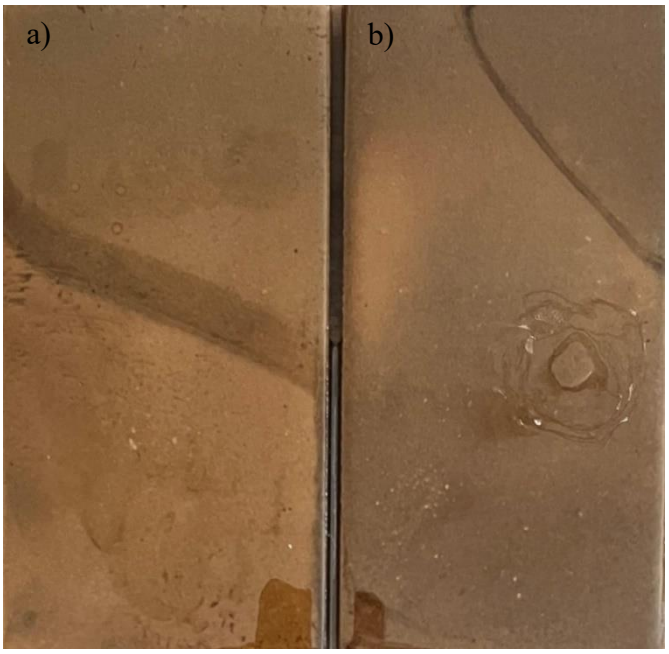
Şekil 5.1. a) Atık ilaveli (A) ve b) Standart (S) gövde örneklerinin görselleri

Atık ilaveli seramik karo reçetesi oluşturulurken; atığın XRF analiz sonuçları dikkate alınmıştır. Standart reçeteye kıyasla kil, pegmatit ve kalsit hammaddeleri azaltılırken bu fark silis kumu ve atık ilavesiyle tamamlanmıştır. Yüksek Al_2O_3 oranına sahip atığın ilave edilmesiyle gövde yapısındaki Al_2O_3'in daha fazla artarak refrakterlikle beraber pişme zorluğuna neden olduğu bilinen (Saufi vd., 2021) kil miktarı düşürülmüştür. Ayrıca atığın içerdiği düşük SiO_2 oranını dengelemek ve müllit faz oluşumunu sağlamak için literatürde belirtilen (Darkhan vd., 2025), yapısında yüksek oranda SiO_2 içeren silis kumu miktarı

artırılmıştır. Pegmatit oranının düşürülme nedeni daha önceki çalışmalarda belirtildiği gibi (Ismail vd., 2022); geç eriyen Al_2O_3 oranını yükseltirken erken eriyen bir gövde oluşmasını engellemektir.



Şekil 5.2. a) AS ve b) SS örneklerinin görselleri



Şekil 5.3. a) AE ve b) SE örneklerinin görselleri

5.1. Seramik Çamurunun Fiziksel Özellikleri

Masse çamurunun yoğunluk, kinematik viskozite ve elek bakiye gibi fiziksel özellikleri üç tekrarlı şekilde ölçülmüş, elde edilen bulguların ortalaması Çizelge 5.1'de verilmiştir.

Çizelge 5.1. Masse çamurunun fiziksel özellikleri

	Yoğunluk ***(g/L)***	**Kinematik Viskozite** ***(mm^2/s)***	**Elek Bakiye** ***(%)***
S	1671	98,2	3,4
A	1674	90,5	3,6

Fiziksel özellikler incelendiğinde; atık ilaveli masse çamurunun litre ağırlığı ve elek bakiye değerlerinin standart masse çamuruna kıyasla daha yüksek, kinematik viskozite değerinin daha düşük olduğu görülmektedir. Litre ağırlığı değerleri neredeyse aynı olup katı/su miktarı arasındaki denge korunmuştur. Ayrıca değerler duvar karosu için istenen (Emir, 2020) 1640-1680 g/L değer aralığındadır. Atık ilaveli çamurun elek bakiye değerinde gözlenen %0,2'lik fark üretim sürecinde de gözlenmekte olup ihmal edilebilecek düzeydedir.

5.2. Boyut Kararlılık Sonuçları

Şekillendirilen seramik karoların boyut ölçümleri üç farklı örnek için alınmış ve Çizelge 5.2'de verilmiş olup ölçüm kapsamında yalnızca kenar uzunlukları kullanılmıştır. Bu değerler kullanılarak genleşme/küçülme değerleri hesaplanmıştır.

Çizelge 5.2. Boyut ölçümleri ve genleşme/küçülme sonuçları

	Ortalama Kısa Kenar Uzunluğu ***(mm)***	**Ortalama Uzun Kenar Uzunluğu** ***(mm)***	**Genleşme / Küçülme** ***(%)***
Yaş Boyut Ölçümü (Pres Ekspansiyonu)			
S	100,60	201,05	0,68
A	100,50	201,00	0,50
Kuru Boyut Ölçümü			
S	100,50	201,00	0,50
A	100,50	200,90	0,48
Pişmiş Boyut Ölçümü			
S	100,14	200,20	0,12
A	100,23	200,30	0,18

Yaş ve kuru boyut ölçüm sonuçları incelendiğinde her iki gövdenin de yakın sonuçlar sergilemiştir. Pişmiş boyut ölçümleri karşılaştırıldığında ise; ısıl işlemin boyut kararlılığında hala daha az etkisi olduğu görülmekle birlikte; atık ilaveli gövdede, pişme aşamasında standart gövdeye kıyasla %0,06 gibi oldukça az bir fark gözlenmiştir.

5.3. Mukavemet Ölçümleri

Yaş, kuru ve pişmiş seramik örneklerin üç tekrarla gerçekleştirilen mukavemet ölçüm sonuçlarının ortalama değerleri Çizelge 5.3'te verilmiştir.

Çizelge 5.3. Yaş, kuru ve pişmiş örneklerin mukavemet değerleri

	Ortalama Mukavemet ***(kg/cm²)***
Yaş Mukavemet Ölçümü	
S	5,0
A	4,4
Kuru Mukavemet Ölçümü	
S	10,6
A	7,8
Pişmiş Mukavemet Ölçümü	
S	177,5
A	173,3

Atık ilaveli gövdenin yaş ve kuru mukavemetinin düşük olması, daha önceki bir çalışmada (Barnes, 2018) belirtildiği gibi; bu çalışmada plastiklik sağlayan kil oranının standart gövde reçetesine göre %12 daha düşük olmasının etkisi ile ilişkilendirilebilir. BS EN 14411 standardına göre duvar karolarında pişmiş mukavemet değeri; kalınlığı < 7,5 mm olan karolar için minimum 153 kg/cm² olarak belirlenmiş olup 7 mm kalınlığındaki her iki örnek de yeterli pişmiş mukavemeti sağlamıştır.

5.4. Nem Sonuçları

Seramik gövdelerin yaş ve kuru ağırlık ölçümleri kullanılarak hesaplanan nem yüzdeleri Çizelge 5.4'te verilmiştir.

Çizelge 5.4. Seramik gövdelerin nem yüzdeleri

	Nem *(%)*
S	5,40
A	6,00

Standart reçeteli gövdeye kıyasla, atık ilaveli gövdenin içerdiği nem oranının %0,6 daha yüksek olduğu gözlenmiştir. Bunun nedeni, ilave edilen atığın içerdiği yüksek Al_2O_3 miktarı nedeniyle gözenekli bir yapı oluşturması ve su tutma eğiliminin artma göstermesidir (Ji vd., 2016). Bu su miktarı gövdeden uzaklaşırken büzülmeye/küçülmeye neden olmamıştır. Nedeni ise atık ilaveli reçetede kil miktarının azalmasıdır. Plastiklik sağlayan kil oranı düştüğünde yapıdaki suyun büyük kısmı hacim değişikliğine neden olmadan uzaklaşmaktadır (Zaccaron vd., 2021). Ayrıca nem ölçüm sonuçları mukavemet değerleri ile uyumludur. Atık ilaveli gövde için, kuru mukavemetin düşük olmasının nedeni, gövdenin içerdiği suyun uzaklaşması ve yapıda mikro gözeneklerin oluşumu ile açıklanabilir. Gövde içinde %4-7 aralığında kalan nem, seramik karolar için normal ve kurutma aşaması için kontrol edilebilecek bir aralıktadır (Sacmi, 2008). Her iki örneğin de içerdiği nem oranı bu değer aralığındadır.

5.5. Su Emme Bulguları

Dörder örneğin tartımı ile hesaplanan ortalama su emme yüzdeleri Çizelge 5.5'te verilmiştir.

Çizelge 5.5. Örneklerin ortalama su emme yüzdeleri

	Ortalama Su Emme ***(%)***
S	17,00
A	17,50

Atık ilaveli gövdenin su emme yüzdesinin standart gövdeden %0,5 daha fazla olduğu görülmüştür. Duvar karoları için TS EN 14411 / ISO 13006 standardı kapsamında kabul edilen su emme değerinin %10 üzerinde olması beklenmektedir. Hesaplanan %17,50'lik su emme değeri standart ile uyumludur.

5.6. Kızdırma Kaybı Ölçüm Sonuçları

Kızdırma kaybı ölçümü için alınan tartım değerleri ve hesaplanan kızdırma kaybı oranları Çizelge 5.6'da belirtilmiştir.

Çizelge 5.6. Ortalama kızdırma kaybı sonuçları

	Ortalama Kızdırma Kaybı *(%)*
S	10,40
A	7,90

Atık ilaveli gövdede, standart reçeteli gövdeye göre %2,5 daha az kızdırma kaybı meydana geldiği görülmüştür. Standart reçeteli gövdenin daha yüksek kızdırma kaybına sahip olmasının daha yüksek oranda kalsit içermesinden kaynaklandığı düşünülmektedir. $CaCO_3$ pişirim aşamasında CaO ve CO_2 olarak ayrışır, CO_2 doğrudan bir kütle kaybına neden olur (Karunadasa vd., 2019). Standart reçetenin içerdiği yüksek kil miktarı, pişirim sırasında uzaklaşarak kütle kaybına neden olacak daha fazla bağlı suyu yapısında bulundurduğu anlamına gelmektedir (Lo Dico vd., 2024). Ndjigui vd., yaptıkları bir çalışmada kil malzemelerinin %5-17 aralığında kızdırma kaybına neden olabileceğini belirtmişlerdir (Ndjigui vd., 2021). Öte yandan alümina kimyasal olarak kararlı olup pişirim aşamasında yüksek kütle kaybına neden olmaz (Xie vd., 2025).

5.7. Renk Değerlendirme Bulguları

Standart ve atık ilaveli gövdelerin L (açıklık – koyuluk), a (kırmızılık – yeşillik), b (sarılık – mavilik) değerleri ve "black core" hatası değerlendirmesi Çizelge 5.7'de verilmiştir.

Çizelge 5.7. L, a, b ölçüm sonuçları ve black core değerlendirmesi

	S	**A**
L (Açıklık – Koyuluk)	72,71	75,92
a (Kırmızılık – Yeşillik)	7,48	6,93
b (Sarılık – Mavilik)	15,88	15,06
Black Core	Var	Yok

Ölçüm sonuçları incelendiğinde; atık ilaveli gövdenin açıklık değeri daha yüksek gelmiştir. Bunun nedeni kırmızılık ve sarılık değerlerinin düşmesinin yanı sıra gövdenin

daha iyi oksitlendiğinin göstergesi olabilir. Kırmızılık değerinin daha düşük ölçülmesinin ve black core oluşumunun gözlenmemesinin nedeni ise Fe_2O_3 kaynaklı fazların düşüşü ile ilintilidir. Black core oluşumu, yanma sırasında yapısından oksijen alınan Fe_2O_3'in FeO'e indirgenmesinden kaynaklanmaktadır (Moshnyakov ve Abdrakhimov, 2019).

Şekil 5.4'te kesit görüntüsü verilen seramiklerden atık ilaveli gövdede black core gözlenmemiştir. Kızdırma kaybı bulgularında, gövdede CO_2, su ve organik gaz miktarının daha az olduğu değerlendirilmişti. Ayrıca gaz çıkışının daha dengeli olması ve oksijenin gövde merkezine ulaşarak karbon fazlarının tamamen yanmasını sağlaması da etken olabilir.



Şekil 5.4. a) S ve b) A seramik karo gövdelerinin kesit görüntüleri

5.8. Isıl Genleşme Katsayıları

Gövdelerin, 0-300 °C, 0-400 °C, 0-500 °C sıcaklık aralığında ölçülmüş ortalama lineer ısıl genleşme katsayıları Çizelge 5.8'de verilmiştir. Değerler; gövde, 0'dan üst sıcaklıklara ısıtıldığında, artan 1°C sıcaklık için mikron düzeyinde ne kadar genleşme olduğunu göstermektedir. Her iki gövde için farklı üst sıcaklık değerlerine ısıtma için birbirine yakın katsayılar bulunmuştur. BS EN 14411 / ISO 10545 - 8 standardına göre su emme değeri %10'dan yüksek seramik karolar için ısıl genleşme değeri $90x10^{-7}$ K^{-1}'den küçük olmalıdır. Her iki gövde de ideal genleşme aralığında kalmayı başarmıştır.

Çizelge 5.8. Seramik karo gövdelerinin ısıl genleşme analiz sonuçları

	$\alpha_{300}x10^{-7}$ (K^{-1})	$\alpha_{400}x10^{-7}$ (K^{-1})	$\alpha_{500}x10^{-7}$ (K^{-1})
S	68,0	70,0	73,3
A	67,8	70,2	73,7

5.9. XRF Analizi Sonuçları

İlk olarak kullanılan fırın rulosu atığının daha sonra hazırlanan seramik karo gövdelerinin XRF analizi sonuçları Çizelge 5.9'da verilmiştir.

Çizelge 5.9. Kullanılan atık ve hazırlanan seramik karo gövdelerinin XRF analiz sonuçları

Bileşen	Fırın Rulosu Atığı Analizi	Standart Gövde Analizi	Atık İlaveli Gövde Analizi
Al_2O_3 *(%)*	70,77	17,73	23,77
SiO_2 *(%)*	25,41	64,98	62,42
K_2O *(%)*	1,17	2,49	1,95
Na_2O *(%)*	0,57	1,81	1,38
Fe_2O_3 *(%)*	0,45	2,60	1,84
TiO_2 *(%)*	0,42	0,70	0,65
MgO *(%)*	0,35	0,64	0,67
CaO *(%)*	0,15	7,60	6,21
P_2O_5 *(%)*	0,15	0,59	0,28
Rb_2O *(%)*	0,10	-	-
SO_3 *(%)*	0,06	0,27	0,23
MnO *(%)*	-	0,039	0,035
A.Z. *(%)*	0,41	0,55	0,56

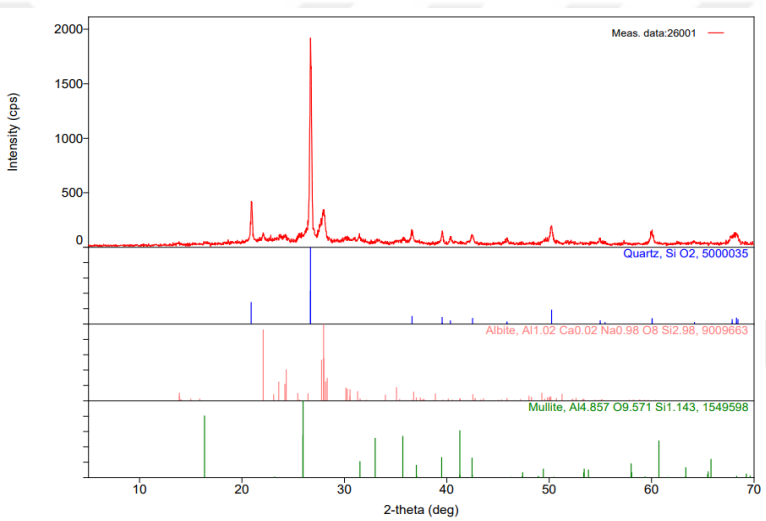
Fırın rulo atıklarının kimyasal analiz sonucu incelendiğinde; yüksek miktarda alüminyum oksit içerdiği gözlenmiştir. Atıklara sahip olduğu yüksek ısıl şok direncini, eğilme direncini ve gözenek karakterini bu oksidin sağladığı söylenebilir. Aynı zamanda atık ilaveli gövde bileşimi, fırın rulo atıklarının XRF analiz sonucu doğrultusunda hazırlanmıştır.

Seramik karo gövdelerinin kimyasal analiz sonuçları karşılaştırıldığında; standart reçeteli gövdenin atık ilaveli gövdeye kıyasla daha yüksek oranda CaO, K_2O ve Na_2O içerdiği görülmüştür. Alkali oksitler standart reçeteli gövdeye daha düşük sıcaklıkta ergime ve camsı faz oluşumu avantajlarını sağlamaktadır (Ismail vd., 2022). Yüksek oranda bulunması black core oluşumuna neden olduğu belirtilen (Moshnyakov ve Abdrakhimov, 2019) Fe_2O_3'ün de yine standart reçeteli gövdede daha fazla bulunduğu görülmüştür. SiO_2

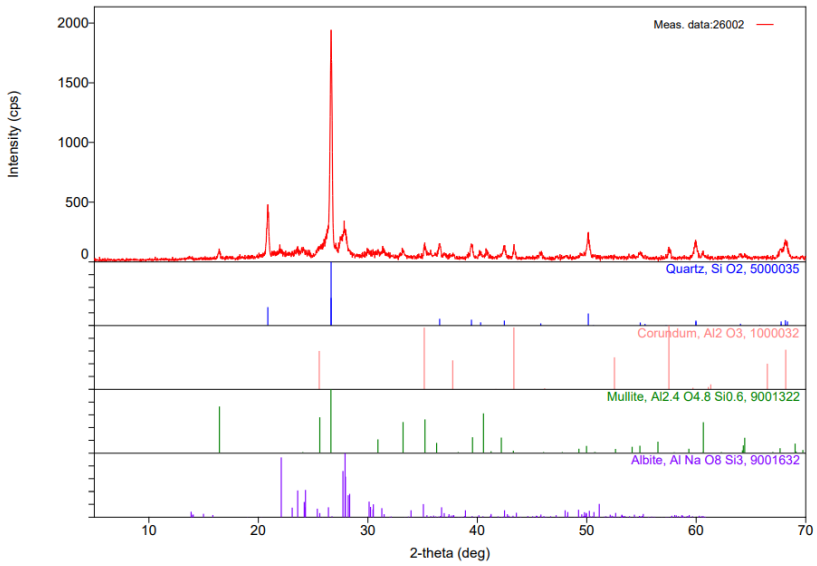
ve Al_2O_3 ise seramik gövdenin temel yapısını oluşturmaktadır. Standart reçeteli gövdede daha fazla bulunan SiO_2 iskelet yapı düzenleyici olarak kullanılırken %75'den yüksek oranda bulunması çatlak oluşumuna neden olabildiği belirtilmektedir (Li vd., 2023). Atık ilaveli gövdede daha yüksek oranda bulunan Al_2O_3'in ise gövdenin mekanik ve kimyasal dayanımını artırdığı da bilinmektedir (Kingery vd., 1976).

5.10. XRD Analiz Bulguları

Her iki seramik karo gövdesinin XRD analizi gerçekleştirilmiş ve difraktogramlar Şekil 5.5 ve 5.6'da verilmiştir.



Şekil 5.5. S gövdesinin XRD difraktogramı

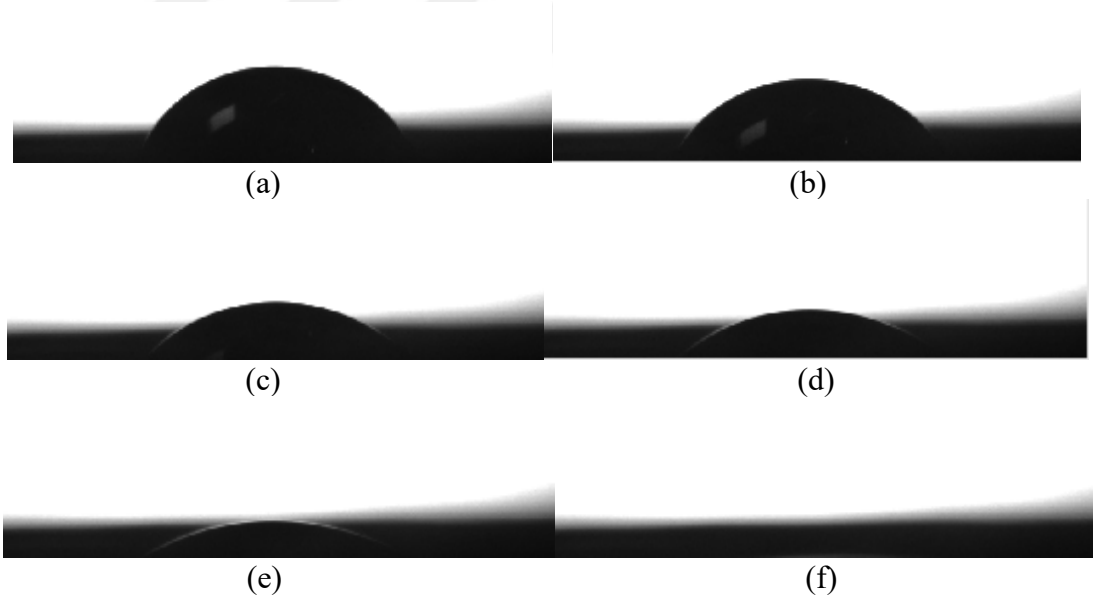


Şekil 5.6. A gövdesinin XRD difraktogramı

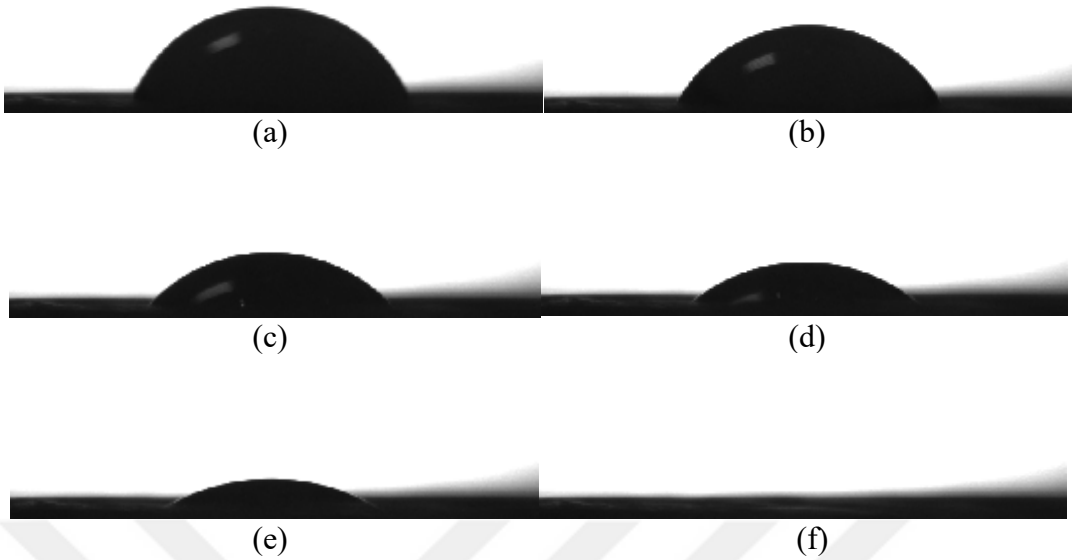
Gövdelerin XRD analiz sonuçları incelendiğinde, standart ve atık ilaveli gövdede; seramik karo için literatürde de gözlenen (Ismail vd., 2022); ana faz olan kuvars, müllit ve albit fazları görülmektedir. Albit fazı akışkanlaştırıcı oksit olarak Na_2O kullanılmasıyla ortaya çıkar ve sinterleme aşamasında kristal albit fazı olarak düşük piklerle bulunur (Davalos vd., 2021). Atık ilaveli seramik karo gövdesinde farklı olarak alüminyum oksit kristal (korund) fazı gözlenmiştir. Bu durumun seramik karo gövdesinde yüksek alümina içeriğine sahip olan fırın rulosu atığının dönüşmesi sonucunda bağlanamayan Al_2O_3'in kristal halde kalması sebebiyle oluştuğu belirtilmiştir (Amigo vd., 2005).

5.11. Temas Açısı Değerleri

Öncelikle farklı reçetelerden oluşan seramik karo gövdelerine daha sonra kaplama işlemi gerçekleştirilen örneklerin farklı bölgeleri için en az üç tekrarlı temas açısı ölçümleri yapılmıştır. Şekil 5.7 ve 5.8'de standart ve atık ilaveli seramik karo gövdelerinin ölçüm görüntüleri verilmiştir.



Şekil 5.7. S karosunda damlanın ilerleyen zamanla (a) 0. s b) 0,5. s c) 1,5. s d) 2. s e) 2,5. s f) 4. s) değişen görüntüleri



Şekil 5.8. A karosunda damlanın ilerleyen zamanla (a) 0. s b) 0,5. s c) 1,5. s d) 2. s e) 2,5. s f) 4. s) değişen görüntüleri

Çizelge 5.10 ve 5.11'de standart ve atık ilaveli seramik karo gövdelerinin ilerleyen zamanla değişen temas açısı ölçüm değerleri belirtilmiştir.

Çizelge 5.10. S seramik karo gövdesi için ilerleyen zamanla değişen temas açısı değerleri

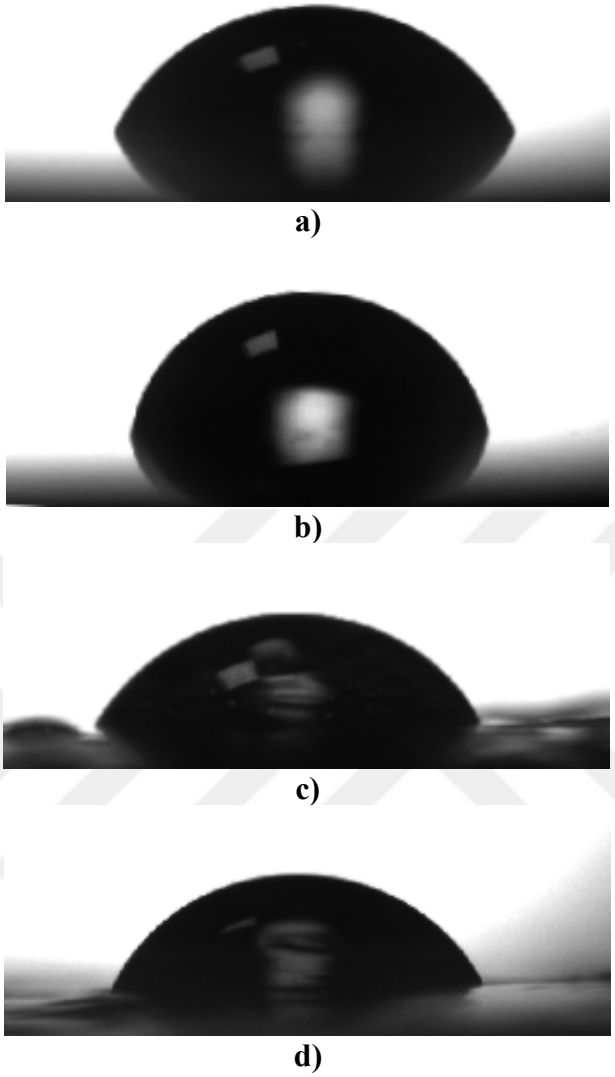
Zaman *(s)*	**0.**	**0,5.**	**1,5.**	**2.**	**2,5.**	**4.**
Temas Açısı *(º)*	55,79	48,84	35,81	28,90	-	-

Çizelge 5.11. A seramik karo gövdesi için ilerleyen zamanla değişen temas açısı değerleri

Zaman *(s)*	**0.**	**0,5.**	**1,5.**	**2.**	**2,5.**	**4.**
Temas Açısı *(º)*	60,20	55,23	41,87	34,38	24,72	-

Gövdelerden her ikisi de suyu hızla emerek temas açısını sıfıra indirmişlerdir.

Yüzey kaplaması uygulanmış SE, AE, SS ve AS örnekleri üzerinde damlanın görüntüleri Şekil 5.9'da; temas açısı ölçümlerinin ortalaması Çizelge 5.12'de verilmiştir.



Şekil 5.9. Örneklerin (a) SE b) AE c) SS d) AS) üzerinde damla görüntüleri

Çizelge 5.12. Örneklerin temas açısı ölçümlerinin ortalamaları

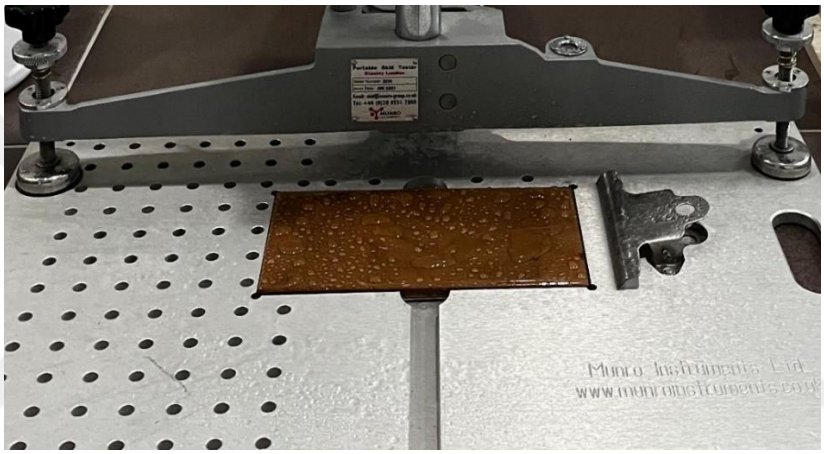
Örnek	**SE**	**AE**	**SS**	**AS**
Temas Açısı *(º)*	66,13	79,88	61,21	64,77

Kaplama uygulanan yüzeylerin temas açısı değerleri uygulanmamış yüzeylere göre daha yüksek değerler elde edilmiştir. Kaplama işlemi uygulanmış örneklerde gerçekleştirilen temas açısı ölçüm değerleri; yüzeyi epoksi ile kaplanan örneklerin silikon ile kaplananlara göre hidrofobikliğe daha yakın davranış sergiledikleri ve atık ilaveli gövdeye uygulanan her

iki malzemenin de standart gövdeye uygulananlara kıyasla daha yüksek açı sergilediği gözlenmiştir. Yüzey ıslanabilirliğinin bir ölçüsü olan temas açısı değerlerinde polimerin doğasının etkili olduğu kadar kaplama altındaki seramik gövde bileşiminin de katkısı dikkat çekmektedir.

5.12. Kaymazlık Testi Sonuçları

Kaymazlık testi, Şekil 5.10'da gösterildiği gibi, her örnek için beş kez tekrar edilmiş olup sonuçlar Çizelge 5.13'te verilmiştir.



Şekil 5.10. Kaymazlık test düzeneğine yerleştirilmiş SE örneği

Çizelge 5.13. Kaymazlık testi ölçüm sonuçları

	SE	**AE**	**SS**	**AS**
1. Ölçüm	20	18	17	19
2. Ölçüm	18	20	17	19
3. Ölçüm	19	20	17	19
4. Ölçüm	19	18	17	19
5. Ölçüm	19	19	17	18
Ortalama Değerler	19,0	19,0	17,0	18,8

Ölçüm sonuçları incelendiğinde; duvar karosu olarak tasarlanan ve üretilen tüm örneklerin ıslak koşullar altında kaymazlık açısından zayıf bir yüzeye sahip olduğu, Çizelge

5.14'de belirtilen standart değerlerine göre düşük kayma direnci taşıdığı gözlenmiştir. Bu durum duvar karoları için kolay temizlik ve kir tutmama açısından olumlu bir özellik olarak değerlendirilebilir. Örnekler gövde içeriğinden bağımsız olarak incelendiğinde; epoksi kaplama uygulanmış olan örnekler silikon ile kaplanmış örneklere göre daha yüksek kaymazlık özelliği sağlamıştır.

Çizelge 5.14. TS EN 14231 standardına göre PTV değerlerinin karşılık geldiği kayma direnci

PTV Değeri	Kayma Direnci
< 25	Düşük
25 – 35	Orta
≥ 36	Yüksek

5.13. Aşınma Testi Sonuçları

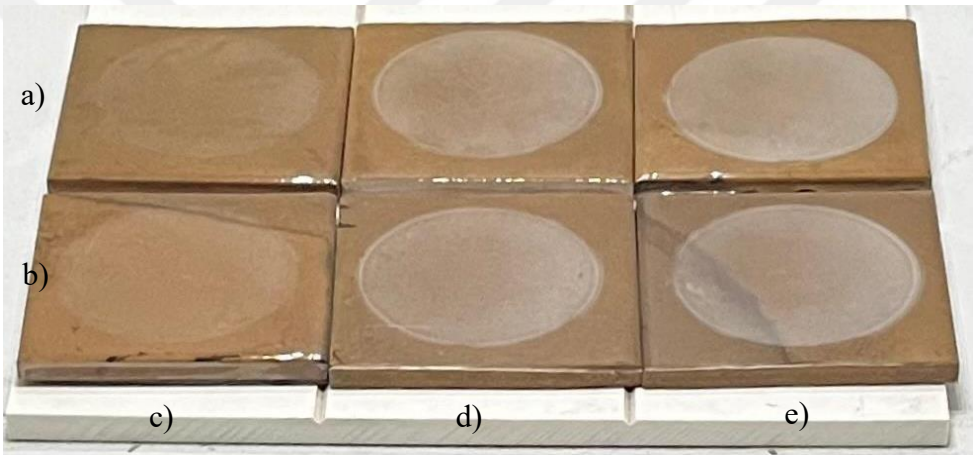
Aşınma testi için örnekler Şekil 5.11'te gösterildiği gibi cihaza yerleştirilmiştir. Test sonuçları belirtilen şartlarda incelenmiş ve Şekil 5.12 ile 5.13'te verilen yüzey görüntüleri Çizelge 5.15'e göre değerlendirilmiştir.



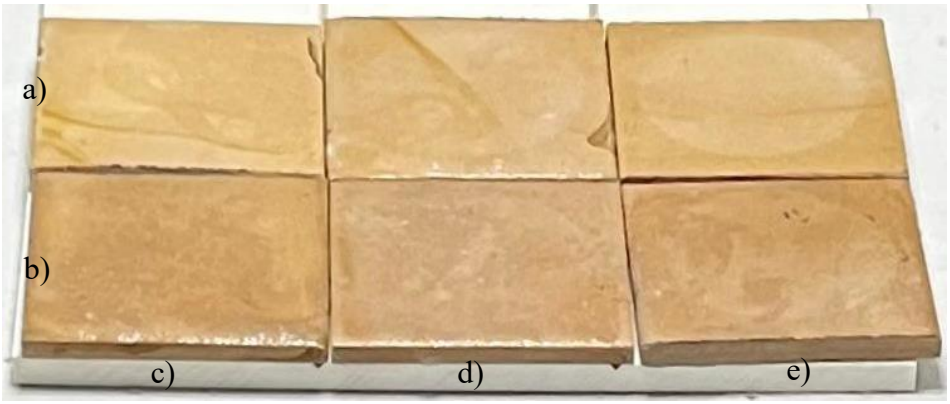
Şekil 5.11. 600 devirde aşınma testi için cihaza yerleştirilen örnekler

Çizelge 5.15. Yüzey aşınma test sonuçlarının sınıflandırılması

Devir	600	1500	2100	Aşınma Sınıflandırma (PEI)
Yüzey Aşınması	-	-	-	0
	-	-	-	1
	Görüldü	-	-	2
	Görülmedi	Görüldü	-	3
	Görülmedi	Görülmedi	Görüldü	4
	Görülmedi	Görülmedi	Görülmedi	5



Şekil 5.12. a) S b) A reçeteleri ile hazırlanan epoksi kaplamalı seramik karoların c) 600, d) 1500 ve e) 2100 devirde aşınma testi sonucundaki yüzey görüntüleri



Şekil 5.13. a) S b) A reçeteleri ile hazırlanan silikon kaplamalı seramik karoların c) 600, d) 1500 ve e) 2100 devirde aşınma testi sonucundaki yüzey görüntüleri

EN 10545 standardına göre yapılan aşınma testi sonucu incelendiğinde, seramik karo yüzeylerinden; epoksi ile kaplanmış olanların aşınma derecesi 2, silikon ile kaplanmış olanlarınki ise 4 olarak bulunmuştur. Aşınma sınıfına karşılık gelen uygun kullanım alanları Çizelge 5.16 (Atlas Ceramics, 2026)'da belirtilmiştir.

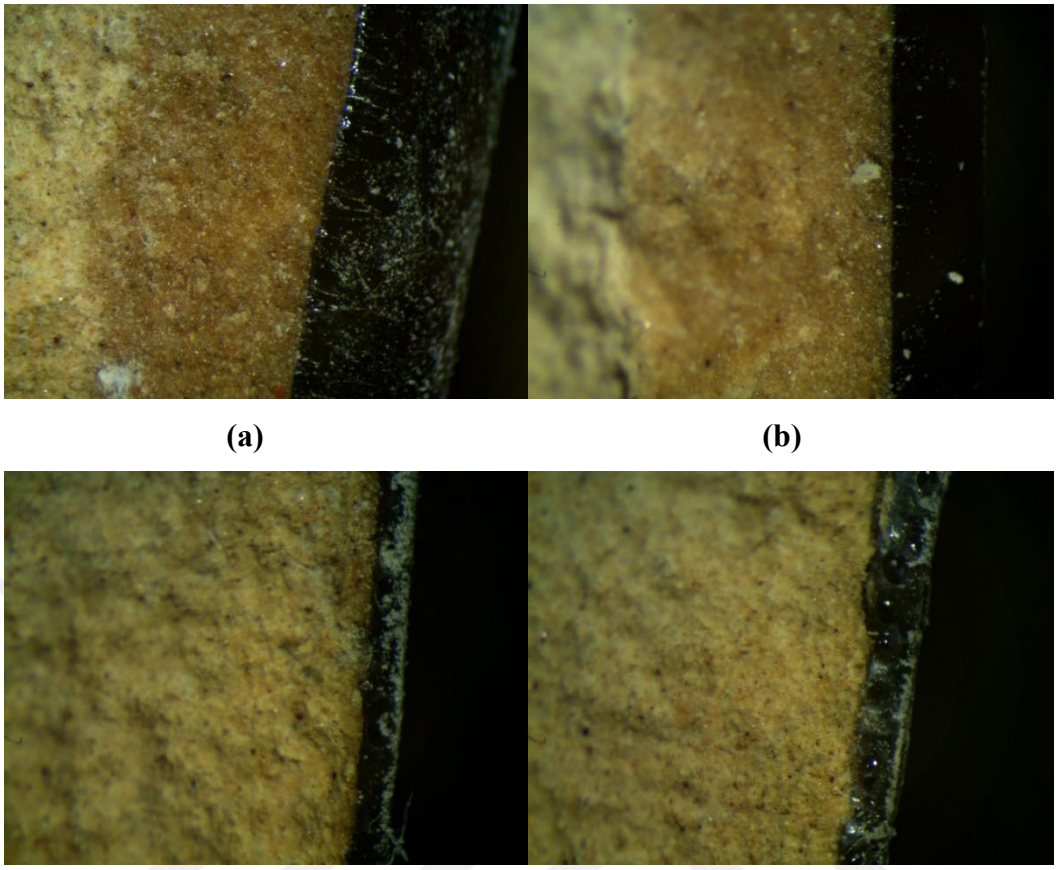
Çizelge 5.16. Farklı aşınma sınıfı için uygun olan kullanım alanları

Aşınma Sınıfı (PEI)	Kullanım Alanı
PEI 0	Sadece duvarlar için uygundur
PEI 1	Çok hafif trafik
PEI 2	Hafif ev trafiği
PEI 3	Orta ev trafiği (günlük yaşam alanları)
PEI 4	Ağır ev ve hafif ticari trafik
PEI 5	Yoğun ve yüksek ticari kullanım

Aşınma testi yaya trafiğine bağlı aşınmayı öngörme amacıyla yapılmakla birlikte duvar karoları için zorunlu bir test değildir. Ancak kaplamaların yer karosuna uygulanabilirliğini test etmek amacıyla değerlendirildiğinde; 2 derecesinde aşınma direncine sahip seramik karolar sık kullanılmayan alanlarda sınırlı bir şekilde kullanılabilir. Aşınma direnci 4 derecesindeki seramik karolar ise uzun ömür sağlayarak yüksek yoğunlukta ev ve hafif ticari trafiğe uygun olarak değerlendirilmiştir.

5.14. Optik Mikroskop Görüntüleri

Yüzey kaplaması uygulanmış seramik karo gövdelerinin optik mikroskop ile analiz edilmiş kesit görüntüleri Şekil 5.14'te verilmiştir.

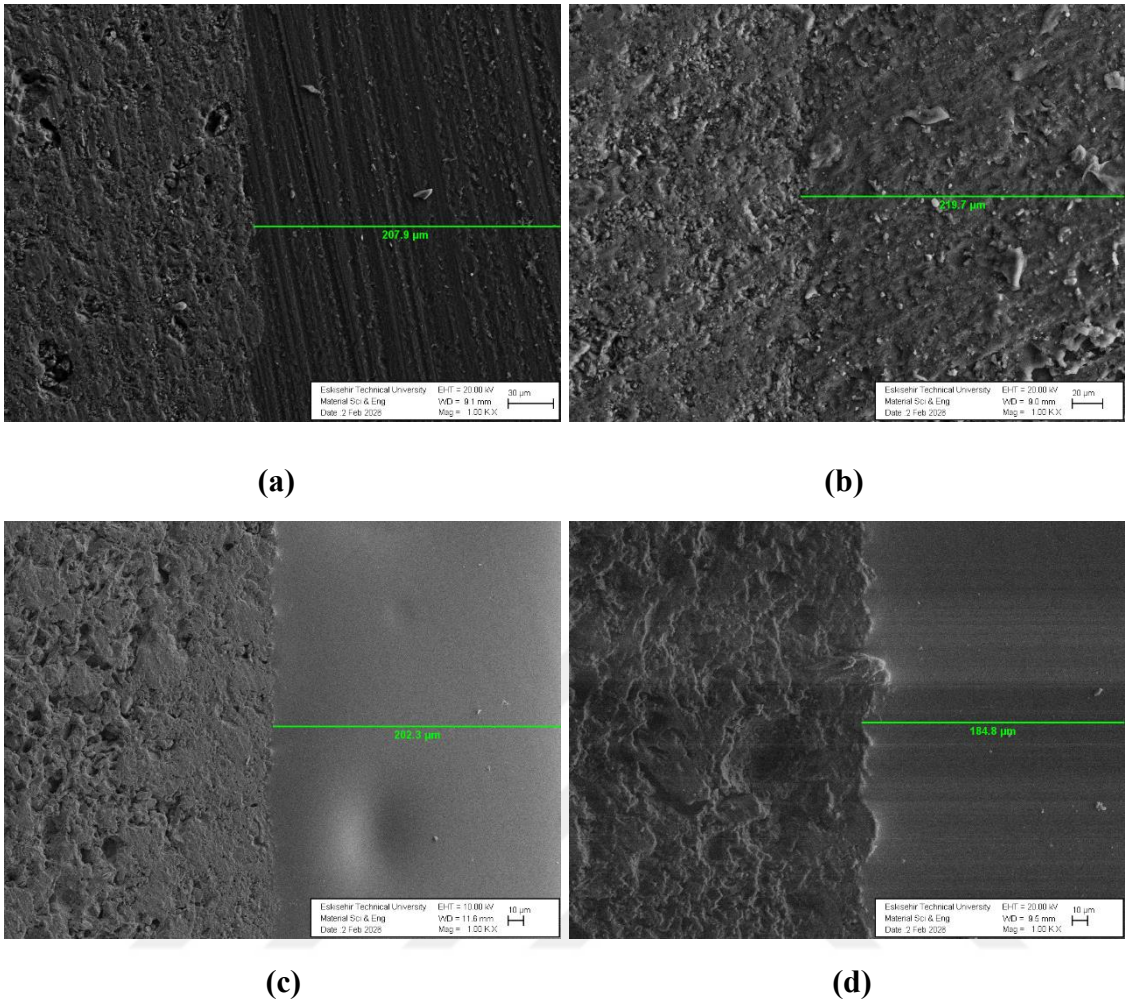


Şekil 5.14. Kaplanmış seramik karo örneklerinin (a) SE b) AE c) SS d) AS) optik mikroskop kesit görüntüleri

Polimer ile kaplanmış seramik karoların kesit görüntülerinden, reçete farklılığına bağlı olmaksızın silikon kaplamanın daha ince olduğu gözlenmiştir.

5.15. SEM Görüntüleri

Kaplanmış seramik karo gövdelerinin SEM analizi ile alınan kesit görüntüleri Şekil 5.15'te verilmiştir. Kaplama kalınlıkları şekiller üzerinde gösterilmiştir.



Şekil 5.15. Kaplanmış seramik karo örneklerinin (a) SE b) AE c) SS d) AS) SEM görüntüleri

Örneklerin kesit görüntüleri incelendiğinde; standart ve atık ilaveli gövdelere uygulanan epoksi kaplamaların silikon kaplamalara göre seramik gövdesi içine yayındığı ve optik mikroskop görüntülerinde gözlendiği gibi biraz daha yüksek kalınlıkta oldukları görülmüştür.

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, sürdürülebilir ve düşük maliyetli bir üretim sağlanması amacıyla atık ilaveli seramik karo gövdeleri geliştirilmiştir. Bu gövdelerin yüzey özelliklerinin değiştirilmesi veya geliştirilmesi amacıyla seramik gövde yüzeyi epoksi ve silikon olmak üzere iki farklı polimer ile kaplanmıştır. Öncelikle atık ilaveli seramik karo gövde örnekleri standart test ve ölçümlere tabi tutulmuştur. Bu test ve ölçümler sonucunda atık ilaveli gövdenin standarda yakın fiziksel özellik gösterdiği, renk ve nem ölçümünde ise daha iyi sonuçlar elde edilmiştir. Ayrıca seramik sektöründe reçete geliştirme çalışmalarında sıkça karşılaşılan bir problem olan "black core" hatası atık ilaveli gövde örneklerinden hiçbirinde gözlenmemiştir. Bu sonuçlar, çalışmada geliştirilen atık ilaveli reçetelendirmenin üretime yönelik alternatif olabileceğini göstermektedir. Gerçekleştirilen XRF ve XRD analizleri sonucunda; reçetelendirme çalışmaları için atık ilave miktarı belirlenmiş, atık ilavesiyle seramik gövdede ana bileşenlere ek olarak alüminyum oksit kristal fazı gözlenmiştir. Yüzey kaplaması uygulanan örnekler için ise temas açısı ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Atık ilaveli gövdeye uygulanan her iki polimer için de standart gövde üzerine yapılan kaplamalara göre daha yüksek açı dereceleri elde edilmiş ve yüzeyin biraz daha hidrofobikliğe yaklaştığı değerlendirilebilmiştir. Kaplama polimerleri kendi içinde karşılaştırıldığında ise optik mikroskop ve SEM analizi sonuçlarında silikon kaplamalara göre seramiğin içine yayınarak kaplandığı ve silikona yakın bir kalınlıkta olduğu gözlenen epoksi kaplamaların yüzey üzerinde daha hidrofobik özellik sergilediği gözlenmiştir. Kaymazlık testlerinde; standart ve atık ilaveli gövdeye uygulanan polimer kaplamaların kaygan bir yüzey sergilediği tespit edilmiş, bu sonucun duvar karoları için bazı kullanım avantajları sunabileceği önerilmiştir. Aşınma testi uygulanan kaplama yüzeyleri değerlendirildiğinde; epoksi uygulanan yüzeylerin hafif ev trafiğine uygun, silikon uygulanan yüzeylerin yoğun ev ve hafif ticari trafiğe uygun olduğu gözlenmiştir. Aşınma sonuçlarına göre silikon kaplamanın porselen ve yer karolarına uygulanabilirliği için geliştirilebileceği düşünülmüştür.

Elde edilen sonuçlar, fırın rulosu atığının seramik gövde içine ilave edilebilirliğini ve bu doğrultuda üretim denemesi gerçekleştirilebileceğini göstermektedir. Bu sayede daha sürdürülebilir bir ürün ve üretim süreci geliştirilebilecektir. Yüzey kaplama sonuçları

incelendiğinde, ilerleyen süreçte yüzeye polimer kaplamasının farklı kalınlıklarda gerçekleştirilerek değerlendirilmesi önerilmektedir.

KAYNAKLAR DİZİNİ

Açıkbaş, G., & Çalış Açıkbaş, N. (2021). *Nanoarchitectonics for polymer-ceramic hybrid coated ceramic tiles for antibacterial activity and wettability.* Applied Physics A, 127(10), 794. https://doi.org/10.1007/s00339-021-04938-3

Aljarany, A., (2022). *Effect of Quartz and Red-Clay to Phonolite Ratios on Some Properties of Floor Tile.* The International Journal of Engineering & Information Technology (IJEIT), 10(1), 122-130. https://doi.org/10.36602/ijeit.v10i1.64

Amin, S. K., Hamid, E. A., El-Sherbiny, S. A., Sibak, H. A., & Abadir, M. F. (2018). *The use of sewage sludge in the production of ceramic floor tiles.* HBRC journal, 14(3), 309-315. https://doi.org/10.1016/j.hbrcj.2017.02.002

Amigo, J. M., Serrano, F. J., Kojdecki, M. A., Bastida, J., Esteve, V., Reventós, M. M., & Martí, F. (2005). *X-ray diffraction microstructure analysis of mullite, quartz and corundum in porcelain insulators.* Journal of the European Ceramic Society, 25(9), 1479-1486. https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2004.05.019

Arenas, M. A., Conde, A., García, I., & De Damborenea, J. J. (2022). *PVD hard coatings on ceramic tiles for aesthetic applications: surface characterisation and corrosion properties.* Ceramics International, 48(15), 21794-21802. https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2022.04.163

Arulprasanna, A., & Omkumar, M. (2024). *A review on composites: Selection and its applications.* Materials Today: Proceedings. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2024.06.014

Atlas Ceramics, 2026. Slip resistance requirements. Erişim: https://www.atlasceramics.co.uk/downloads/slip%20resistance%20and%20pei%20ratings.pdf, Erişim tarihi: 13.01.2026.

Barnes, G. E. (2018). Workability of clay mixtures. Applied Clay Science, 153, 107-112. https://doi.org/10.1016/j.clay.2017.12.006

Barreira-Pinto, R., Carneiro, R., Miranda, M., & Guedes, R. M. (2023). *Polymer-matrix composites: characterising the impact of environmental factors on their lifetime.* Materials, 16(11), 3913. https://doi.org/10.3390/ma16113913

Batayneh, M., Marie, I., & Asi, I. (2007). *Use of selected waste materials in concrete mixes.* Waste management, 27(12), 1870-1876. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2006.07.026

Bhong, M., Khan, T. K., Devade, K., Krishna, B. V., Sura, S., Eftikhaar, H. K., ... & Gupta, N. (2023). *Review of composite materials and applications.* Materials today: proceedings. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.10.026

KAYNAKLAR DİZİNİ

Binhussain, M. A., Marangoni, M., Bernardo, E., & Colombo, P. (2014). *Sintered and glazed glass-ceramics from natural and waste raw materials.* Ceramics International, 40(2), 3543-3551.

Bovea, M. D., Díaz-Albo, E., Gallardo, A., Colomer, F. J., & Serrano, J. (2010). *Environmental performance of ceramic tiles: Improvement proposals.* Materials & Design, 31(1), 35-41.

Casasola, R., Rincón, J. M., & Romero, M. (2012). *Glass–ceramic glazes for ceramic tiles: a review.* Journal of Materials Science, 47(2), 553-582. https://doi.org/10.1007/s10853-011-5981-y

Constancio, C., Franco, L., Russo, A., Anjinho, C., Pires, J., Vaz, M. F., & Carvalho, A. P. (2010). *Studies on polymeric conservation treatments of ceramic tiles with Paraloid B-72 and two alkoxysilanes.* Journal of Applied Polymer Science, 116(5), 2833-2839. https://doi.org/10.1002/app.31743

Darkhan, A., Anarbayev, A., Yessimov, B., Vakalova, T., Stanevich, V., & Molodykh, A. (2025*). Optimization of the Process of Producing Porcelain Stoneware from Mineral Raw Materials and Microsilica as a Secondary Raw Material*. Ceramics, 8(4), 154. https://doi.org/10.3390/ceramics8040154

Davalos, J., Bonilla, A., Villaquirán-Caicedo, M. A., de Gutiérrez, R. M., & Rincón, J. M. (2021). *Preparation of glass–ceramic materials from coal ash and rice husk ash: Microstructural, physical and mechanical properties.* Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio, 60(3), 183-193. https://doi.org/10.1016/j.bsecv.2020.02.002

El-Maghraby, M. S., Ismail, A. I. M., & Shalaby, B. N. A. (2021). *Utilization of some egyptian raw materials in ceramic tiles.* Silicon, 13(4), 985-992. https://doi.org/10.1007/s12633-020-00459-5

Emir, M. A., 2020. *Ergitici olarak kullanılan farklı alkali kaynaklarının seramik duvar karosu bünyesindeki teknolojik özelliklere etkisinin incelenmesi.* Yüksek Lisans tezi, İTÜ, 106 s.

Ferrer, S., Mezquita, A., Aguilella, V. M., & Monfort, E. (2019). *Beyond the energy balance: Exergy analysis of an industrial roller kiln firing porcelain tiles.* Applied Thermal Engineering, 150, 1002–1015. https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.01.052

Ismail, A. I. M., Elmaghraby, M. S., & Shalaby, B. N. A. (2022). *Flux ceramic tiles based on Egyptian trachyte.* Bulletin of the National Research Centre, 46(1), 226. https://doi.org/10.1186/s42269-022-00916-8

KAYNAKLAR DİZİNİ

Izak, P., Delihowski, J., Mastalska-Popławska, J., & Stempkowska, A. (2025). *Utilisation of Mining Waste for Production of Ceramic Tiles.* Applied Sciences, 15(7), 3957. https://doi.org/10.3390/app15073957

Ji, R., Zhang, Z., Yan, C., Zhu, M., & Li, Z. (2016). *Preparation of novel ceramic tiles with high Al2O3 content derived from coal fly ash.* Construction and Building Materials, 114, 888-895. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.04.014

Karadimas, G., & Salonitis, K. (2023). *Ceramic matrix composites for aero engine applications—a review.* Applied Sciences, 13(5), 3017. https://doi.org/10.3390/app13053017

Karaveli, K., Karasu, B., Onal, H.S. (2007, 26-28 Kasım). *Zirkonsuz Duvar Karosu Opak Frit Üretimi ve Seramik Sektöründe Kullanımı.* IV. Uluslararası Katılımlı Seramik, Cam, Emaye Sır ve Boya Semineri. Eskişehir, Türkiye.

Karunadasa, K. S., Manoratne, C. H., Pitawala, H. M. T. G. A., & Rajapakse, R. M. G. (2019). *Thermal decomposition of calcium carbonate (calcite polymorph) as examined by in-situ high-temperature X-ray powder diffraction.* Journal of Physics and Chemistry of solids, 134, 21-28. https://doi.org/10.1016/j.jpcs.2019.05.023

Khanal, S., & Parajuli, (2021). *K. Assessment Of Raw Materıals Used For A Ceramıcs Tıle Body Compositıon And Theır Avaılabılıty In Nepal Hımalayas*, GEOINNOVATION: Bulletin of Nepal Geological Students' Society, Vol. 3, 64-70.

Ke, S., Wang, Y., Pan, Z., Ning, C., & Zheng, S. (2016). *Recycling of polished tile waste as a main raw material in porcelain tiles.* Journal of cleaner production, 115, 238-244. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.12.064

Kingery, W. D., Bowen, H. K., & Uhlmann, D. R. (1976). *Introduction to Ceramics.* Wiley.

La Torre, V., Rambaldi, E., Masi, G., Nici, S., Ghezzi, D., Cappelletti, M., & Bignozzi, M. C. (2021). *Validation of antibacterial systems for sustainable ceramic tiles.* Coatings, 11(11), 1409. https://doi.org/10.3390/coatings11111409

Li, K., Cordeiro, E. D. S., & De Noni Jr, A. (2023). *Comparison between mullite-based and anorthite-based porcelain tiles: a review.* Eng, 4(3), 2153-2166. https://doi.org/10.3390/eng4030123

Lo Dico, G., Lisuzzo, L., Carcelén, V., Cavallaro, G., & Haranczyk, M. (2024). *Thermogravimetric analysis of moisture in natural and thermally treated clay materials.* Materials, 17(10), 2231. https://doi.org/10.3390/ma17102231

Luz, A. P., & Ribeiro, S. (2007). *Use of glass waste as a raw material in porcelain stoneware tile mixtures.* Ceramics international, 33(5), 761-765. https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2006.01.001

KAYNAKLAR DİZİNİ

Ly, B. C. K., Dyer, E. B., Feig, J. L., Chien, A. L., & Del Bino, S. (2020). *Research techniques made simple: cutaneous colorimetry: a reliable technique for objective skin color measurement.* Journal of Investigative Dermatology, 140(1), 3-12. https://doi.org/10.1016/j.jid.2019.11.003

Maged, A., Abu El-Magd, S. A., Radwan, A. E., Kharbish, S., & Zamzam, S. (2023). *Evaluation insight into Abu Zenima clay deposits as a prospective raw material source for ceramics industry: Remote sensing and characterization.* Scientific Reports, 13(1), 58. https://doi.org/10.1038/s41598-022-26484-5

Mahmoud, M. E., El-Khatib, A. M., Halbas, A. M., & El-Sharkawy, R. M. (2021). *Ceramic tiles doped with lead oxide nanoparticles: their fabrication, physical, mechanical characteristics and γ-ray shielding performance.* Radiation Physics and Chemistry, 189, 109780. https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2021.109780

Michalak, J., (2021). *Ceramic tile adhesives from the producer's perspective: A literature review.* Ceramics, 4(3), 378-390. https://doi.org/10.3390/ceramics4030027

Moshnyakov, M. G., & Abdrakhimov, V. Z. (2019). *Investigations of the black core and swelling in firing porcelain stoneware.* Glass and Ceramics, 76(7), 270-273. https://doi.org/10.1007/s10717-019-00181-8

Ndjigui, P. D., Mbey, J. A., Fadil-Djenabou, S., Onana, V. L., Bayiga, E. C., Enock Embom, C., & Ekosse, G. I. (2021). *Characteristics of kaolinitic raw materials from the Lokoundje River (Kribi, Cameroon) for ceramic applications*. Applied Sciences, 11(13), 6118. https://doi.org/10.3390/app11136118

Oytac, Z. E., Tarhan, M., & Yay, B. (2024). Investigation of the effects of kiln roller waste addition on porcelain tile matte-opaque glazes. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 149(5), 2137-2146. https://doi.org/10.1007/s10973-023-12825-7

Pinheiro, B. C. A., & Holanda, J. N. F. (2013). *Reuse of solid petroleum waste in the manufacture of porcelain stoneware tile.* Journal of Environmental management, 118, 205-210. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2012.12.043

Sacmi, 2008, *Uygulamalı Seramik Teknolojisi Cilt 1*, (Çev.İ.Özkan), İstanbul: Sacmi İstanbul.

Sajan, S. S. P. S., & Selvaraj, D. P. (2021). *A review on polymer matrix composite materials and their applications.* Materials Today: Proceedings, 47, 5493-5498. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.08.034

Sarmah, P., & Gupta, K. (2024). *A Review on the Machinability Enhancement of Metal Matrix Composites by Modern Machining Processes.* Micromachines, 15(8), 947. https://doi.org/10.3390/mi15080947

KAYNAKLAR DİZİNİ

Saufi, A. S. M., Singh, R., Lee, K. S., & Wu, T. (2021). *Densification and mechanical properties of alumina ceramics via two-step sintering with different holding times.* International Journal of Engineering Materials and Manufacture, 6(4), 299-304. https://doi.org/10.26776/ijemm.06.04.2021.05

Selli, N. T., Duman, F., & Yagyemez, T. (2021). *Evaluation of antislip properties of ceramic-polymer composite coating on ceramic tiles.* The International Journal of Materials and Engineering Technology, 4(1), 79-90.

Senthil, S., Raguraman, M., & Manalan, D. T. (2021). *Manufacturing processes & recent applications of aluminium metal matrix composite materials: A review.* Materials Today: Proceedings, 45, 5934-5938. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.08.792

Shen, J., Liang, J., Lin, X., Lin, H., Yu, J., & Yang, Z. (2020). *Recent progress in polymer-based building materials.* International Journal of Polymer Science, 2020(1), 8838160. https://doi.org/10.1155/2020/8838160

Singh, H., Brar, G. S., Kumar, H., & Aggarwal, V. (2021). *A review on metal matrix composite for automobile applications.* Materials Today: Proceedings, 43, 320-325. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.11.670

Sun, J., Ye, D., Zou, J., Chen, X., Wang, Y., Yuan, J., ... & Bai, J. (2023). *A review on additive manufacturing of ceramic matrix composites.* Journal of Materials Science & Technology, 138, 1-16. https://doi.org/10.1016/j.jmst.2022.06.039

Sypabekova, M., Hagemann, A., Rho, D., & Kim, S. (2022). *3-Aminopropyltriethoxysilane (APTES) deposition methods on oxide surfaces in solution and vapor phases for biosensing applications.* Biosensors, 13(1), 36. https://doi.org/10.3390/bios13010036

Vieira, A. W., Rosso, L. S., Demarch, A., Pasini, D., Ruzza, S. P., Arcaro, S., ... & Angioletto, E. (2023). *Life cycle assessment in the ceramic tile industry: a review.* Journal of Materials Research and Technology, 23, 3904-3915.

Xie, J., Li, N., Shang, P., He, Z., Zhao, L., & He, F. (2025). *The Effect of the Variation in Al2O3 and SrO Content on the Structure, Sintering Behavior, and Properties of SrO, BaO, ZnO, MgO-B2O3-Al2O3-SiO2 Glass-Ceramics for Use in Al2O3 Ceramic LTCC Applications.* Materials, 18(19), 4510. https://doi.org/10.3390/ma18194510

Yashas Gowda, T. G., Sanjay, M. R., Subrahmanya Bhat, K., Madhu, P., Senthamaraikannan, P., & Yogesha, B. (2018). *Polymer matrix-natural fiber composites: An overview.* Cogent Engineering, 5(1), 1446667. https://doi.org/10.1080/23311916.2018.1446667

KAYNAKLAR DİZİNİ

Yiga, V. A., Bwambale, Y., & Lubwama, M. (2025). *Mechanical, thermal and microstructural characterization of ceramic floor tiles developed with plastic waste and rice husks.* Innovative Infrastructure Solutions, 10(9), 389. https://doi.org/10.1007/s41062-025-02198-1

Yuan, Q., Mohajerani, A., Kurmus, H., & Smith, J. V. (2020). *Possible recycling options of waste materials in manufacturing ceramic tiles.* GEOMATE Journal, 20(78), 73-80. https://doi.org/10.21660/2021.78.Gx279

Zaccaron, A., de Souza Nandi, V., & Bernardin, A. M. (2021). *Fast drying for the manufacturing of clay ceramics using natural clays.* Journal of Building Engineering, 33, 101877. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2020.101877

Zanurin, A., Johari, N. A., Alias, J., Ayu, H. M., Redzuan, N., & Izman, S. (2022). *Research progress of sol-gel ceramic coating: A review.* Materials today: proceedings, 48, 1849-1854. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.09.203

Zhang, Q., Xu, L. S., & Guo, X. (2017). *Improvement of mechanical properties, microscopic structures, and antibacterial activity by Ag/ZnO nanocomposite powder for glaze-decorated ceramic.* Journal of Advanced Ceramics, 6(3), 269-278. https://doi.org/10.1007/s40145-017-0239-z

Zhong, X., Cao, L., Huang, J., Liu, Y., Shen, X., Wang, Q., ... & Ji, T. (2023). *Enhanced mechanical properties of porcelain ceramic tile/Kevlar fabric composite with bio-inspired shell-like structure.* International Journal of Applied Ceramic Technology, 20(5), 3073-3081. https://doi.org/10.1111/ijac.14413

Zhu, L., Zhang, J., He, F., Zhao, J., & Wang, Z. (2023). *(TA-APTES) Plus: A rapid, green and universal coating for membrane modification toward oil-in-water emulsion separation.* Journal of Membrane Science, 680, 121741. https://doi.org/10.1016/j.memsci.2023.121741