

**NANO ÖZELLİKLİ MİNERALLERİN MERMER PLAKA DOLGU
MALZEMESİ OLARAK UYGULANMASINDA OPTİMAL YÖNTEMLERİN
BELİRLENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Gürkan AKSOY

Danışman

Doç. Dr. Abdul Vahap KORKMAZ

NANOBİLİM VE NANOTEKNOLOJİ ANABİLİM DALI

Aralık 2025

Bu tez çalışması 24.FEN.BİL.16 numaralı proje ile Afyon Kocatepe Üniversitesi
Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından desteklenmiştir.

AFYON KOCATEPE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**NANO ÖZELLİKLİ MİNERALLERİN MERMER PLAKA DOLGU
MALZEMESİ OLARAK UYGULANMASINDA OPTİMAL
YÖNTEMLERİN BELİRLENMESİ**

Gürkan AKSOY

Danışman

Doç. Dr. Abdul Vahap KORKMAZ

NANOBİLİM VE NANOTEKNOLOJİ ANABİLİM DALI

Aralık 2025

TEZ ONAY SAYFASI

Gürkan AKSOY tarafından hazırlanan “Nano Özellikli Minerallerin Mermer Plaka Dolgu Malzemesi Olarak Uygulanmasında Optimal Yöntemlerin Belirlenmesi” adlı tez çalışması lisansüstü eğitim ve öğretim yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca 25/12/2025 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından **oy birliği** ile Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **Nanobilim ve Nanoteknoloji Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Danışman : Doç. Dr. Abdul Vahap KORKMAZ

Başkan : Prof. Dr. Hasan HACİFAZLIOĞLU
İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa, Mühendislik Fakültesi

Üye : Dr. Öğr. Üyesi İsmail YILDIZ
Afyon Kocatepe Üniversitesi, İncehisar MYO

Afyon Kocatepe Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu’nun
..... /..... /..... tarih ve
..... sayılı kararıyla onaylanmıştır.

.....

Prof. Dr. Bekir YALÇIN
Enstitü Müdürü

BİLİMSEL ETİK BİLDİRİM SAYFASI
Afyon Kocatepe Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- Atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- Ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

beyan ederim.

25/12/2025

Gürkan AKSOY

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

NANO ÖZELLİKLİ MİNERALLERİN MERMER PLAKA DOLGU MALZEMESİ OLARAK UYGULANMASINDA OPTİMAL YÖNTEMLERİN BELİRLENMESİ

Gürkan AKSOY

Afyon Kocatepe Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Nanobilim ve Nanoteknoloji Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Abdul Vahap KORKMAZ

Türkiye’de mermercilik, madencilik faaliyetleri içinde önemli bir paya sahip stratejik bir sektördür. İnşaat ve doğal taş endüstrilerindeki hızlı büyüme, mermer plakaların kullanımını artırırken, doğal taş oluşum süreçlerinden kaynaklanan çatlak, gözenek ve boşluk gibi kusurlar ürünün dayanıklılığını, estetik görünümünü ve ticari değerini azaltmaktadır. Bu nedenle, mermer yüzeylerdeki yapısal ve görsel kusurların giderilmesine yönelik dolgu uygulamaları, sektör için kritik bir ihtiyaç haline gelmiştir. Günümüzde epoksi, polyester, mastik ve çimento esaslı dolgular yaygın olarak kullanılmakla birlikte, bu malzemeler mikro çatlakları kapatmada yetersiz kalmakta; renk uyumsuzluğu, sararma ve çevresel sürdürülebilirlik gibi sorunlar oluşturmaktadır.

Traverten plakalar, yüksek boşluklu yapıları nedeniyle özellikle dolgu gerektiren doğal taşlardır. Çimento esaslı dolgular ekonomik ve uygulanabilir olmalarına rağmen, dolgu–taş renk uyumunun sağlanması zordur ve mermer çamurunun flokülant içeriği nedeniyle sağlık açısından riskleri bulunmaktadır. Literatürde, dolgu malzemelerinin mekanik, estetik ve fiziksel etkilerini inceleyen çeşitli çalışmalar bulunmakla birlikte, nano-mineral katkılı çimento dolguların mermer yüzeylerdeki performansı üzerine araştırmalar sınırlıdır. Bu kapsamda nano kalsit ve nano bor minerallerinin çimento sistemleriyle kombinasyonu hem dolgu dayanımının artırılması hem de mikro çatlakların kapatılması açısından yeni bir yaklaşım sunmaktadır. Ayrıca travertenin kendi atık tozunun kullanılması, renk uyumunu iyileştirerek estetik bütünlüğü artırmakta ve sürdürülebilir üretim açısından önemli bir avantaj sağlamaktadır.

Bu tez çalışmasında beyaz çimento, nano kalsit, nano bor minerali ve traverten atıklarının kullanımıyla beş farklı dolgu reçetesi hazırlanmış, bu reçeteler priz süresi, dayanım, renk uyumu ve parlaklık özellikleri açısından karşılaştırılmıştır. Çalışma kapsamında elde edilen veriler, traverten dolgu uygulamalarında estetik kaliteyi ve mekanik performansı artıracak optimum çimento–nano mineral formülasyonlarının belirlenmesine katkı sağlamaktadır. Böylece mermercilik sektöründe daha dayanıklı, çevresel açıdan sürdürülebilir ve yüksek performanslı yeni nesil dolgu malzemelerinin geliştirilmesi hedeflenmiştir.

2025, xiii + 116 sayfa

Anahtar Kelimeler: Mermer dolgu malzemeleri, Nano Kalsit, Nano Bor minerali, Traverten atığı, Çimento esaslı kompozit dolgu.

ABSTRACT

M.Sc. Thesis

DETERMINATION OF OPTIMAL METHODS FOR THE APPLICATION OF NANO-PROPERTY MINERALS AS MARBLE SLAB FILLING MATERIAL

Gürkan AKSOY

Afyon Kocatepe University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Nanoscience and Nanotechnology

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Abdul Vahap KORKMAZ

Marble production in Turkey is a strategic sector, representing a significant share of mining activities. While rapid growth in the construction and natural stone industries has increased the use of marble slabs, defects such as cracks, pores, and voids resulting from natural formation processes reduce the product's durability, aesthetic appearance, and commercial value. Therefore, filling applications to address structural and visual imperfections on marble surfaces have become a critical need for the sector. While epoxy, polyester, mastic, and cement-based fillers are widely used today, these materials are insufficient to cover microcracks and also pose problems such as color incompatibility, yellowing, and environmental sustainability.

Travertine slabs, due to their high porosity, are natural stones that require filling. While cement-based fillers are economical and applicable, achieving color harmony between the filler and the stone is difficult, and the flocculant content of marble mud poses health risks. While numerous studies in the literature examine the mechanical, aesthetic, and physical effects of fillers, research on the performance of nano-mineral-added cement fillers on marble surfaces is limited. In this context, the combination of nanocalcite and nanoboron minerals with cement systems offers a new approach for both increasing filling strength and sealing microcracks. Furthermore, using travertine's own waste powder improves color harmony, enhancing aesthetic integrity and providing a significant advantage in terms of sustainable production.

In this thesis, five different filling recipes were prepared using white cement, nanocalcite, nanoboron minerals, and travertine waste. These recipes were compared in terms of setting time, strength, color matching, and gloss properties. The data obtained in this study contribute to the determination of optimal cement-nanomineral formulations that will enhance aesthetic quality and mechanical performance in travertine filling applications. This aims to develop a new generation of more durable, environmentally sustainable, and high-performance filling materials for the marble industry.

2025, xiii + 116 pages

Keywords: Marble filling materials, Nano Calcite, Nano Boron mineral, Travertine waste, Cement based composite filling.

TEŞEKKÜR

Bu araştırmanın konusu, deneysel çalışmaların planlaması, yönlendirilmesi, sonuçların değerlendirilmesi ve yazımı aşamasında yapmış olduğu değerli katkılarından dolayı tez danışmanım Sayın Doç. Dr. Abdul Vahap KORKMAZ'a; araştırma ve yazım süresince desteklerini esirgemeyen Sayın Öğr. Gör. Eyüp AKSOY'a; her aşamada öneri ve eleştirileriyle katkıda bulunan değerli hocalarıma ve arkadaşlarıma; ayrıca 24.FEN.BİL.16 numaralı proje desteği için Afyon Kocatepe Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi'ne teşekkür ederim.

Bu araştırma boyunca maddi ve manevi desteklerinden dolayı aileme sonsuz şükranlarımı sunarım.

Gürkan AKSOY
Afyonkarahisar 2025

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

	Sayfa
ÖZET	i
ABSTRACT	iii
TEŞEKKÜR	v
İÇİNDEKİLER DİZİNİ.....	vi
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ	x
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	xi
RESİMLER DİZİNİ	xii
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR BİLGİLERİ	3
2.1 Mermer ve Yapısal Kusurları	4
2.1.1 Mermerin Özellikleri ve Endüstriyel Kullanımı	5
2.1.2 Mermerin Üretimi ve İşlenmesi	8
2.1.3 Mermer Plakalarında Yaygın Görülen Kusurlar	10
2.1.4 Mermer Plakalarında Oluşan Endüstriyel Kusurlar	12
2.2 Geleneksel Dolgu Malzemeleri ve Teknikleri	15
2.2.1 Reçine Bazlı Dolgular	15
2.2.2 Çimento Dolgu	17
2.2.3 Reçine Emdirme.....	18
2.2.4 Toz Boyalar	19
2.3 Mermerde Yüzey İşleme Teknikleri	19
2.3.1 Cilalama	21
2.3.2 Honlama	26
2.3.2.1 Honlama İşleminin Aşındırıcı Niteliği	27
2.3.2.2 Honlamanın Mermer Üzerindeki Mikroyapısal Etkileri	28
2.3.2.3 Honlamanın Estetik ve İşlevsel Özelliklere Etkileri	29
2.3.2.4 Honlama Kalitesini Etkileyen İşlem Değişkenleri	29
2.3.2.5 Honlanmış ve Cilalanmış Yüzeylerin Karşılaştırılması	30
2.3.3 Fırçalama.....	31
2.3.4 Alevleme	35
2.3.4.1 Alevli Cilalamanın Mekanizması ve Mermerle İlişkisi	35
2.3.4.2 Mermer Yüzeylerde Alevle Sertleştirme Faydaları	36

2.3.5 Kumlama	38
2.4 Malzeme Biliminde Nanoteknoloji.....	43
2.4.1 Nanomalzemelerin Temelleri.....	43
2.4.2 Nanoteknolojinin İnşaat Sektöründeki Uygulamaları	44
2.4.3 Dolgu Minerallerinin Nanoteknolojik Özellikleri.....	45
2.4.3.1 Nano-Silika (SiO_2)	45
2.4.3.2 Nano-Alümina (Al_2O_3).....	46
2.4.3.3 Nano-Kalsiyum Karbonat (CaCO_3).....	46
2.4.4 Nano-Killer ve Diğer Mineraller.....	47
3. MATERİYAL ve METOT	48
3.1 Mermer Levha Örnekleri	49
3.2 Malzemeler	50
3.2.1 Traverten Plakalar ve Traverten Atığı.....	50
3.2.2 Beyaz Çimento	50
3.2.3 Nano Kalsit	51
3.2.4 Nano Bor (Kolemanit)	51
3.3 Çimento Reçinesi ve Bağlayıcı Sistemleri.....	52
3.3.1 Malzemelerin Hazırlanması	53
3.3.2 Harç Formülasyonlarının Hazırlanması	54
3.3.3 Yüzey Hazırlama İşlemleri ve Dolgu Harcı Uygulaması	55
3.4 Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) Analizleri.....	57
3.5 Yüzey Pürüzlülüğü Ölçümü.....	58
3.6 Renk Ölçümü	59
4. BULGULAR	64
4.1 Harç Karışımlarında Kullanılan Malzemelerin Kimyasal Özellikleri	64
4.2 Harç Karışımlarının Hidrolik Özellikleri.....	66
4.3 Gri Çimento Esaslı Harçların Ön Çalışma Kapsamında İncelenmesi	71
4.4 Beyaz Çimento Esaslı Dolgu Harçlarının Uygulanması.....	78
4.4.1 ÇDH1 Karışımının Uygulanması.....	78
4.4.2 ÇDH2 Karışımının Uygulanması.....	79
4.4.3 ÇDH3 Karışımının Uygulanması.....	79
4.4.4 ÇDH4 Karışımının Uygulanması.....	80
4.4.5 ÇDH5 Karışımının Uygulanması.....	82
4.5 Genel Değerlendirme ve Optimum Karışımın Belirlenmesi	83

4.5 Çimento Dolgu Harçlarının Mikroyapıları	86
4.6 Çimento Dolgu Harçlarının Yüzey Pürüzlülüğüne Etkileri.....	94
4.7 Çimento Dolgu Harçlarının Renk Uyumuna Etkileri	97
5. TARTIŞMA ve SONUÇ	102
6. KAYNAKLAR.....	103



SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler

L*	Renk parlaklık değeri
a*	Kırmızı-yeşil eksenindeki renk farklılığı
b*	Sarı-mavi eksenindeki renk farklılığı
ΔE^*	Toplam renk değişimi
nm	Nanometre
Ra	Ortalama yüzey pürüzlülüğü
Rz	Maksimum yüzey pürüzlülüğü
°C	Santigrat (Celsius) derecesi
cm	Santimetre
μm	Mikrometre
g	Gram
m^2	Metrekare
m^3	Metreküp
MPa	Megapaskal
CO ₂	Karbondioksit

Kısaltmalar

ASTM	Amerikan Test ve Malzeme Derneği
BSE	Geri saçılmış elektron
CNC	Bilgisayarlı nümerik kontrol
C–S–H	Kalsiyum silikat hidrat
ÇDH	Çimento dolgu harcı
CIE	Uluslararası Aydınlatma Komisyonu
EDX	Enerji dağılımlı X-ışını spektroskopisi
ITZ	Yüzey geçiş bölgesi
KK	Kızdırma kaybı
SEM	Taramalı elektron mikroskobu
sRGB	Standart kırmızı, yeşil, mavi renk modeli
RGB	Kırmızı, yeşil, mavi, renk modeli
UV	Ultraviyole
VOC	Uçucu organik bileşikler

ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 2. 1 Polyester bazlı dolgu uygulamasının iş akışı	16
Şekil 3. 1 CIELAB renk uzayı	62
Şekil 4. 1 Çimento dolgu pasta örneklerinin priz başlangıç süreleri.....	67
Şekil 4. 2 Çimento dolgu pasta örneklerinin priz bitiş süreleri	68
Şekil 4. 3 Çimento dolgu pasta örneklerinin hacimsel genişleme miktarları	69
Şekil 4. 4 Çimento dolgu pasta örneklerinin su muhteviyatları	71
Şekil 4. 5 Mermer ve traverten örneklerinin yüzey pürüzlülüğü analiz sonuçları	95
Şekil 4. 6 Mermer ve traverten örneklerinin yüzey pürüzlülük topoğrafyaları.....	96



ÇİZELGELER DİZİNİ

	Sayfa
Çizelge 3. 1 Çimento dolgusunda kullanılan harç karışımları	52
Çizelge 4. 1 Harç malzemelerinin kimyasal sonuçları	65
Çizelge 4. 2 Ön çalışma kapsamında hazırlanan harç karışımları.....	72
Çizelge 4. 3 Mermer ve traverten örneklerinin yüzey pürüzlülük değerleri	96
Çizelge 4. 4 Traverten örneklerinin kolorimetrik analiz sonuçları	98
Çizelge 4. 5 Toplam renk farkına göre renk uyumu sınıflandırması.....	100



RESİMLER DİZİNİ

	Sayfa
Resim 2. 1 Çırağan Sarayı'nın tarihi hamamı	8
Resim 2. 2 Çok başlıklı cila makinesi.....	22
Resim 2. 3 Kumlanmış mermer ve traverten yüzeyleri.....	40
Resim 3. 1 Kırma ve öğütme işlemlerinin yapılması.....	53
Resim 3. 2 Dolgu harcı karışımlarının hazırlanması.....	55
Resim 3. 3 Dolgu harcı karışımlarının deney örneklerine uygulanması.....	55
Resim 3. 4 Dolgu harcı uygulanmış deney örneklerinde yüzey düzeltilmesi	56
Resim 3. 5 Dolgu işlemlerine hazırlık çalışmaları	56
Resim 3. 6 Dolgu işlemi tamamlanan deney örneklerinin düzeltilmesi.....	56
Resim 3. 7 Dolgu işlemi tamamlanan deney örneklerinin cilalanması	57
Resim 3. 8 Leo 1430 Vp SEM analiz cihazı	58
Resim 3. 9 SEM analizi için hazırlanan deney örnekleri	58
Resim 3. 10 Time Tr200 yüzey pürüzlülüğü ölçüm cihazı	59
Resim 3. 11 PCE-XXM 20 taşınabilir renk ölçüm cihazı.....	60
Resim 3. 12 Renk ölçümlerinin yapılması	60
Resim 4. 1 Gri çimentolu dolgu harcının deney örneklerine uygulanması.....	72
Resim 4. 2 Gri çimento dolgulu işlenmiş deney örneklerinin kesilmesi.....	73
Resim 4. 3 Gri çimento dolgulu işlenmiş deney örneklerinin kesitleri.....	74
Resim 4. 4 Gri çimento dolgulu işlenmiş deney örneklerinin yüzeyleri.....	75
Resim 4. 5 Gri çimentolu dolgunun pürüz giderme işlemi sonrasındaki görünümü	76
Resim 4. 6 Gri çimento dolgulu cilalanmış deney örnekleri.....	77
Resim 4. 7 ÇDH1 karışımı uygulanmış deney örneği.....	78
Resim 4. 8 ÇDH2 karışımı uygulanmış deney örneği.....	79
Resim 4. 9 ÇDH3 karışımı uygulanmış deney örneği.....	80
Resim 4. 10 ÇDH4 karışımı uygulanmış deney örneği.....	81
Resim 4. 11 ÇDH5 karışımı uygulanmış deney örneği.....	82
Resim 4. 12 ÇDH1 karışımı uygulanmış deney örneklerinin genel görünümü	84
Resim 4. 13 ÇDH2 karışımı uygulanmış deney örneklerinin genel görünümü	84
Resim 4. 14 ÇDH3 karışımı uygulanmış deney örneklerinin genel görünümü	85
Resim 4. 15 ÇDH4 karışımı uygulanmış deney örneklerinin genel görünümü	85
Resim 4. 16 ÇDH5 karışımı uygulanmış deney örneklerinin genel görünümü	85
Resim 4. 17 ÇDH1 karışımı uygulanmış deney örneğinin SEM görüntüsü	87

Resim 4. 18	ÇDH2 karışımı uygulanmış deney örneğinin SEM görüntüsü	88
Resim 4. 19	ÇDH3 karışımı uygulanmış deney örneğinin SEM görüntüsü	90
Resim 4. 20	ÇDH4 karışımı uygulanmış deney örneğinin SEM görüntüsü	91
Resim 4. 21	ÇDH5 karışımı uygulanmış deney örneğinin SEM görüntüsü	93



1. GİRİŞ

Estetik çekiciliği ve yapısal dayanıklılığıyla öne çıkan mermer, yüzyıllardır heykelticilik, inşaat ve mimari yapılarda temel bir malzeme olarak kullanılmaktadır. Ancak, geniş uygulama alanlarına sahip olmasına rağmen, üretim süreçlerinde ortaya çıkan çeşitli doğal kusurlar sektör açısından önemli bir sorun teşkil etmektedir. Ocaktan çıkarma, kesme ve işleme aşamalarında oluşan çatlakların, boşlukların ve yüzey düzensizliklerinin giderilmesi, mermer endüstrisinin çözüm bekleyen başlıca teknik problemleri arasında yer almaktadır. Bu kusurlar, nihai ürünün hem görsel kalitesini hem de mekanik bütünlüğünü olumsuz yönde etkileyebilmektedir. Bu nedenle, mermer levhaların kalite, dayanıklılık ve piyasa değerini artırmak amacıyla etkili dolgu malzemeleri ve uygulama tekniklerinin kullanımı büyük önem taşımaktadır.

Nanoteknolojide son yıllarda kaydedilen ilerlemeler, malzeme bilimine yeni ufuklar açmakta ve geleneksel endüstriyel sorunlara yenilikçi çözümler sunmaktadır. Nanomalzemeler, yüksek yüzey alanı/hacim oranları ve özgün fizikokimyasal özellikleri nedeniyle inşaat ve kompozit malzeme uygulamalarında dikkate değer bir potansiyel sergilemektedir. Özellikle nano-silika, nano-alümina ve nano-kil gibi nano ölçekli mineraller, mermer levhaların onarım ve güçlendirilmesinde kullanılan dolgu maddelerinin performansını artıran önemli malzemeler olarak öne çıkmaktadır.

Nano ölçekli minerallerin mermer levha dolgu sistemlerine eklenmesi çeşitli avantajlar sunmaktadır. Bu avantajlar arasında mikro çatlaklara daha iyi penetrasyon, mermer matrisiyle daha güçlü yapışma, çevresel bozunmaya karşı artan direnç ve üstün mekanik performans bulunmaktadır. Bununla birlikte, söz konusu malzemelerin uygulama alanları başlangıç aşamasında olup, uygun kullanım yöntemlerinin belirlenmesi kritik önem taşımaktadır. Sonuçların optimize edilmesi için parçacık boyutu dağılımı, mineral türü, dispersiyon teknikleri, kürleme koşulları ve mevcut dolgu formülasyonlarıyla uyumluluk gibi faktörlerin kapsamlı olarak incelenmesi gerekmektedir.

Bu tez çalışması, nano özellikli minerallerin mermer levhalarda dolgu malzemesi olarak uygulanması için en uygun yöntemleri sistematik olarak değerlendirip belirleyerek bu

bilgi boşluğunu doldurmayı amaçlamaktadır. Çalışma, çeşitli nano-mineral bazlı dolgu maddeleriyle işlenmiş traverten ve mermer levhaların mekanik, fiziksel ve görsel performansını değerlendirmek için hem deneysel hem de analitik yaklaşımları içermektedir. Temel ölçütler arasında basınç dayanımı, yapışma dayanımı, gözeneklilik azaltma, estetik tutarlılık ve uzun vadeli dayanıklılık yer almaktadır. Bu doğrultuda tez şu amaçları içermektedir:

- Mermer levhalar için dolgu uygulamalarında kullanılabilecek nano-minerallerin belirlenmesi ve kapsamlı bir şekilde karakterize edilmesi,
- Nano-mineralleri içeren mermer yüzey işleme yöntemlerinin seçilmesi, buna uygun formülasyonların geliştirilmesi ve test edilmesi,
- Endüstriyel ölçekte uygulanabilirliği artırmak için performans, maliyet etkinliği ve ölçeklenebilirlik arasındaki dengeyi optimize eden tekniklerin belirlenmesidir.

Sonuç olarak bu çalışma, mermer işleme endüstrisinde ileri malzemelerin hem bilimsel temellerinin anlaşılmasına hem de uygulamaya yönelik gelişimine katkı sağlamayı amaçlamaktadır. Nanoteknolojinin geleneksel üretim süreçlerine entegre edilmesiyle, mermer ürünlerinin kalite, dayanıklılık ve estetik özelliklerinin iyileştirilmesi; aynı zamanda çağdaş inovasyon ve çevresel sürdürülebilirlik gereklilikleriyle uyumlu çözümler geliştirilmesi hedeflenmektedir.

2. LİTERATÜR BİLGİLERİ

Doğal taş yüzeyleri, özellikle mermerin onarılması ve geliştirilmesi için dolgu maddelerinin kullanımı, inşaat ve dekoratif taş endüstrilerinde sıkça kullanılan bir uygulamadır. Polyester ve epoksi reçinelerinin taş tozu ile birleştirilmesi gibi geleneksel dolgu maddeleri, mermer levhalardaki yüzey boşluklarını ve yapısal çatlakları doldurmak için yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu dolgu maddeleri estetiği ve yapısal bütünlüğü iyileştirirken, uzun süreli dayanım, hava koşulları ve mermer matrisiyle uyumluluk performansları genellikle yetersiz kalmaktadır. Bununla beraber, polimer bazlı dolgu maddeleri ve doğal taş arasındaki mekanik uyumsuzluk zamanla yapışmanın bozulmasına, sararmaya ve/veya renk bozulmasına neden olmaktadır. Bu reçinelerden yayılan uçucu organik bileşiklerle (VOC) ilgili çevresel endişeler, daha güvenli, kararlı ve sürdürülebilir alternatiflere olan ihtiyacı giderek artırmıştır (Sharif vd. 2025).

Mevcut sınırlamaların aşılması için nano minerallerin gelişmiş dolgu malzemeleri olarak kullanımı, umut verici ve yenilikçi bir strateji olarak ortaya çıkmaktadır. Oldukça ince olan parçacıklar ve yüksek yüzey aktiviteleri, nano minerallerin mikro çatlaklara daha etkili bir şekilde nüfuz etmesini ve geleneksel dolgu maddelerine kıyasla malzeme ile daha güçlü bir bağ oluşturmasını sağlamaktadır.

Karbonat esaslı taşlarla güçlü kimyasal afiniteler sergileyen nano mineraller, uzun süreli uyumsuzluk riskini azaltarak işlenen yüzeylerde estetik bütünlük sağlamaktadır (Urbanek vd. 2025). Ayrıca, nano ölçekli dolgu maddeleri, reçinesiz ve çevre dostu seçenekler sunarken; mekanik mukavemeti, aşınma direncini ve yüzey homojenliğini iyileştirmektedir (Raul vd. 2025). Nano minerallerin bu üstün özellikleri, mermer yüzeylerin işlevsel ve estetik performanslarını artırmaktadır (Jose vd. 2023).

Güncel araştırmalar, nano-kalsiyum karbonat, nano-silika, nano-alümina ve nano-killerin taş yüzey işleme ve dolgu uygulamalarında kullanımını yaygınlaştırmış; bu malzemelerin endüstri ve bilim açısından önemini artırmıştır. Nano-kalsiyum karbonat, kalsitik mermerle kimyasal uyumu sayesinde taşın içinde kohezif arayüzler oluşturarak yüzey sertliğini artırmakta ve mikro gözenekliliği azaltmaktadır (Xie vd. 2021).

Nano-silika, yüksek reaktivitesi ve güçlü bağlama kapasitesi sayesinde, mikro çatlaklı bölgelerde daha etkin konsolidasyona katkı sağlamaktadır. Nano-alümina, aşınma direncini ve termal kararlılığı artırarak, yoğun trafiğe maruz kalan mimari taş yüzeylerin dayanıklılığını önemli ölçüde artırmaktadır (Raul vd. 2025).

Bazı deneysel çalışmalar, nano parçacıkların geleneksel reçine bazlı dolgu maddelerine kıyasla daha üstün penetrasyon derinliği ve uzun süreli kararlılık sağladığını ortaya koymuştur (Gomez-Villalba vd. 2023). Ayrıca, nano ölçekli katkı maddelerinin kullanılması sonucunda parlaklık koruması, renk kararlılığı ve hava koşullarına karşı dayanıklılıkta belirgin şekilde artışın sağlandığı literatürde yaygın olarak rapor edilmiştir (Gkrava vd. 2024).

Araştırma sayısındaki artışa rağmen, nano-minerallerin mermer dolgu malzemesi olarak kullanılabileceği optimum koşulların ayrıntılı biçimde değerlendirildiği çalışmalar literatürde oldukça sınırlıdır. Mevcut çalışmaların önemli bir bölümü laboratuvar ölçeğinde yürütülmüş olup çoğunlukla beton ve seramik gibi farklı yüzeylere odaklanmaktadır. Bununla birlikte, literatür bulguları nano-minerallerin mermer endüstrisinde karşılaşılan kronik sorunların çözümünde yenilikçi bir yaklaşım sunduğunu; gelişmiş yapısal bütünlük ve uzun vadeli estetik koruma sağlayan yeni nesil dolgu malzemeleri olarak değerlendirilebileceğini ortaya koymaktadır. Bu çerçevede, doğal taşın kendine özgü fiziksel ve kimyasal özellikleri dikkate alınarak nanoteknolojinin mermer endüstrisine etkin biçimde entegrasyonuna yönelik sistematik araştırmalara duyulan gereksinim açıkça belirginleşmektedir.

2.1 Mermer ve Yapısal Kusurları

Yeniden kristalleşmiş kalsit veya dolomit minerallerinden oluşan metamorfik bir kayaç olan mermer, estetik özellikleri, yapısal dayanıklılığı ve mimari ile dekoratif alanlardaki geniş kullanım potansiyeli nedeniyle tarih boyunca yüksek değer atfedilen doğal bir malzeme olmuştur. Kireçtaşının yüksek sıcaklık ve basınç koşulları altında metamorfizması sonucu oluşan mermer, görsel kalitesini ve mekanik mukavemetini artıran yoğun ve birbirine kenetlenen kristal bir doku geliştirmektedir (Aslam 2017).

Mineral bileşimi, tane boyutu, damar desenleri ve renk çeşitliliğindeki farklılıklar, mermeri estetik ve fonksiyonel özellikleriyle öne çıkararak; inşaat, heykel, iç mekân tasarımı ve çeşitli endüstriyel uygulamalarda yaygın biçimde tercih edilen bir doğal taş malzemesi hâline getirmektedir. Ancak popülerliği ve yaygın kullanımına karşın, mermerin malzeme özellikleri jeolojik kökeni, metamorfik geçmişi ve birikim koşullarından önemli ölçüde etkilenmekte olup, bu faktörler birlikte değerlendirildiğinde mekanik davranışını, dayanıklılığını ve çevresel stresler altındaki performansını belirlemektedir (Siegesmund ve Snethlage 2011).

Mermerin jeolojik oluşumu sırasında ve sonrasında gerçekleştirilen çıkarma ve işleme süreçlerinde çeşitli yapısal kusurlar oluşmaktadır (Wong vd. 2022). Bu kusurlar arasında mikro çatlaklar, stilolitler, boşluklar ve mineral süreksizlikleri öne çıkmakta olup, mermerin yapısal bütünlüğünü zayıflatarak; estetik ve işlevsel performansını olumsuz yönde etkilemektedir (Xu vd. 2024). Mermerin taş ocağından çıkarılması, kesilmesi ve cilalanması sırasında kenar kırıkları, testere izleri ve yüzey düzensizlikleri gibi ek kusurlar ortaya çıkmakta; bu durum malzemenin yapısal bütünlüğünü daha da zayıflatmaktadır (Yu vd. 2024). Bu kusurlar, mermerin çekme ve eğilme dayanımı gibi mekanik özelliklerini olumsuz yönde etkilerken; hava koşulları, ısı döngüleri ve kimyasal etkileşimlere karşı direncini de azaltmaktadır (Faramarzi vd. 2025).

Mermerde gözlenen yapısal kusurların sistematik biçimde belirlenmesi, ayrıntılı olarak karakterize edilmesi ve uygun yöntemlerle giderilmesi; ürün kalitesinin artırılması ve mimari ile endüstriyel uygulamalarda uzun vadeli dayanıklılığın sağlanması için temel bir gereklilik olarak değerlendirilmektedir (Gabrielli vd. 2025).

2.1.1 Mermerin Özellikleri ve Endüstriyel Kullanımı

Mermer, yeniden kristalleşmiş kalsit (CaCO_3) veya dolomit ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$) minerallerinden oluşan metamorfik bir kayaç olup; sahip olduğu mineralojik, mekanik, termal ve estetik özelliklerin birleşimi sayesinde uzun yıllardır küresel ölçekte endüstriyel üretim ve mimari uygulamalarda en değerli doğal taşlardan biri olarak kabul edilmektedir (Yan ve Wang 2024).

Yüksek basınç ve sıcaklıkta gerçekleşen metamorfizma süreci, mermerde karakteristik bir kristal yapı geliştirerek birbirine kenetlenen kalsit tanelerinin oluşumunu sağlamaktadır. Bu kristal yapı, mermere pürüzsüz bir doku ve yüksek parlaklık katarak, diğer doğal taşlarda nadir görülen yarı saydımlık kazandırmaktadır (Çıtak vd. 2023). İnce taneli beyaz mermerlerde belirgin görülen bu yarı saydımlık, klasik Yunan ve Roma heykellerinde “parıldama” etkisiyle estetik üstünlük sağlamıştır. Bu özellik, sanatsal ve dekoratif uygulamalarla günümüzde de ilgi çekmeye devam etmektedir.

Mermer, fiziksel özellikleri bakımından $2,60\text{--}2,85\text{ g/cm}^3$ yoğunluk, tortul taşlara göre düşük gözeneklilik ve Mohs ölçeğinde 3–4 düzeyinde orta sertlik göstermekte olup, bu nitelikler onu diğer doğal taşlardan ayrı bir kategoriye dâhil etmektedir. Mermerde bulunan grafit, hematit, serpantin ve klorit gibi mineraller, mermerin renk ve damar yapısında çeşitlilik oluşturarak malzemenin yapısal ve dekoratif kullanımını desteklemektedir. Bunun yanı sıra mekanik özelliklerini iyileştirerek farklı mermer türlerine özgün estetik nitelik kazandırmaktadır (Abdaqadir ve Alshkane 2018).

Mermer, kolay işlenebilen ve yeterli dayanıklılığa sahip yapısal bir elemandır. Bununla birlikte, düşük iç gözenekliliğine karşın metamorfizma ve tektonik süreçler sırasında oluşan mikro çatlaklar ile mikro yapısal kusurlar barındırmaktadır. Söz konusu kusurlar, malzemenin mekanik bütünlüğünü ve dayanıklılığını zayıflatarak reçine emdirme, vakumlu doldurma, kimyasal sızdırmazlık ve polimer bazlı yüzey işlemleri gibi modern güçlendirme teknolojilerine olan bağımlılığını artırmaktadır (Baghloul vd. 2024).

Mekanik açıdan bakıldığında mermer, 60–140 MPa aralığında basınç dayanımı ve 6–20 MPa aralığında eğilme dayanımı sergilemekte olup; tane sınırları, anizotropi, damar yoğunluğu ve safsızlık dağılımına bağlı olarak değişken tokluk göstermektedir (Bukhari vd. 2023). Birbirine kenetlenen kalsit kristalleri mermerin basınç dayanımını artırırken, damarların ve yönlendirilmiş mikro çatlakların varlığı mekanik anizotropiye yol açmaktadır. Bu durum, taşın dayanımının kesme yönüne bağlı olarak farklılık gösterebilmesine neden olmaktadır (Çıtak vd., 2023). Mermerde gözlenen bu anizotropi, levhaların yanlış yönlendirilmesi durumunda işleme, elleçleme ve montaj süreçlerinde kırılmalara yol açabilmekte; bu durum, endüstride ciddi bir sorun olarak görülmektedir.

Mekanik performansının yanı sıra, mermerin ince kristal kalsit yapısı yüksek cila alma özelliği de kazandırmaktadır. Bu özellik, mermeri hem estetik hem de fonksiyonel açıdan değerli kılmakta ve iç mekân döşemeleri, tezgâhlar, duvar kaplamaları, dekoratif paneller ile prestijli mimari yüzeyler için aranan bir doğal taş malzemesi hâline getirmektedir (Siegesmund ve Snethlage, 2011). Böylece mermer, dayanıklı bir yapı malzemesi ve estetik niteliği yüksek bir tasarım unsuru olarak endüstride geniş kullanım alanı bulmaktadır.

Kalsitin kimyasal reaktifliğinden kaynaklanan asit duyarlılığı, asidik yağışlar ve kükürt dioksit gibi atmosferik kirleticilerin etkili olduğu dış ortam koşullarında mermerin dayanıklılığını azaltmakta ve uzun süreli performansını sınırlayan temel faktörlerden biri olarak öne çıkmaktadır. Mermerin asitlere karşı duyarlılığı, uygun sızdırmazlık maddeleri kullanılmadığında asidik gıda ve temizlik ürünlerinin yüzeyi aşındırmasına yol açabilmekte; bu durum, mermerin mutfak tezgâhı malzemesi olarak tercih edilmesini olumsuz yönde etkilemektedir (Price ve Doehne 2011).

Yüksek termal iletkenlik ve ısı direnç gibi özellikleri sayesinde mermer, sıcak iklimlerdeki iç mekân kaplamaları ile yerden ısıtma sistemlerinde tercih edilmektedir. Bununla birlikte, malzemenin termal şok ve donma-çözülme döngülerine maruz kalması, dış mekân uygulamalarında mikro çatlak ilerlemesini hızlandırarak yapısal bütünlüğünü olumsuz yönde etkileyebilmektedir (Faramarzi vd. 2025).

Mermerin yüksek parlaklık seviyesi ve özgün damarlı yapısı; konaklama tesisleri, ticari merkezler, kamusal alanlar, ibadethaneler ve prestijli konut projelerinde estetik bir unsur olarak benimsenmesini sağlamaktadır (Yıldırım ve Erdoğan 2024).

Endüstriyel ölçekte mermer; inşaat, mimari tasarım, sanatsal üretim ve endüstriyel imalat süreçlerinde kritik bir hammadde olarak değerlendirilmektedir. Yapısal ve estetik özellikleri doğrultusunda inşaat sektöründe; dış cephe kaplamaları, iç mekân yüzeyleri, merdiven basamakları ve döşeme sistemlerinin yanı sıra kolonlar, havuz çevreleri, şömine çevreleri ve yüksek nitelikli ıslak hacim donatılarında yaygın kullanım imkânı bulunmaktadır (Resim 2.1).



Resim 2. 1 Çırağan Sarayı'nın tarihi hamamı (Çakmak 2020).

2.1.2 Mermerin Üretimi ve İşlenmesi

Taş işleme endüstrisinde elmas telli ve çok bıçaklı testere sistemleri, gelişmiş cilalama hatları ile CNC tabanlı teknolojiler, üretimde verimlilik ve hassasiyeti artırarak kırılğan veya yoğun damarlı mermerlerin düşük kırılma oranı ve azaltılmış atıkla işlenmesine imkân sağlamıştır (Zhang vd. 2024).

Yapısal ve estetik uygulamalarının yanı sıra mermer, toz veya mikronize formda önemli bir endüstriyel kullanım alanına sahiptir. Kalsiyum karbonat (CaCO_3) esaslı bir dolgu maddesi olarak değerlendirilen öğütülmüş mermer; boya, plastik, yapıştırıcılar, sızdırmazlık malzemeleri, kauçuk ürünleri, seramik, kâğıt, ilaç ve gıda katkı maddeleri üretiminde kritik bir bileşen olarak kullanılmaktadır (Ivaniciuc vd. 2021).

Parlaklığı, beyazlığı, kimyasal saflığı ve inert davranışı mermeri birçok alanda tercih edilen bir malzeme haline getirmiştir (Ersoy vd. 2021). Daha ince tane boyutuna sahip mermer tozu, opaklık ve baskı yapılabilirlik özelliklerini artırmak için yüksek kaliteli kaplamalar ve baskı kâğıtlarının üretiminde kullanılmaktadır (Ivaniciuc vd. 2021).

Mermer kökenli kalsiyum karbonat, çevresel mühendislik süreçlerinde; baca gazı kükürt giderme sistemlerinde, atık su arıtımında ve asitli maden drenajının ıslahında nötrleştirici bir madde olarak kullanılmaktadır (Bağrıaçık vd. 2025). Bununla birlikte, çimento ve beton endüstrilerinde sürdürülebilir yapı malzemelerinin geliştirilmesi amacıyla çimento veya ince agrega yerine kısmen mermer tozu kullanımı; karışımların işlenebilirliğini artırmakta, hidrasyon ısını azaltmakta, çimento üretimiyle ilişkili toplam CO₂ emisyonlarının düşürülmesine katkı sağlamakta ve aynı zamanda estetik özellikleri iyileştirmektedir (Abbas ve Muntean 2025).

Su jeti kesimi ve robotik oyma gibi dijital üretim teknolojilerinin gelişimi, mermerin özel mimari uygulamalardaki rolünü hızla artırmaktadır. Ancak sektör, taş ocağı atıklarının yönetimi, çıkarma süreçlerinin çevresel etkileri, nakliye kaynaklı emisyonlar ve atıkların değerlendirilmesine yönelik yenilikçi stratejilere duyulan ihtiyaç gibi önemli zorluklarla karşı karşıya bulunmaktadır (Tazzini vd. 2024).

Mermer üretimi, bulamaç, toz ve kırık taş parçaları şeklinde yüksek miktarlarda atık ortaya çıkarmaktadır. Bu durum, mermer atıklarının kompozit dolgu maddeleri, tamamlayıcı çimentolu malzemeler ve mühendislik taşı üretiminde hammadde olarak geri dönüşümüne yönelik araştırmaları teşvik etmektedir (Abbas ve Muntean 2025).

Mermerin asit yağmuru, tuz kristalleşmesi ve atmosferik kirleticilere karşı duyarlılığı, zorlu çevresel koşullarda uzun vadeli performansın korunabilmesi için koruyucu kaplamalar, nano-modifiye sızdırmazlık sistemleri ve ileri kompozit takviye yöntemlerinin geliştirilmesine yönelik araştırmaları teşvik eden temel etkenlerden biri olarak öne çıkmaktadır (Urbanek vd. 2025).

Mekanik ve estetik özelliklerinin yanı sıra, mermerin küresel endüstri ve pazardaki payı da kullanım alanlarını ve değerini belirlemektedir. Küresel mermer pazarı, jeolojik bulunabilirlik, işleme teknolojisi, tüketici tercihleri ve ekonomik faktörlerden etkilenmektedir. Türkiye, İtalya, Hindistan, Çin, İspanya ve Yunanistan dünya mermer endüstrisinin önde gelen üreticileri arasında yer almaktadır. Bu ülkeler, jeolojik açıdan özgün nitelikteki mermer çeşitlerini tedarik etmekte ve taş ocağı işletmeciliği, levha

işleme, ihracat süreçleri ile katma değerli üretime odaklanan uzmanlaşmış endüstriyel kümeler geliştirmektedir. Örneğin Türkiye, dünyanın en büyük mermer rezervlerinden birine sahip olup, cilalı ve reçineyle işlenmiş levhalar ile boyutlu taşların büyük ölçekli inşaat projelerinde kullanıldığı önemli bir ihracatçı konumundadır (Rai 2023).

Genel olarak, mermerin mineralojik bileşimi, mekanik davranışı, kimyasal özellikleri ve estetik çekiciliğini kapsayan özellikleri geniş kapsamlı endüstriyel uygulamalarıyla bir araya geldiğinde, onu modern toplum tarafından tercih edilen kültürel açıdan önemli, ekonomik açıdan değerli ve teknolojik açıdan çok yönlü doğal malzemelerden biri haline getirmeye devam etmektedir (Abbas ve Muntean 2025).

2.1.3 Mermer Plakalarında Yaygın Görülen Kusurlar

Mermer, birinci sınıf bir dekoratif taş olarak sahip olduğu itibara karşın, jeolojik kökeni ve sonraki işleme süreçleri nedeniyle doğası gereği heterojen ve yapısal açıdan süresiz bir malzeme niteliği taşımaktadır. Esas olarak kireçtaşı veya dolomitten türeyen metamorfik bir kayaç olan mermer, karmaşık tektonik gerilmeler, yeniden kristalleşme süreçleri ve akışkan-kaya etkileşimlerine maruz kalmakta; tüm bu süreçler, doğal kusurlar biçiminde karakteristik izler bırakmaktadır (Török ve Pşikryl 2010).

Taş ocağından blok çıkarmaya, kesmeye, reçine emdirmeye, cilalamaya, elleçlemeye ve montaja kadar uzanan endüstriyel üretim zincirinin her aşaması yeni kusurlar oluşturabilmekte ya da mevcut olanları kötüleştirebilmektedir. Bu nedenle, doğal taş teknolojisi ve kalite kontrol süreçleri, mermer levhalardaki kusurların tanımlanmasına, sınıflandırılmasına ve azaltılmasına büyük önem vermektedir. Çünkü bunlar mekanik performansı, dayanıklılığı, verimi ve piyasa değerini büyük ölçüde etkilemektedir. Yaygın kusurlar genellikle kökenlerine, ölçeklerine ve yapısal bütünlük veya görsel kalite üzerindeki etkilerine göre gruplandırılmaktadır (Török ve Pşikryl 2010).

Jeolojik perspektiften incelendiğinde, mermer levhalarda en yaygın olarak tanımlanan doğal kusurlar arasında damar oluşumları ve bunların oluşturduğu damar ağları öne çıkmaktadır (Török ve Pşikryl 2010). Bunlar genellikle metamorfizma sırasında

çatlaklardan oluşan mineral açısından zengin sıvıların kalsit, dolomit, kuvars veya çeşitli demir oksitler ve hidroksitler gibi mineralleri çökeltmesiyle oluşmaktadır. Mermerde damarlar sıkı veya açık formda bulunabilmektedir; birçok ticari mermer türünde görülen “açık damarlar” ise kısmen ya da tamamen boş olup, levhalarda mekanik yükleme altında ilerleyebilen dar, doğrusal boşluklar veya çatlaklar şeklinde ortaya çıkmaktadır. İnce, iyi bağlanmış damarlar kabul edilebilir ve hatta estetik olarak arzu edilebilir olsa da açık veya kötü gelişmiş damarlar zayıflık düzlemleri gibi davranmakta ve kırılmayı önlemek için işleme sırasında rutin olarak reçine ile doldurulmaktadır (Suh vd. 2017).

Yakından ilişkili yapılar arasında, basınç çözeltisi süreçleri altında oluşan ve çözünmeyen kalıntılarla (örneğin killer ve oksitler) zenginleşmiş düzensiz, tırtıklı çözünme yüzeyleri olarak tanımlanan stilolitler ile stilolitik dikişler bulunmaktadır (Török ve Pşikryl 2010). Levhalarda, stilolitler koyu renkli, pürüzlü çizgiler olarak ortaya çıkabilmekte ve uzunlukları boyunca mikro çatlaklar veya gözeneklilik yoğunlaştırarak yerel dayanımı azaltabilmektedir.

Jeolojik kusurlar arasında kalsitin kısmi çözünmesi, hapsedilmiş gaz kabarcıkları, protolitten miras kalan fosiller ve birincil tortul yapılar sonucunda oluşan gözenekler, boşluklar ve oyuklar yer almaktadır. Milimetreden santimetreye kadar değişen bu boşluklar, özellikle breşik ve fosilli mermerlerde ve ticari amaçla “mermer” olarak pazarlanan kireçtaşlarında yaygın olarak gözlemlenir. Mermer levhalarda bu tür boşlukların varlığı, görsel sürekliliği ve mekanik dayanımı sağlamak amacıyla dolgu ve reçine sistemlerinin endüstriyel ölçekte kullanımının başlıca nedenlerinden biri olarak değerlendirilmektedir (Suh vd. 2017).

Mikro çatlaklar, mermerde yaygın olarak gözlemlenen jeolojik kusurlar arasında yer almaktadır. Literatürde, tekil kalsit taneleri içindeki kristal içi mikro çatlaklar ile tane sınırları boyunca yayılan taneler arası mikro çatlaklar arasında sistematik bir ayrım yapılmaktadır. Bu çatlaklar metamorfizma, tektonik deformasyon, yükselme süreçleri veya yüzeye yakın bölgelerdeki gerilimler sırasında oluşabilmekte ve çoğunlukla bölgesel gerilim alanları tarafından yönlendirilen tercihli dizilimler sergilemektedir.

Gözle kolayca tespit edilemeyen bu çatlaklar, etkin yük taşıma kesitini azaltmakta ve gerilim yoğunlaştırıcı olarak eğilme dayanımını düşürmektedir. Ayrıca kesme, cilalama ve kullanım sırasında kırılmaya karşı duyarlılığı artırmaktadır (Xu vd. 2024).

Mikro çatlakların yoğunluğu ve yönelimi, mermerin mekanik davranışındaki anizotropiyi belirlemektedir. Çatlak yönüne paralel kesilen levhalar, genellikle dik kesilenlere kıyasla daha düşük eğilme dayanımı göstermektedir. Mineralojik heterojenlik, örneğin mika bakımından zengin bantlar, kuvars çizgileri ve grafit katmanları, farklı termal genleşme ve mekanik özellikleriyle çatlak oluşumunu kolaylaştırarak doğal kusurları derinleştirmektedir (Xu vd. 2024).

2.1.4 Mermer Plakalarında Oluşan Endüstriyel Kusurlar

Doğal kusurlara ek olarak, mermer blokların levhalara ve bitmiş ürünlere dönüştürülmesi sırasında işleme kaynaklı çeşitli kusurlar oluşabilmektedir. Taş ocağı ve blok çıkarma aşamalarında delme, kontrollü patlatma veya elmas tel kesme yöntemlerinin kullanımı, doğal süreksizlikler nedeniyle zayıf olan bloklarda yeni çatlakların oluşmasına yol açabilmektedir. Ayrıca, yükleme, taşıma ve depolama sırasında hatalı uygulamalar darbe kaynaklı çatlaklar ile köşe ve kenar kırılmalarına neden olabilmekte; bu kusurlar çoğu zaman sonraki işleme aşamalarında ortaya çıkmamaktadır (Yurdakul 2020).

Kesme aşamasında özellikle bıçak hizalaması, besleme hızı ve soğutma koşullarının uygun şekilde optimize edilmediği durumlarda, testere izleri, kesme olukları ve kalınlık farklılıkları gibi kusurlar sıkça ortaya çıkmaktadır. Bu testere izleri, sonraki aşamalarda aşırı taşlama ve cilama gereksinimine yol açabilmekte; levhanın incelmeye neden olmakta ve kimi zaman önceden var olan damarlar ile boşlukları açığa çıkararak ya da genişleterek kusurların daha belirgin hale gelmesine neden olmaktadır (Yurdakul 2020).

Reçine emdirme, file destek ve cilalama gibi sonraki aşamalar, kendilerine özgü karakteristik kusurlar ortaya çıkarmaktadır. Literatürde, eksik veya düzensiz reçine penetrasyonu önemli bir sorun olarak sıklıkla vurgulanmaktadır. Viskozite, vakum

seviyesi ya da emdirme süresinin yeterli şekilde kontrol edilmemesi durumunda, reçine ince mikro çatlaklara ve derin gözeneklere nüfuz edemeyerek bu bölgeleri dolduramamakta ve yapısal açıdan zayıf bırakabilmektedir. Buna karşılık, yüzeyde aşırı reçine birikimi, doldurulmuş çukurların ve görünür reçine havuzlarının oluşmasına yol açmakta; bu durum estetik açıdan olumsuz etkilere neden olmakta ve mermer matrisine kıyasla farklı bir atmosferik dayanıklılık sergileyebilmektedir (Vrochidou vd. 2022).

Cilalama kusurları arasında portakal kabuğu dokusu, puslu veya düzensiz parlaklık, cila yanıkları ve yüzey dalgalanmaları yer almakta olup; bu kusurlar, yüzey kalitesinin kritik önem taşıdığı yüksek yansıtıcılı beyaz mermerlerde özellikle belirgin şekilde ortaya çıkmaktadır. Kenar profili oluşturma ve sonlandırma aşamalarında, takımların aşınması veya besleme parametrelerinin uygun şekilde ayarlanmaması durumunda kenar kırılmaları ve mikro kıymıklanmalar meydana gelebilmektedir. Bu tür kusurlar yalnızca estetik görünümü olumsuz etkilemekle kalmaz, aynı zamanda servis yükleri altında daha büyük çatlakların gelişmesine de zemin hazırlayabilmektedir (Huang vd. 2024).

Mermerde gözlemlenen ayrı fakat ilişkili kusur gruplarından biri, mimari ve dekoratif uygulamalarda estetik açıdan kritik rol oynayan görsel ve renk düzensizlikleridir. Yapısal olarak sağlam levhalar dahi, referans numuneler veya önceden monte edilmiş elemanlarla karşılaştırıldığında, renk tonu farklılıkları, bulanıklık, yamalı görünümlemler veya istenmeyen damar desenleri nedeniyle kalite açısından yetersiz bulunabilmekte ve kullanım dışı bırakılabilmektedir (Ghimire ve Manohar 2025).

Mermerdeki doğal renk farklılıkları, yardımcı minerallerin heterojen dağılımı, demir fazlarının atmosferik oksidasyonu ve mikro çatlaklar ile damarlar boyunca gerçekleşen kısmi oksidasyon süreçleriyle izah edilmektedir. Ayrıca, malzemenin depolama ve işleme süreçlerinde paslanan metal parçalar, organik kirleticiler, işlem suyu ve/veya uygunsuz kimyasal temizleyicilerle temas etmesi sonucunda lekelenme ve renk bozulmaları oluşabilmektedir (Ghimire ve Manohar 2025). Pirit veya diğer sülfür minerallerini içeren bazı mermerlerde, bu inklüzyonların oksidasyonu sonucunda mikro çatlaklar boyunca yüzeye doğru ilerlemesi, zamanla pas lekelerinin oluşmasına yol neden olabilmektedir (Ghimire ve Manohar 2025).

Mermer yüzeyi ile reçine ve çevresel faktörler arasındaki uzun süreli etkileşim, reçinenin sararmasına veya koyulaşmasına neden olarak dolgulu alanlar ile çevredeki taş arasında görsel uyumsuzluklara yol açabilmektedir. Bu durum literatürde, özellikle lüks iç mekân uygulamalarında tercih edilen beyaz ve açık renkli mermerler için önemli bir dayanıklılık sorunu olarak sıklıkla vurgulanmaktadır (Ghimire ve Manohar 2025).

Mermerdeki kusurların sıklığı, boyutu ve dağılımı, ticari sınıfların belirlenmesinde ve bir levhanın yüksek yüklü döşeme, cephe kaplaması veya tamamen dekoratif elemanlar gibi belirli kullanım alanları için uygunluğunun değerlendirilmesinde temel ölçüt olarak kullanılmaktadır. Buna paralel olarak, literatür makroskopik kusur değerlendirmesini, iç çatlak ağının, gözenekliliğin ve anizotropinin analizine yönelik optik mikroskopi, taramalı elektron mikroskobu (SEM), X-ışını bilgisayarlı tomografi ve ultrasonik test gibi gelişmiş karakterizasyon yöntemleriyle giderek daha fazla bütünleştirmektedir (Çelik vd. 2024). Bu yöntemler, kusur desenlerinin eğilme dayanımı, darbe direnci ve kırılma tokluğu gibi mekanik özelliklerle ilişkilendirilmesine olanak tanıyarak, levha performansının öngörülmesi ve işleme parametrelerinin optimize edilmesi için daha sağlam bir bilimsel temel sunmaktadır (Strzałkowski vd. 2023).

Mermer levhalarda görülen kusurlar, jeolojik kalıtım ile endüstriyel işlemenin birleşik etkilerini yansıtmaktadır. Damarlar, stilolitler, mikro çatlaklar, gözenekler, mineralojik heterojenlikler vb. doğal özellikler; testere izleri, kenar kırılmaları, reçine kaynaklı anomaliler, cilalama hataları vb. işleme kaynaklı kusurlar ile kullanım sürecinde oluşan hasarlar birleşerek levhanın bütünsel kalite ve performansını etkilemektedir (Luque vd. 2011). Bunlara eğilme, şekerlenme, lekelenme ve hava koşullarına bağlı bozulma gibi hizmet kaynaklı kusurlar eklenmektedir (Ghimire ve Manohar 2025).

Kalite kontrol ve standardizasyon kapsamında, ulusal ve uluslararası taş standartları mermer levhalardaki kusurları görsel inceleme, boyut toleransları, yüzey düzlükleri ve mekanik test sonuçlarına dayanarak sınıflandırmakta ve nitelendirmektedir (Strzałkowski vd. 2023). Bu standartlar genellikle çatlaklar, yarıklar, delikler, boşluklar, damarlar, çukurlaşmalar, renk bozulmaları, yabancı maddeler ile kenar ve köşe kusurları gibi kategorileri tanımlamaktadır.

Literatür, mermer levhalarda gözlemlenen kusurların kökeni, morfolojisi ve etkilerinin anlaşılmasının; uygun mermer türlerinin seçilmesi, optimum kesme ve emprenye stratejilerinin tasarlanması ve yapısal bütünlük ile dayanıklılığın artırılması sürecinde kritik öneme sahip olduğunu vurgulamaktadır. Bu bağlamda, estetik özellikleri koruyabilen ve/veya iyileştirebilen nano-modifiye reçineler ve mineral nano dolgular gibi gelişmiş dolgu sistemlerinin geliştirilmesi, modern mermer işleme teknolojilerinde giderek daha fazla önem kazanmaktadır (Torabi-Kaveh vd. 2022).

2.2 Geleneksel Dolgu Malzemeleri ve Teknikleri

2.2.1 Reçine Bazlı Dolgular

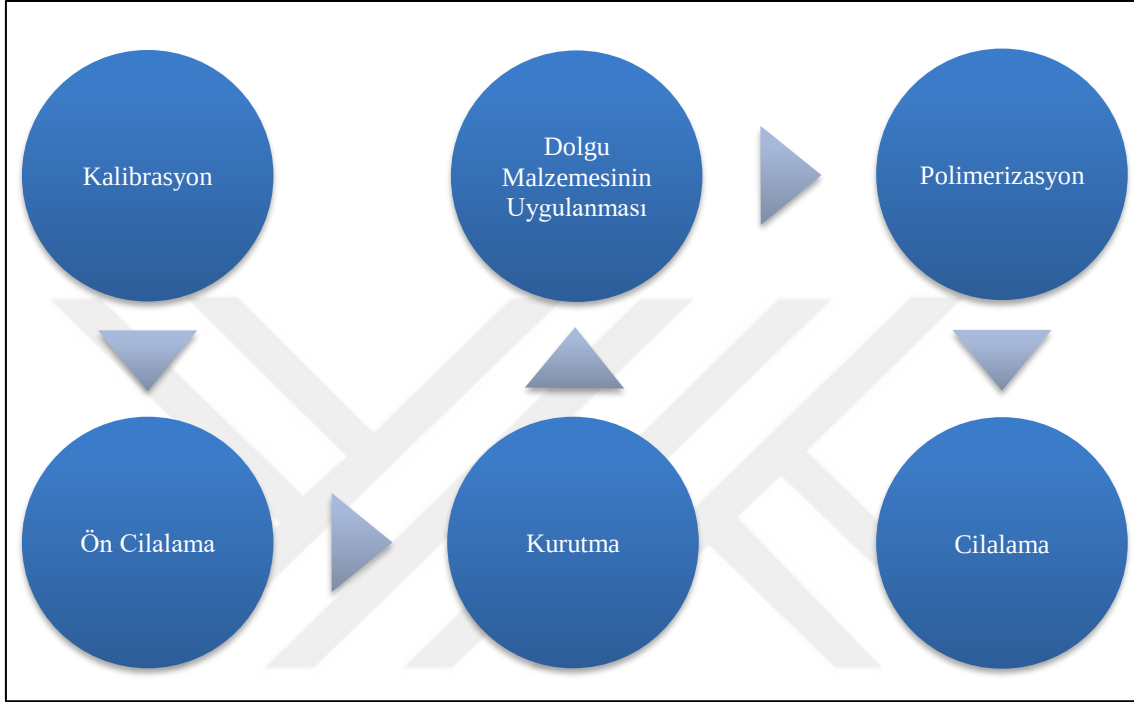
Mermer işlemede en yaygın kullanılan dolgu malzemeleri polyester ve epoksi reçineler olup, bu reçineler genellikle renk tutarlılığını sağlamak amacıyla mermer tozu ile karıştırılmaktadır. Makul düzeyde yapışma ve sertlik sağlamalarına karşın, söz konusu reçineler zamanla renk bozulması, büzülme ve sınırlı atmosferik dayanıklılık sergileyebilmektedir (Baghloul vd. 2024).

Polyester bazlı malzemeler dolgu amacıyla kullanılmakta olup, bu malzemelerin taşın sertleşmesini sağlama kapasitesi sınırlıdır. Karışım hazırlanırken ana malzemeye genellikle %2–3 oranında katalizör eklenmekte ve karışımın tam sertleşme süresi normal hava koşullarında 1–1,5 saat sürmektedir. Söz konusu malzemeler, yarı katı yapıları sayesinde taşıdaki gözenekleri kolayca doldurabilmekte ve fırınlanabilir özellik göstermektedir. Bu malzemeler iki gruba ayrılmaktadır:

- Kalibreli ve cilalı taşlarda kullanılan yarı katı polyester dolgu malzemeleri,
- Cilalanmış taşlarda rötuş amacıyla balmumu dolgu malzemeleri.

Fileli veya filesiz arka kaplama ve renkli veya şeffaf ön kaplama olarak uygulanan polyester reçine, ön yüzeye uygulandığında tek bir işlemde çatlak onarımı yaparak gözenek doldurabilmekte ve böylece cila kalitesini yükseltebilmektedir. Bunun yanı sıra, kürlenme süresinin kısa olması nedeniyle düşük enerji tüketimi sağlamaktadır.

Polyester reçine, çok kırılkan olmayan taşlarda gözenek doldurucu ve güçlendirici olarak uygulanmaktadır. Yüzeye elle dokunulduğunda uygulamadan sonra uzun süre yapışkanlık kalmaktadır. Bu yapışkanlığın istenmediği durumlarda parafinli polyesterler kullanılmaktadır. Polyester dolgu işleminin iş akışı Şekil 2.1’de verilmiştir.



Şekil 2. 1 Polyester bazlı dolgu uygulamasının iş akışı

Polyester dolgu yönteminde, sıcaklık etkisiyle kaya yapısında erime boşlukları oluşmaktadır. Bunun sonucunda gözeneklilik artmakta ve yapının mukavemeti azalmaktadır. Bu nedenle, polyester bazlı dolgu yönteminin çimento dolguya kıyasla sınırlı kullanılması ve özellikle bağlantılı gözenekli matris yapısına sahip kalsiyum karbonat bazlı kayalarda tercih edilmemesi gerekmektedir (Demirdağ 2009). Benzer şekilde, travertenin doğal yapısı yüksek nem emme kapasitesine sahip olduğundan, yüzeyin gerçek renk tonu ve cila kalitesi yalnızca tamamen kurutulmuş durumda güvenilir biçimde değerlendirilebilmektedir. Zira ıslak traverten, özgün renginden belirgin biçimde daha koyu görünmektedir. Bu nedenle, doğru malzeme seçiminin sağlanması ve paketleme sırasında nem kaynaklı sorunların önlenmesi için travertenin, yeniden terlemeye neden olmayacak derinliğe kadar kurutulması tavsiye edilmektedir (Çobanoğlu ve Çelik 2020).

Mikro boşluklara yeterince nüfuz edemeyen geleneksel dolgu maddelerinin, mermer alt tabakasıyla oluşturdıkları bağlarda termal genleşme uyumsuzluğu olduğu veya nem etkisiyle zamanla zayıfladığı ve bunun sonucunda yapısal bütünlüğünün azaldığı belirlenmiştir (Menningen vd. 2021). Bununla beraber, reçine sararmasının ve görsel uyumsuzlukların bu dolgu sistemlerinde görülen en yaygın estetik dezavantajlar olduğu tespit edilmiştir (Ci vd. 2025).

2.2.2 Çimento Dolgu

Çimento dolgusu, travertenin gözeneklerini doldurmak amacıyla uygulanan bir yöntemdir. Kullanılan dolgu karışımları; uygun oranlarda beyaz çimento, kalsit, kaolin ve yeterli miktarda farklı renkli oksitler içermektedir. Ayrıca, ufalanmayı azaltmak, yüzey cila kalitesini artırmak ve sertleşme süresini kısaltmak amacıyla bağlayıcı bir yapıştırıcı ilave edilmektedir.

Yapılan deneysel çalışmalar, çimento dolgu türünün kayanın yapısal bütünlüğü açısından herhangi bir olumsuzluğa neden olmadığını ortaya koymuştur. Çimento dolgunun gözenekleri tamamen doldurması neticesinde, geçirimsiz ve oldukça homojen bir kaya ortamının olduğu tespit edilmiştir. Bu nedenle, çimento dolgusunun uygulandığı gözenekli kayalarda basınç dayanımı değerlerinin daha yüksek, gözeneklilik oranının ve su emme özelliklerinin ise daha düşük bulunduğu vurgulanmıştır (Çobanoğlu ve Çelik 2020).

Travertenin fiziksel ve teknik özellikleri dikkate alındığında, en uygun dolgu yönteminin çimento dolgusu olduğu görülmektedir. Çimento dolgusu, kaplama veya döşeme malzemesi olarak kullanılacak kayanın gözenekliliğini azaltarak daha geçirimsiz bir yapı kazanmasını sağlamaktadır. Gözenekliliğin azalmasıyla birlikte kaya dokusu daha sıkı bir hâl almakta ve buna bağlı olarak basınç dayanımı artmaktadır (Çobanoğlu ve Çelik 2020). Bu teknik avantajların yanı sıra, tamamlanan imalatın metreküp (m^3) veya metrekare (m^2) başına birim maliyeti açısından değerlendirildiğinde, çimento dolgusunun polyester dolguya kıyasla yaklaşık üç ila dört kat daha ekonomik olduğu anlaşılmaktadır (Demirdağ 2009).

2.2.3 Reçine Emdirme

Mermer yüzey işleme süreçlerinin vazgeçilmez aşamalarından biri, yüksek çatlak yoğunluğu, geniş doğal boşluklar veya belirgin damar yapılı mermerlerde uygulanan reçine emdirme ve dolgu işlemidir. Bu uygulamanın amacı, levhaların yapısal stabilitesini artırmak ve boşlukları mineral dolgularla desteklenen şeffaf veya pigmentli reçinelerle doldurarak, estetik açıdan homojen ve bütünlüklü bir yüzey oluşturmaktır.

Mermer işleme hatlarında uygulanan reçine emdirme süreci, levhaların konveyör sistemlerinde düşük ila orta viskoziteli polyester, epoksi veya poliüretan reçinelerle kaplanmasıyla başlamaktadır. Yüksek kalite gereksinimlerinde vakumlu reçine emdirme yöntemi kullanılmakta; bu yöntemde levhalar vakum odalarına alınarak gözenek ve çatlaklardaki hava boşaltılmakta ve reçine düşük basınç altında uygulanarak daha derin penetrasyon sağlanmaktadır. Uygulama sonrasında levhalar, reçinenin kimyasal yapısına bağlı olarak ısıtmalı kürleme tünellerinde veya UV kürleme sistemlerinde sertleştirilmektedir. Kürleme işlemi tamamlandığında yüzeyde kalan fazla reçine, taşlama ve cilalama aşamalarında uzaklaştırılmakta ve doldurulmuş kusurlar çevredeki taş yüzeyiyle bütünleşmektedir (Menningen vd. 2021).

Sürecin verimliliği reçine viskozitesi, ıslanma davranışı, kürlenme süresi ve mermerle uyumluluk gibi parametrelere bağlıdır. Yanlış reçine seçimi veya işlem kontrolündeki hatalar ise eksik dolgu, reçine büzülmesi, zamanla sararma ve gözenek duvarlarına zayıf bağlanma gibi kusurların oluşmasına yol açabilmektedir (Menningen vd. 2021).

Vakum infiltrasyonu ve ısıtma süreçleriyle desteklenen reçine işlemi, mermer levhaların stabilizasyonu, mikro çatlakların kapatılması, eğilme dayanımının geliştirilmesi ve yüzey kalitesinin yükseltilmesi için günümüzde taş işleme endüstrisinde standart bir yöntem olarak benimsenmiştir (López-Buendía vd. 2013). Bu işlem, yüksek çatlak yoğunluğuna veya yapısal zayıflıklara sahip olanlar dâhil olmak üzere daha önce atık olarak değerlendirilen blokların endüstriyel ölçekte kullanılabilir hâle getirilmesini mümkün kılarak, doğal taş işleme sektöründeki sürdürülebilirlik uygulamalarına önemli ölçüde katkı sağlamaktadır (Tazzini vd. 2024).

2.2.4 Toz Boyalar

Çimento esaslı dolgu malzemesinin hazırlanması aşamasında, mermer rengine uyumlu olan toz boya dolgu karışımına ilave edilmektedir. Toz boyalar; pigmentlerin dolgu maddeleri ve özel katkı bileşenleriyle aktive edilmesiyle elde edilen, suda çözünebilir ve ekonomik renklendirici malzemelerdir. Bu boyalar, suda çözündürülerek doğrudan uygulanabilmektedir. Uygulama süreçlerinden sonra levha yüzeyinde oluşabilecek tozlanmanın önlenmesi amacıyla karışıma bağlayıcı bir yapıştırıcı eklenmesi tavsiye edilmektedir (Sarışık vd. 2020).

2.3 Mermerde Yüzey İşleme Teknikleri

Mermer yüzey işleme teknikleri, mermer levha ve karoların nihai görünümünü, performansını ve kullanım ömrünü tespit etmede belirleyici bir rol oynamaktadır. Taşın mineraloji, tane boyutu, damarlanma ve mikro çatlak yoğunluğu gibi içsel özellikleri temel oluştururken, kesme, kalibrasyon, taşlama, dolgu, cilalama ve dokulandırma işlemlerinin sırası, parlaklık, renk ifadesi, kayma direnci, leke hassasiyeti ve algılanan kaliteyi kontrol etmektedir.

Günümüzde modern taş işleme tesislerinde mermer yüzey işleme, mekanik aşınma, kimyasal-mekanik etkileşimler, reçine emdirme ve yüzey koruma sistemlerinin entegrasyonunu içeren, ileri mühendislik gerektiren çok aşamalı bir süreç olarak yürütülmektedir. Bu süreçlerin her biri, nihai uygulama alanına (iç mekân döşemeleri, cephe kaplamaları, tezgâhlar veya dekoratif paneller) uygun şekilde optimize edilmesi gerekmektedir.

Boyutlu taş teknolojisi üzerine yapılan araştırmalar, uygunsuz yüzey işleminin yalnızca estetik değeri azaltmakla kalmayıp aynı zamanda mevcut kusurları daha da kötüleştirebileceğini, mekanik mukavemeti azaltabileceğini ve mermer ürünlerinin kullanım ömrünü kısaltabileceğini vurgulamaktadır. Yüzey işleme süreci; blokların katrak (gang saw), dairesel testere veya elmas tel kesme yöntemleriyle plakalara ayrılmasının ardından başlamaktadır (Çetintaş 2025).

Kesim sonrası yüzeylerde testere izleri, yüzey pürüzlülüğü, mikro-kırılmalar ve boyutsal varyasyonlar gözlemlenmektedir. Bu morfolojik düzensizliklerin giderilmesi amacıyla sürecin ilk aşamasını, yüzey düzlemselliğini ve standart kalınlığı sağlayan kalibrasyon ile taşlama işlemleri oluşturmaktadır (Çetintaş 2025).

Levhaların homojen kalınlıkta olması için kaba aşındırıcılar veya elmas aletlerle donatılmış döner kafalar aracılığıyla kalibrasyon işlemi gerçekleştirilmektedir. Bu işlem, özellikle boyut toleranslarının ve yüzey düzlüklerinin kritik olduğu büyük formatlı döşeme karoları ile cephe panellerinde önem arz etmektedir (Çetintaş 2025).

Kalibrasyon sonrasında, testere izlerinin giderilmesi, yüzey düzensizliklerinin düzeltilmesi ve kesme sürecinden kaynaklanan yüzeye yakın hasarın ortadan kaldırılması amacıyla kaba taneli aşındırıcılar (24–60 grit) ile kaba taşlama yapılmaktadır. Bu aşama mermerin doğal desen ve renk özelliklerini ortaya çıkarmaya başlarken, besleme hızı, kafa basıncı ve soğutma suyu akışı gibi parametrelerin optimize edilmesi aşırı ısınma ve mikro çatlak oluşumu riskini azaltmaktadır. Endüstriyel üretim hatlarında ise taşlama ve parlatma işlemleri, giderek daha ince aşındırıcılarla donatılmış çok kafalı otomatik konveyör sistemlerinde yürütülmektedir (Çetintaş 2025).

İnce taşlama ve honlama, kaba taşlama sonrasında yüzeyin daha yüksek kaliteye ulaşmasını sağlayan kritik aşamalardır. Honlama işleminde orta ila ince tanecikli aşındırıcılar (120–400 veya 800 grit) kullanılarak, düşük fakat algılanabilir yansıma özelliğine sahip pürüzsüz, mat veya saten yüzeyler elde edilmektedir. Bu yüzeyler, yüksek parlaklığın istenmediği veya kayma direncinin öncelikli olduğu döşeme, merdiven basamakları ve tezgâh uygulamalarında tercih edilmektedir. Derin çiziklerin azaltılması ve mikrometre ölçeğinde Ra değerleriyle ifade edilen düşük pürüzlülüğün sağlanması, honlamayı hem mat yüzeylerin nihai kullanımı hem de üst seviye parlatma işlemleri için uygun bir hazırlık aşaması haline getirmektedir (Çetintaş 2025).

Literatürdeki çalışmalar, honlama işleminin hem leke emilimi hem de ışık saçılma özellikleri üzerinde belirgin etkiler yarattığını ortaya koymaktadır. Honlanmış mermer yüzeyler, aynı taşın cilalı yüzeylerine kıyasla daha açık ve dağınık bir görünüme sahip

olmakla birlikte, renk ve damarlanmayı net biçimde sergilemeye devam etmektedir. Bu aşamada görünür durumda kalan açık gözenekler, boşluklar veya çatlaklar, son cilalama işleminden önce genellikle dolgu teknikleri kullanılarak iyileştirilmektedir.

2.3.1 Cilalama

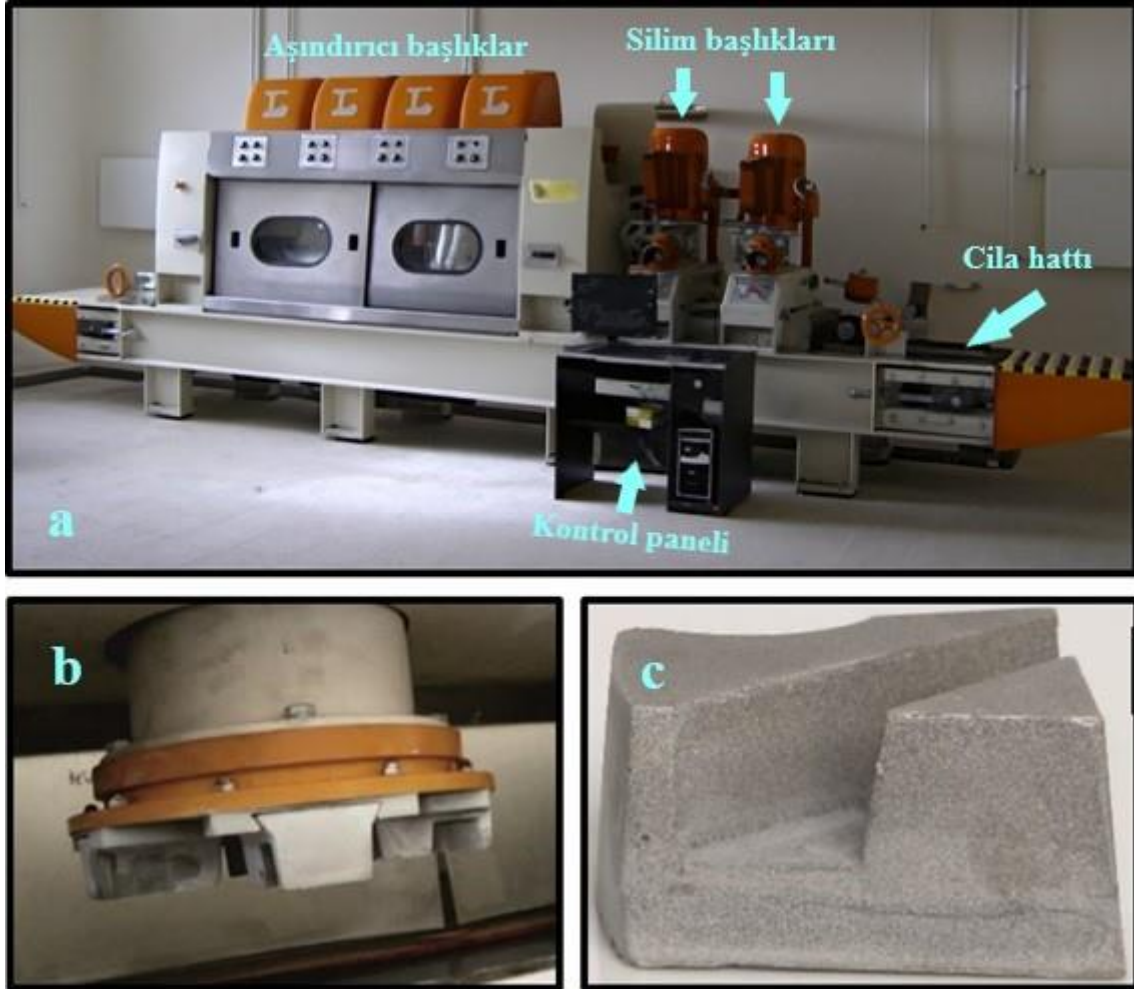
Mermer levha ve fayansların cilalanması işlemi, sürecin son ve görsel açıdan en kritik aşamasını oluşturmaktadır. Kesme, kalibrasyon, taşlama ve reçine emdirme, levhanın geometrisini ve yapısal bütünlüğünü belirlerken; cilalama işlemi yüzey parlaklığını, renk derinliğini, estetik değerini ve malzeme kalitesini doğrudan etkilemektedir.

Mermer cilalama, boyutlu taş teknolojisi literatüründe hem mekanik hem de kimyasal-mekanik süreçlerin birleşimi olarak tanımlanmaktadır. Bu işlemde kademeli aşındırma ile yüzey düzensizlikleri ve çizikler giderilmekte; cilalama tozları veya kimyasalları kalsit yüzeyiyle reaksiyona girerek parlaklığı ve yüzey sertliğini artıran ince, yoğunlaştırılmış bir tabaka oluşturmaktadır. Mermerin nispeten yumuşak kalsitten meydana gelmesi, cilalanabilirliğini diğer doğal taşlara kıyasla öne çıkaran en önemli ticari avantajlardan biri olarak değerlendirilmektedir (Huang vd. 2024).

Cilalama işlemi, genellikle taşlanmış veya honlanmış bir yüzeyden başlamakta ve standart bir sırayı takip etmektedir (Resim 2.2). Testere izlerinin giderilmesi ve levhanın düzeltilmesi için 24–60 grit aralığındaki kaba aşındırıcılarla gerçekleştirilen taşlama sonrasında, yüzey 120, 220, 400 ve 800 grit gibi orta ve ince aşındırıcılarla daha ileri düzeyde işlem uygulanmaktadır. Bu aşamada yüzey genellikle honlanmış olarak tanımlanmakta; düz, pürüzsüz ve mat bir görünüme sahip olup düşük parlaklık göstermekte ve yalnızca küçük ölçekli mikro çizikler içermektedir. Parlatma sırasında, otomatik çok başlıklı parlatma makinelerindeki döner kafalara monte edilmiş çok ince silisyum karbür, alümina veya elmas aşındırıcılar kullanılmaktadır (Çetintaş 2025).

Parlatma aşamasında kullanılan aşındırıcıların tane boyutları, kullanılan ekipman ve hedeflenen yüzey özelliklerine bağlı olarak genellikle 800–3000 aralığında olup; bazı durumlarda ise daha yüksek değerlere kadar değişiklik göstermektedir. Kafalar,

konveyör bantta ilerleyen levhalar üzerinde hareket etmekte olup; kafa basıncı, dönüş hızı, besleme hızı ve soğutma suyu akışı gibi işlem parametreleri, malzemenin homojen biçimde uzaklaştırılmasını sağlanması ve aşırı ısınma, yanma ya da lokal yüzey hasarını önlemek amacıyla titizlikle kontrol edilmektedir (Çetintaş 2025).



Resim 2. 2 Çok başlıklı cila makinesi a) Cila makinesi b) Aşındırıcı başlık c) Aşındırıcı (Çetintaş 2025).

Literatürde, cilalama sürecinin aşamalı ve kümülatif bir karaktere sahip olduğu vurgulanmaktadır. Her ince aşındırıcı tanecik, bir önceki taneciğin yüzeyde bıraktığı izleri gidermelidir. Aşamaların atlanması veya yetersiz uygulanması, özellikle yüksek parlaklık düzeylerinde kalıcı çiziklerin oluşmasına neden olmaktadır (Çetintaş 2025).

Granit veya daha sert taşlarla karşılaştırıldığında, mermer cilalamanın ayırt edici özelliği son aşamalarda kimyasal-mekanik etkileşimin belirgin biçimde rol

oynamasıdır. Mekanik aşındırmanın ötesinde, mermer cilama sürecinde genellikle oksalik asit veya oksalat tuzlarına dayalı, kimi zaman alüminyum oksit ya da diğer mineral katkıları içeren özel cilalama tozları ve bileşikleri kullanılmaktadır.

Keçe veya özel cilalama pedleriyle basınç ve su ile birlikte uygulanması durumunda, oksalik asit yüzeydeki kalsit ile kimyasal reaksiyona girmekte ve orijinal kalsit yüzeyine kıyasla daha kompakt ve nispeten daha sert ince bir kalsiyum oksalat tabakası oluşturmaktadır. Bu reaksiyon tabakası, mikro düzeydeki yüzey kusurlarını doldurarak mikrotopografiyi düzleştirmekte ve ışık yansımaları artırmaktadır. Böylece cilalı mermerde ayna benzeri parlaklık ortaya çıkmaktadır (Menningen vd. 2021).

Bazı ürünler “kristalleştirici” olarak pazarlanmakta ve bakım cilaması amacıyla kullanılmaktadır. Bu ürünler, mermer yüzeyi ile asidik ya da florlu bileşikler arasındaki kimyasal etkileşimlere dayanarak, yüzeyde sert ve yüksek parlaklık özellikleri gösteren ince bir mikro tabaka oluşturmaktadır. Literatürde, bu reaksiyon tabakasının kalınlığının mikrometre düzeyinde son derece küçük olduğu, buna karşın optik ve mekanik etkilerinin yüzey özellikleri üzerinde orantısız derecede güçlü bir rol oynadığı vurgulanmaktadır (Menningen vd. 2021).

Aşındırıcı tipinin seçimi önemli bir parametre olarak değerlendirilmektedir. Geleneksel parlatma işlemlerinde magnezit veya reçine bağlayıcı silisyum karbür aşındırıcılar kullanılmakta iken, modern serilerde daha yüksek kesme verimliliği, daha uzun kullanım ömrü ve daha kararlı performans sağlamaları nedeniyle elmas aşındırıcılar giderek daha yaygın biçimde tercih edilmektedir (Çetintaş 2025).

Mermer parlatmada, metal bağlayıcı elmas takımlar genellikle erken taşlama aşamalarında kullanılırken, reçine bağlayıcı elmas aşındırıcılar daha ince adımlarda ve ön parlatmada kullanılmaktadır. Bu elmas takımlar, daha tutarlı çizik desenlerinin elde edilmesini, kazıma oranlarının daha iyi kontrol edilmesini ve büyük ölçekli endüstriyel üretim açısından önemli olan daha düşük takım aşınmasının sağlanmasını mümkün kılmaktadır (Çetintaş 2025). Ancak mermer nispeten yumuşak olduğundan, elmas

aşındırıcıların derin çizikler veya mikro çatlaklar oluşturmaması için işlem parametrelerinin titizlikle kontrol edilmesi gerekmektedir.

Çalışmalar, aşırı basınç, yetersiz soğutma veya çok kaba elmas taneciklerinin kalsit tanelerinde yeni mikro çatlakların oluşmasına neden olabildiğini ve bunun sonucunda eğilme dayanımının olumsuz etkilenecek malzemenin ilerleyen süreçlerde bozulmalara karşı daha duyarlı hâle geldiğini göstermektedir (Huang vd. 2024). Bu nedenle, verimlilik ile nihai kalite arasında denge sağlanabilmesi amacıyla basınç, hız ve tanecik dizisinin optimize edilmesi büyük önem taşımaktadır.

Parlatma performansı, mineraloji, tane boyutu, gözeneklilik ve mikro çatlak yoğunluğu gibi mermerin içsel özelliklerine büyük ölçüde bağlıdır. İnce taneli ve homojen beyaz mermerlerin (örneğin klasik kalsitli mermerler), küçük ve düzgün kristal yapıları pürüzsüz bir yüzey ve düzgün yansıma sağladıkları için çok yüksek parlaklığa ulaşılması açısından daha elverişli olduğu bildirilmektedir. Buna karşılık iri taneli mermerler veya belirgin damarlanma ile mineralojik kontrast içeren türler (mika, kuvars, demir oksit vb.), farklı cilalama davranışları sergileyebilmektedir. Yumuşak kalsit bölgeleri hızla aşındırılırken, daha sert veya kırılkan fazlar yüzeyde hafif çıkıntılı kalabilmekte veya parçalanabilmektedir. Bu durum, yüzeyde lokal düzensizliklere ve “portakal kabuğu” benzeri dokuların oluşmasına yol açabilmektedir (Huang vd. 2024).

Çok çatlaklı veya damarlı mermerler de reçine ile yeterince doldurulmamışlarsa parlatma sırasında mikro çatlaklar ve gözenekler ortaya çıkarabilmektedir. Bu nedenle, reçine emdirme ve dolgu işlemleri çoğunlukla genel cilalama sürecine entegre edilmektedir. Bu aşamada levhalar önce honlanmakta, ardından vakum altında polyester veya epoksi reçine emdirilmekte; kürlleme işlemi gerçekleştirilmekte ve sonrasında yüzey yeniden taşlanarak nihai cilalama uygulanmaktadır. Reçine, damarları, boşlukları ve mikro çatlakları doldurarak yerel mekanik desteği artırmakta ve yüzeyin homojen yapıda, yüksek parlaklık düzeyinde cilalanmasını mümkün kılmaktadır. Literatürde, reçine ile işlenmiş levhaların genellikle aynı taşın işlenmemiş levhalarına göre daha yüksek eğilme mukavemeti ve daha yüksek seviyede yüzey yansıtıcılığı sergilediği bildirilmektedir (Urbanek vd. 2025).

Proses kontrolü açısından, cilalama işlemiyle ilişkili çok sayıda kusur ve kalite sorunu tanımlanmaktadır. Bunlar arasında, önceki aşındırma adımlarına ait izlerin yeterince giderilememesinden kaynaklanan kalıntı çizik desenleri; uygunsuz ped hareketi veya yüzey/ped kirlenmesi sonucu oluşan hologram benzeri girdap izleri; düzensiz basınç dağılımı ya da tutarsız aşındırıcı aşınmaya bağlı portakal kabuğu dokuları; aşırı ısınmanın yol açtığı yanma veya renk değişimleri ile kimyasal ya da mekanik etkinliğin yetersiz kaldığı lokal donuk bölgeler yer almaktadır. Endüstriyel uygulamada, bu sorunlar makine ayarlarının dikkatli bir şekilde yapılması, düzenli takım bileme ve değiştirme, doğru kum sıralaması ve suyla yeterli yağlama/soğutma ile hafifletilebilmektedir. İşlem suyu kalitesi de cilalama sürecinde kritik bir rol oynamaktadır (Huang vd. 2024).

Yüksek sertlik derecesi, askıda bulunan katı maddeler veya kimyasal kirleticiler hem aşındırıcıların performansını hem de cila tozlarının mermer yüzeyle olan etkileşimini olumsuz yönde etkileyebilmektedir. Çevresel etkiyi azaltmak amacıyla geri dönüştürülmüş işlem suyu sıklıkla tercih edilmektedir. Ancak bu suyun levha yüzeyinde çiziklere yol açabilecek ince parçacıkların yeniden birikmesini engellemek için uygun şekilde filtrelenmesi ve arıtılması gerekmektedir (Huang vd. 2024).

Cilalama kalitesi, aletli ölçümler ile görsel incelemenin birleştirilmesiyle değerlendirilmektedir. Aletli ölçümlerde, parlaklık ölçerler önceden belirlenmiş açılarda (genellikle 60° veya 20°) aynasal yansımanın belirlenmesi amacıyla kullanılmakta ve yüksek kaliteli cilalı mermer yüzeyler, taş türüne bağlı olarak genellikle 80°–90° parlaklık biriminin üzerinde değerler sergilemektedir (Huang vd. 2024).

Yüzey pürüzlülüğü, temaslı veya temassız profilometreler kullanılarak ölçülebilmekte; cilalı mermer genellikle çok düşük Ra değerleri (çoğunlukla 0,1–0,3 μm 'nin altında) göstermektedir. Bazı çalışmalar ise mikrotopografiyi incelemek, mikro çatlakları veya çekilmeleri tespit etmek ve oksalik asit cilalamasıyla oluşan reaksiyon katmanını karakterize etmek amacıyla optik veya SEM tabanlı mikroskobik analizlerden yararlanmaktadır (Huang vd. 2024).

Görsel inceleme, düzensiz parlaklık, renk farklılıkları, reçine doldurulmuş alanların çevresinde oluşan haleler ve levhalar arasındaki estetik tutarlılığı tespit etmek açısından hâlen önemli bir yöntem olarak değerlendirilmektedir (Çetintaş 2025).

Döşeme ve diğer işlevsel yüzeylerde cilalama, kayma direnci açısından da dikkate alınmalıdır. Yüksek cilalı mermer, estetik açıdan çekici olmakla birlikte özellikle ıslakken kaygan olabilmektedir. Bu nedenle tasarımcılar, yoğun trafikli veya ıslak alanlarda honlanmış veya dokulu yüzeyler tercih edebilmektedir (Laskaridis vd. 2021).

Son yıllarda yapılan araştırmaların performans, sürdürülebilirlik ve dayanıklılığı artırmayı hedefleyen yenilikçi parlatma yaklaşımlarına yöneldiği görülmektedir. Bir diğer önemli araştırma alanı, güçlü asitlerin ve zararlı kimyasalların kullanımını azaltarak veya tamamen ortadan kaldırarak yüksek parlaklık ve yüzey koruması sağlayabilen çevre dostu parlatma bileşiklerinin geliştirilmesidir. Bu yaklaşım, iş güvenliği ve çevresel sürdürülebilirlik açısından cilalama teknolojilerinde önemli bir ilerleme olarak görülmektedir (Huang vd. 2024).

Diğer bir araştırma alanı, nanopartiküllerin (örneğin nano-SiO₂, nano-TiO₂) parlatma süspansiyonlarına veya yüzey işlemlerine dahil edilerek mikro dolguyu, yüzey sertliğini ve leke ile hava koşullarına karşı direnci artırmayı amaçlayan nano-modifiye parlatma sistemleridir. Bu nano yapıları katmanlar, potansiyel olarak mikro pürüzlülüğü azaltmakta ve mikro kusurları kapatabilmektedir (Xie vd. 2021). Ayrıca, robotik ve CNC tabanlı parlatma sistemlerinin entegrasyonu, temas basıncı, işlem yolu ve bekleme süresinin daha hassas şekilde kontrol edilmesini sağlayarak, karmaşık geometrilere sahip yüzeylerin (kenarlar, kavisli alanlar, heykeller) daha az el işçiliği ile tutarlı bir şekilde parlatılmasını mümkün kılmaktadır (Huang vd. 2025).

2.3.2 Honlama

Honlama, mermer levha ve fayans üretiminde kullanılan en önemli ara ve son yüzey bitirme işlemlerinden birisi olarak görülmektedir. Literatürde honlama, genellikle orta-ince aşındırıcı tanecikler kullanılarak homojen dokuya sahip, pürüzsüz, düz, mat veya

düşük parlaklıkta bir yüzey oluşturmak için yapılan mekanik bir aşındırma işlemi olarak tanımlanmaktadır. Cilalama işlemi, ayna benzeri bir yansıma elde etmeyi hedeflerken; honlama ise yüzey parlaklığını azaltarak doğal rengi zenginleştiren, yansımayı ve kayma riskini düşüren saten bir yüzey oluşturmaktadır. Bu özellikleri nedeniyle honlama, estetik ve güvenlik arasında bir dengenin gerekli olduğu konut ve ticari zemin kaplamalarında, merdivenlerde, duvar kaplamalarında, cephe elemanlarında, mutfak tezgahlarında ve mimari bileşenlerde yaygın olarak uygulanmaktadır (Çetintaş 2025).

Literatürde honlama, boyutsal doğruluğun sağlanması, yüzey dokusunun kontrol edilmesi, renk ifadesinin optimize edilmesi ve sonraki işlemlerin (reçine uygulamaları, sızdırmazlık maddeleri veya kaplamalar) etkin performans gösterebilmesi açısından kritik bir işlem basamağı olarak vurgulanmaktadır (Çetintaş 2025).

2.3.2.1 Honlama İşleminin Aşındırıcı Niteliği

Honlama genellikle taşlama işleminden sonra ve gerekirse son cilalamadan önce parlak bir yüzey elde edilmesi hedeflendiğinde uygulanmaktadır (Buj-Corral vd. 2019). Kaba taşlama aşaması, testere izlerinin giderilmesi ve levhanın yüzey düzlüğünün sağlanması amacıyla gerçekleştirilmektedir. Bu ön hazırlık sonrasında uygulanan honlama işleminde ise, kullanılan taşın türü, makine konfigürasyonu ve hedeflenen yüzey özellikleri dikkate alınarak yaklaşık 120-800 grit aralığında değişen aşındırıcı tanecikler tercih edilmektedir (Biradar ve Katikar 2018).

Aşındırıcılar (silisyum karbür, alümina, reçine bazlı elmas segmentler vb.), çok başlıklı veya tek başlıklı köprülü honlama makinelerinde dönen kafalara monte edilmektedir (Buj-Corral vd. 2019). Honlama, kaba taşlamadan kalan ince çizikleri ortadan kaldıran ve ışığın yoğun yansımaları engelleyecek kadar küçük mikro çizikler bırakan kontrollü bir aşındırma işlemidir. Bu mikro doku, mermerin doğal damarlarını parlamaya yol açmadan yansıtarak yumuşak ve dağınık bir görsel etki oluşturmaktadır (Çetintaş 2025).

Honlama sırasında soğutma, yağlama ve bulamacın uzaklaştırılması için genellikle su kullanılmaktadır. Aşındırıcı parçacıkların kalsit mikro yapısıyla etkileşimi, oksalik asit

reaksiyonlarına dayalı kimyasal cilalamadan farklı olarak, mekanik bir işlem olarak gerçekleşmektedir (Çetintaş 2025). Kalsitin, yumuşak ve kolay çizilebilen bir malzeme olması nedeniyle derin çiziklerin, mikro kırılmaların veya yüzeyde morarmaların oluşmasını önlemek için honlama sürecinin dikkatle yapılması gerekmektedir (Deniz ve Polat 2020). Literatürde, honlamanın taşlamaya kıyasla daha düşük temas basıncı ve homojen aşındırıcı dağılımı gerektirdiği vurgulanmaktadır. Bu durum, yüzeyde lokal parlaklık veya pürüzlülük farklılıkları oluşmadan mat bir yüzey elde edildiğini göstermektedir (Çetintaş 2025).

2.3.2.2 Honlamanın Mermer Üzerindeki Mikroyapısal Etkileri

Honlama, mermer yüzeyinin mikroyapısal özelliklerinde önemli bir etki göstermektedir. Profilometri, optik mikroskopi ve taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile yapılan çalışmalarda, honlanmış mermer yüzeylerin tane sırasına ve taş türüne bağlı olarak 0,3–1,0 μm aralığında ortalama pürüzlülük (R_a) değerleri gösterdiği ve azalan bir pürüzlülük gradyanı sergilediği tespit edilmiştir (Bodi vd. 2023). Honlama işlemi uygulanmış yüzeyler, taşlama yapılmış yüzeylere kıyasla daha pürüzsüz olmakla birlikte, cilalı yüzeylerden (genellikle $R_a < 0,1 \mu\text{m}$) daha fazla pürüzlü kalmaktadır. Bu ara pürüzlülük düzeyi; leke emilimi, parlaklık, temizlenebilirlik, bakteri tutunması ve kayma direnci gibi birçok işlevsel özelliği doğrudan etkileyebilen bir durum olarak görülmektedir (Avdelidis vd. 2004).

Mermerin doğasından kaynaklanan veya işleme sürecinde oluşan mikro çatlaklar, genellikle honlama aşamasında daha görünür hale gelmektedir. Mikro kusurları kimyasal-mekanik reaksiyonlar ve yansıtıcı kompakt katmanlarla gizleyebilen yüksek parlaklıktaki cilalama işleminin aksine honlama, taşın gerçek topoğrafisini açığa çıkaran bir yüzey işlemi olarak kabul edilmektedir. Bu sebeple honlama; reçine dolgusu, çatlak onarımı veya ilave yüzey işlemlerine duyulan ihtiyacı belirleyen bir ön inceleme safhası olarak değerlendirilmektedir. Birçok mermer türünde honlama sürecinden önce reçine emdirmesi işlemi gerçekleştirilmektedir. Bu yöntem, doldurulan çatlakların yüzeyle aynı hızda olmasını sağlamakta ve sonraki süreçlerde oluşabilecek aşınmalara karşı yüksek bir dayanım göstermesini teşvik etmektedir (Vrochidou vd. 2022).

2.3.2.3 Honlamanın Estetik ve İşlevsel Özelliklere Etkileri

Literatürde honlama, cilalı ve dokulu yüzeylerden ayrılan özgün estetik özelliklere sahip bir yüzey olarak değerlendirilmektedir. Honlanmış bir mermer yüzey, taşın doğal rengini korurken daha az ışık yansıtmakta ve böylece taşa daha çağdaş ve sade bir görünüm kazandırmaktadır. Honlama, cilalama ile oluşan yansıtıcı tabakayı ortadan kaldırdığı için, algılanan renk genellikle daha açık ve daha homojendir. Böylece damarlanma daha ince görünmekte ve taşın dokunsal özellikleri daha belirgin hâle gelmektedir (Huang vd. 2024).

İşlevsel açıdan honlama, kayma direncinde belirleyici bir rol oynamaktadır. Yapı malzemeleri üzerine yapılan çok sayıda çalışma, honlanmış yüzeylerin özellikle ıslak koşullarda cilalı yüzeylere kıyasla daha yüksek kayma direncine sahip olduğunu ortaya koymaktadır (Sarıışık vd. 2011). Bu özellik, honlanmış yüzeyleri yoğun trafiğe sahip iç mekânlar, kamusal yürüyüş alanları, banyolar, ticari zeminler ve neme maruz kalabilecek bölgeler için tercih edilir hale getirmektedir.

Bununla birlikte, mikrotopografyanın safsızlıkları cilalı yüzeylere kıyasla daha kolay tutması nedeniyle honlanmış yüzeyler daha yüksek leke Emilimi gösterebilmektedir. Bu nedenle honlanmış mermer, genellikle nüfuz eden sızdırmazlık maddeleri, hidrofobik işlemler, floropolimer kaplamalar veya nano-modifiye yüzey koruyucularla birlikte kullanılmaktadır.

2.3.2.4 Honlama Kalitesini Etkileyen İşlem Değişkenleri

Gelişmiş endüstriyel honlama hatları, tutarlı kaliteyi sağlamak amacıyla otomasyon, servo kontrollü basınç düzenlemesi ve adaptif geri bildirim sistemleri kullanılmaktadır. Taş işleme otomasyonu üzerine yapılan literatür çalışmaları, yeni CNC honlama sistemlerinin özellikle homojen yüzey kalitesinin kritik olduğu yüksek değerli mermerlerde daha yüksek tekrarlanabilirlik ve hassasiyet sunduğunu ortaya koymaktadır (Huang vd. 2025). Honlanmış bir mermer yüzeyin kalitesi çeşitli işlem değişkenlerine bağlıdır:

- Aşındırıcı tane seçimi ve sıralaması; tane boyutundaki aşırı değişiklik, son finisajdan sonra dahi görülebilen çiziklere yol açabilmektedir. Ayrıca orta taneli zımparalarda yetersiz aşındırma süresi, mat dokunun homojenliğini bozmakta ve yüzey kalitesini olumsuz etkilemektedir (Sender ve Buj-Corral 2023).
- Temas basıncı ve makine konfigürasyonu; aşırı basınç yeni mikro çatlaklara yol açabilmekte veya yumuşak damarların düzensiz biçimde ortaya çıkmasına neden olabilmektedir. Buna karşılık yetersiz basınç, önceki zımpara çiziklerinin tamamen giderilememesiyle sonuçlanmaktadır (Sender ve Buj-Corral 2023).
- Su akış hızı; soğutarak termal hasar riskini azaltmakta ve bulamacın taşınmasına yardımcı olarak yüzeyin yeniden çizilmesini önlemektedir (Rezaei vd. 2024).
- Besleme hızı ve kafa dönüş hızı; yüksek besleme hızları aşınmayı azaltmakta ve düzensiz mat görünüm riskini artırmaktadır. Düşük hızlar yüzey düzgünlüğünü iyileştirmekte ancak üretim verimliliğini düşürmektedir (Rezaei vd. 2024).
- Taş mineralojisi ve tane boyutu; iri taneli mermerler düzensiz honlama desenleri sergilemektedir. Yüksek oranda mika, kuvars veya serpantin içeren mermerler özel olarak ayarlanmış zımpara dizilerini gerektirebilmektedir (Huang vd. 2024).

2.3.2.5 Honlanmış ve Cilalanmış Yüzeylerin Karşılaştırılması

Çeşitli çalışmalar, yüksek kaliteli sızdırmazlık maddeleri veya nano-hidrofobik kaplamalarla işlenmiş honlanmış mermerin, üstün kayma direncini korurken (Hashim vd. 2024) cilalı mermerin leke direncine yaklaşabildiğini göstermektedir (Sarıışık vd. 2012). Önemli sayıda araştırma, honlanmış ve cilalanmış yüzeyleri mekanik, işlevsel ve estetik performans açısından karşılaştırmaktadır. Temel bulgular şu şekildedir:

- Cilalı yüzeylerde yüksek parlaklık, düşük pürüzlülük ve güçlü renk ifadesi sunmakla birlikte asit aşındırmalarına karşı daha hassas ve belirgin şekilde daha kaygan olabilmektedir (Bodi vd. 2023).
- Honlanmış yüzeylerde orta düzeyde pürüzlülük, daha yumuşak bir görünüm ve gelişmiş kayma direnci sunarken, lekelenmeyi önlemek amacıyla daha yoğun bakım gerektirebilmektedir (Bodi vd. 2023).

- Honlanmış yüzeyler, parlaklık kaybının zamanla daha az hissedilmesi sayesinde cilalı yüzeylere göre daha homojen bir yaşlanma sağlamaktadır (Çetintaş 2025).
- Honlanmış yüzeyler, UV ışınlarına maruz kalma veya çevresel aşınma sonucu parlaklıklarında bozulma yaşamadıklarından, dış mekân uygulamaları için daha uygun kabul edilmektedir (Çetintaş 2025).

2.3.3 Fırçalama

Fırçalama, antika cila, deri cila, antika fırçalama veya fırçalanmış dokulu cila olarak da adlandırılan bir yöntem olup, mermer üzerinde yumuşak, dokunsal ve hafif dokulu bir yüzey oluşturmak için kullanılan modern bir yüzey işlemidir. Pürüzsüzlük veya parlaklık elde etmeye dayanan geleneksel cilalı veya honlanmış yüzeylerin aksine, fırçalama taşın doğal kabartısını ve mineralojik dokusunu ön plana çıkarmaktadır (Çetintaş 2025). Bu işlem, daha yumuşak mineralleri hızlı biçimde aşındırırken daha sert damarları ve doğal yüzey düzensizliklerini koruyan aşındırıcılarla kaplı döner fırçaların hareketiyle gerçekleştirilmektedir. İşlemin sonucunda, çağdaş iç mekân tasarımı ve mimari uygulamalarda yoğun ilgi gören hafif pürüzlü, deri benzeri bir yüzey dokusu oluşmaktadır.

Fırçalama işlemi, mermer yüzey üzerinde dönen aşındırıcı naylon fırçalar ile karbür veya elmas katkılı fırçaların kullanımını içermektedir (Huang vd. 2024). Bu fırçalar, farklı kum boyutlarında üretilmekte olup genellikle 36-600 kum aralığında değişebilmektedir (Dudhal ve Khadke 2023). İşlem, otomatik çok başlıklı cilalama hatlarında veya tek başlıklı köprü makinelerinde uygulanmaktadır.

Taş işleme araştırmalarında belirtildiği üzere, fırçalama seçici bir aşındırma yöntemidir; yumuşak kalsit taneleri, değişmiş yüzeyler ve aşınmış katmanlar hızla giderilirken kuvars, dolomit veya mika gibi daha sert mineraller daha belirgin kalmaktadır. Doğal çöküntüler, gözenekler ve damarlar düzleştirme yerine hafifçe yuvarlatılmaktadır. Sonuç olarak, düşük parlaklık fakat yüksek dokunsal zenginlik sergileyen ve taşın doğal yapısını honlanmış veya cilalanmış yüzeylere kıyasla daha net ortaya çıkaran bir yüzey elde edilmektedir (Huang vd. 2024).

Mekanik etki, düşük temas basıncı ile yüksek frekanslı fırçalama yöntemini birleştirerek taş yüzeyinin mikro düzeyde kontrollü bir şekilde temizlenmesini sağlamaktadır (Huang vd. 2024). Su veya su bazlı bulamaçla yağlama, aşırı ısınmayı önlemekte ve ince parçacıkların giderilmesine yardımcı olmaktadır (Alves vd. 2021). Literatürde, fırçalamanın doğru şekilde uygulandığında mikro çatlaklara veya termal hasara yol açmadığı, bu nedenle aşırı ısıya ya da agresif taşlamaya duyarlı mermerler için uygun olduğu vurgulanmaktadır (Çetintaş 2025).

Fırçalanmış yüzeyler, pürüzsüz mimari yüzeyler ile pürüzlü kaymaz dokular arasında ara bir kategoridir. Literatürde bu yüzeyler, mermer türüne bağlı olarak genellikle <10–15 parlaklık birimiyle düşük ila sıfır parlaklık ve fırçalama kumuna bağlı olarak 1–5 µm aralığında Ra değerleriyle orta düzeyde pürüzlülük şeklinde tanımlanmaktadır. Dalgalı mikro rölyefli yuvarlak yüzey topografyası, genellikle "yumuşak", "kösele" veya "eskitleme" olarak tanımlanan gelişmiş dokunma hissiyle birlikte, gözeneklerde, mikro çatlaklarda ve tane sınırlarında yumuşatılmış kenarlar oluşturmaktadır. Bu işlem, doğal desenlerin ve fosillerin derinlik algısını artırarak, taş yüzeyinin estetik ve dokusal zenginliğini vurgulamaktadır (Sanmartin vd. 2011).

Fırçalama, yansıma etkisinden çok dokusal estetiği geliştirdiği için modern iç mekân döşemelerinde, mutfak tezgâhlarında, banyo duvarlarında, merdiven basamaklarında ve mobilya yüzeylerinde yaygın olarak tercih edilmektedir (Singh 2025). Bununla beraber, parmak izlerini, küçük çizikleri ve yüzey aşınmalarını yüksek yansıtıcı cilalı yüzeylere kıyasla daha etkili biçimde gizleyen bir yüzey oluşturmaktadır (Kandi vd. 2022).

Araştırmalar, fırçalanmış yüzeylerin kalitesini ve tutarlılığını belirleyen çeşitli temel parametreleri ortaya koymaktadır. Kaba fırçalar (36–60 kum) doğal dokuları açarak rölyefi güçlendirirken, orta boy fırçalar (120–240 kum) yüzey düzensizliklerini gidermektedir. İnce fırçalar (320–600 kum) ise kenarları yumuşatarak nihai pürüzsüz hissi sağlamaktadır. Kum sıralamasının atlanması düzensiz dokuya yol açabilmekte; aşırı ince kum kullanımı ise istenen rölyefi azaltabilmektedir. Uygulanan basınç da belirleyici olup, yüksek basınç rölyef derinliğini artırırken aşırı doku oluşumuna neden olabilmektedir. Düşük basınç ise özellikle tezgâh uygulamaları için uygun, ince bir deri

efekti vermektedir. Doğru yağlama, aşınmanın dengeli gerçekleşmesini ve fırça tıkanmasının önlenmesini sağlarken, yetersiz su kullanımı çizgi oluşumuna veya aşırı ısınmaya yol açabilmektedir. Ayrıca iri taneli mermerler, fırçalama işleminden sonra daha çarpıcı ve belirgin dokular sergilemektedir (Çetintaş 2025).

Dolomit mermerler, genellikle daha canlı ve ince dokuların oluşumuna eğilim göstermektedir. Bol miktarda mika veya kuvars içeren mermerler, fırçalama sonrasında kabartmada belirgin ve güçlü bir kontrast sergilemektedir (Cevheroğlu Çıra vd. 2018). Literatürde, fırça seçiminin mermerin sertlik derecesine göre yapılması gerektiği vurgulanmaktadır. Daha yumuşak mermerler, istenmeyen çukurlaşmayı önlemek amacıyla daha nazik aşındırıcıların kullanılmasını gerektirir (Güneş ve Gökten 2023).

Fırçalanmış yüzeyler, çeşitli performans özelliklerini önemli ölçüde etkilemektedir. Özellikle ıslak koşullarda, fırçalanmış mermer cilalı yüzeylere kıyasla daha yüksek kayma direnci göstererek otel lobileri, banyo zeminleri, mutfak yüzeyleri, dış mekân terasları, havuz çevresi ve diğer yüksek trafik alanları gibi kayma riskinin yüksek olduğu mekânlarda güvenli bir seçenek sunmaktadır. Bunun yanı sıra, fırçalanmış yüzeylerin dokusal yapısı lekelerin ve çiziklerin görünürlüğünü azaltarak estetik ve fonksiyonel niteliği artırmaktadır. Bu nedenle güvenlik ve uzun ömürlülük açısından fırçalanmış mermer uygulamaları yoğun kullanıma maruz kalan alanlarda tercih edilmektedir. Ancak, yüzey performansının ve görünümünün korunabilmesi için bakım ve temizliğin kritik öneme sahip olduğu belirtilmektedir (Cevheroğlu Çıra vd. 2018).

Birçok tribolojik çalışma, fırçalanmış yüzeylerin mikro kabartma yapısı sayesinde daha yüksek dinamik sürtünme katsayılarını korurken, aynı zamanda ayak altı konforunu da sağladığını ortaya koymaktadır (Chen ve Tang 2024). Daha pürüzlü dokular, yüzey alanını ve mikro boşlukları artırarak honlanmış veya cilalanmış mermerlere kıyasla leke emilimini potansiyel olarak yükseltmektedir (Braun vd. 2025). Bu nedenle, literatürde genellikle nüfuz eden sızdırmazlık maddelerinin (silan/siloksan), floropolimer bazlı hidrofobik işlemlerin ve kir tutmazlık amacıyla kullanılan nano kaplamaların uygulanması önerilmektedir. Bu işlemler, yüzeylerin temizlenebilirliğini ve uzun süreli dayanıklılığını artırmaktadır (Armal vd. 2023).

Fırçalanmış yüzeyler, gözle görünür şekilde aşınmaya karşı üstün direnç göstermektedir. Bu durum, zamanla matlaşan parlaklık tabakasından yoksun olmaları, küçük aşınmaların mevcut rölyefle doğal biçimde bütünleşmesi ve yüzeyin cilalı mermerlere kıyasla daha homojen bir şekilde eskimesinden kaynaklanmaktadır (Chen ve Tang 2024). Bu nedenle, fırçalanmış mermer, bakım kolaylığı açısından en uygun yüzey kaplamalarından biri olarak değerlendirilmektedir (Braun vd. 2025).

Antik fırçalanmış yüzeylerin, doğal görünümü ve dokunma konforu nedeniyle modern mimaride hızla popülerlik kazandığı belirtilmektedir (Singh 2025). Literatürde, fırçalanmış yüzeylerin mimari açıdan sunduğu birçok avantaj vurgulanmaktadır. Bu yüzeyler, kireçtaşı ve mermerin doğal fosil desenlerini öne çıkarırken ışığı yumuşak biçimde yansıtarak sıcak ve organik bir atmosfer oluşturmaktadır.

Fırçalanmış mermer, metal, ahşap ve mat seramik yüzeylerle uyumlu bir kombinasyon sunmaktadır. Günlük kullanım için yeterince pürüzsüz kalmasına rağmen rustik veya doğal taş görünümü sağlayarak estetik çeşitlilik oluşturmaktadır. Bu özellikleri nedeniyle mutfak ve banyo tezgâhlarında, oturma odası döşemelerinde, dış mekân yollarında, perakende satış ortamlarında, otellerde, spalarda, özel duvarlarda, şöminelerde ve ayrıca galeriler ile kültürel mekânlarda yaygın olarak tercih edilmektedir. Estetik görünümü ve dayanıklılığı sayesinde fırçalanmış yüzeylerin hem fonksiyonel hem de dekoratif uygulamalarda kullanımı artmaktadır (Kamal vd. 2024).

Nanopartiküller, mikro kabartmalı yüzeylere daha etkin nüfuz ederek artan özgül yüzey alanı sayesinde mekanik kilitlemeyi güçlendirmektedir. Cilalama sırasında kaplamaların uzaklaştırılmaması nedeniyle fırçalanmış yüzeyler, nano kaplamaları daha uzun süre koruma eğilimi göstermektedir. Bu bağlamda, mermer için nano özellikli mineral dolguların geliştirilmesinde fırçalanmış yüzeyler; yapışma, penetrasyon ve performans değerlendirmeleri açısından en uygun yüzey koşullarını sunmaktadır (Xie vd. 2021).

Fırçalanmış yüzeylerin avantajlarıyla birlikte, bazı sınırlamaları bulunmaktadır. Sızdırmazlık sağlanmadığında lekelenme riski artmakta, yüzeyin derin dokuları toz birikimine yol açmaktadır. Ayrıca, yüksek yansıtma veya homojen parlaklık gerektiren

uygulamalar için uygun olmadığı belirtilmektedir. Daha derin dokuların da özellikle ticari mutfaklarda temizlik sürecini zorlaştırdığı vurgulanmaktadır (Lisci vd. 2023).

2.3.4 Alevleme

Alevleme, taş levha yüzeyine yüksek sıcaklıkta alev uygulanarak pürüzlü, aşınmış ve kaymaz bir doku elde edilmesini amaçlayan bir yüzey işlemidir. Literatürde, alevli veya termal yüzey işlemi olarak da adlandırılan bu yöntem, ıslak taş yüzeyine yönlendirilen oksijen-asetilen veya oksijen-propan meşaleleriyle uygulanmaktadır. Oluşan ani termal şok, yüzey tabakasında genleşme, çatlama ve parçalanma yaparak, doğal aşınmayı andıran engebeli ve kristal bir yüzey topoğrafyası oluşturmaktadır (Lobarinhas vd. 2024).

Alevle sertleştirme, kayma direnci ve hava koşullarına dayanıklılığın kritik olduğu kaldırım taşları, dış basamaklar ve kamusal alanlarda, özellikle granit ve diğer çok sert taşlar için standart bir yüzey işleme tekniği olarak kabul edilmektedir (Sudoł vd. 2021).

Çok sert kireçtaşlarının ve sınırlı bir mermer grubunun alevle sertleştirmeye uygun olduğu kabul edilmektedir. Birçok kaynak, alevle sertleştirmenin granit kaplamalar için geliştirilen bir yöntem olduğunu, kalsitin daha düşük termal kararlılığı ve farklı ayrışma davranışı nedeniyle genel olarak mermerde uygun olmadığını belirtmektedir. Bununla birlikte, bazı kaynaklarda dış mekân döşemeleri ve eşikler için “alevle işlenmiş mermer” ifadesine yer verilmekte; bu da yöntemin belirli mermer türlerine deneysel veya seçici olarak uygulandığını göstermektedir. Literatürün büyük kısmı granit üzerine yapılan çalışmalardan oluşmakla birlikte; bazı ilkeler, faydalar ve riskler sınırlamaları açıkça kabul edilerek mermer için de genelleştirilebilmektedir (Grzesik vd. 2021).

2.3.4.1 Alevli Cilalamanın Mekanizması ve Mermerle İlişkisi

Alevlemenin temel mekanizması, taşıdaki minerallerin farklı termal genleşme davranışına dayanmaktadır. Granitlerde kuvars, feldispat ve mika gibi minerallerin farklı termal genleşme katsayılarına sahip olduğu belirtilmektedir. Islak bir yüzey çok sıcak bir aleve maruz kaldığında bu mineraller farklı hızlarda genişip büzülerek yüksek

gerilimler oluşturmaktadır. Bu gerilimler dış tabakanın çatlamasına ve dökülmesine yol açarak kayma direncini önemli ölçüde artıran makroskobik olarak pürüzlü ve mikro çatlaklı bir yüzey meydana getirmektedir (Cui vd. 2025).

Mermer, nispeten homojen bir mineralojiye sahip olup kalsit veya dolomit tarafından domine edilmektedir. Kalsit, termal açıdan daha hassas bir mineral olduğundan yüksek sıcaklıklarda CaO ve CO₂'e ayrışmaya başlamakta ve termal şok altında hızla mikro çatlaklar geliştirmektedir (Feng vd. 2022). Sonuç olarak, birçok uzman alevle kaplamanın yalnızca granit üzerinde gerçekleştirilebileceğini veya esas olarak granit ile birkaç çok sert kireçtaşı için önerildiğini belirtmektedir. Bununla birlikte, yalnızca bazı sert kireçtaşları ve mermerlerin bu işleme ciddi hasara uğramadan dayanabileceği ifade edilmektedir (Cui vd. 2025).

Alev uygulanan mermerlerin mekanizması granitle benzerlik göstermekte, ancak süreç pratikte daha hassas yürütülmektedir. Alevle kaplama işlemi sonucunda yüzeyde kalsit kristalleri genleşmekte ve mikro ölçekte kırılma oluşmaktadır. Bu süreç, ince bir yüzey tabakasının dökülmesine ve küçük çukurlar ile çıkıntılar içeren pürüzlü, mat bir rölyefin oluşmasına yol açmaktadır. Doğal taş üreticileri, bu yüzeyi pürüzlü, doğal ve kaymaz olarak tanımlamaktadırlar. Bununla birlikte, artan dağınık yansıma nedeniyle renkler daha açık ve mat görünmektedir (Feng vd. 2022).

Mermer, granitteki gibi belirgin mineralojik kontrast bir yapının olmadığı ve düşük yumuşama ile ayrışma sıcaklıklarına sahip olması nedeniyle sınırlı bir işlem aralığında olan bir malzemedir. Bu nedenle, yetersiz ısı mermerde sınırlı bir yüzey dokusu oluştururken, aşırı ısı yüzeyde kırılmalara, derin çatlaklara ve kalsinasyonun başlamasına neden olabilmektedir (Feng vd. 2022).

2.3.4.2 Mermer Yüzeylerde Alevle Sertleştirmenin Faydaları

Alevli mermer üzerine sistematik akademik çalışmalar sınırlı olmakla birlikte, endüstri kaynakları ve genel alevle sertleştirme araştırmalarından bildirilen veya çıkarımsal olarak elde edilen bazı avantajlar bulunmaktadır:

- Gelişmiş kayma direnci: Pürüzlü ve pullanmış mikro rölyefleri sayesinde bu yüzeyler yüksek kayma direnciyle ilişkilendirilmektedir. Alevle sertleştirilmiş granit kaldırımlar üzerine yapılan çalışmalar, yöntemin doku derinliğini artırdığını ve özellikle ıslak koşullarda kayma riskini azalttığını göstermektedir. Benzer yüzeylerin uygun mermer türlerine uygulanması durumunda da pürüzlü mikro topografya sürtünmeyi artırarak yüzeyi dış mekân merdivenleri, eşikler ve kaldırımlar için daha uygun hâle getirmektedir (Sudoł vd. 2021).
- Daha "doğal" veya rustik görünüm; Tasarım literatüründe alevlenmiş taş, soluk renkler ve hafif yansımalarla yıpranmış, doğal bir görünüm olarak tanımlanmaktadır. Dış cilalı yüzeyin uzaklaştırılmasıyla kristal yapı ortaya çıkmakta, bu süreç kromatik “açılma” ve tonların açılmasıyla sonuçlanmaktadır. Mermerlerde bu etki, peyzaj mimarisinde ve cilalı yüzeylerin aşırı kayganlık olabileceği dış eşiklerde istenilen antika veya rustik bir görünüm sağlamaktadır.
- Dış mekân dayanıklılığında potansiyel iyileştirme (yüzey soyulması ve donma); Bazı teknik raporlar, alevle işlenmiş mermerin dış mekân koşullarında yüzey bozulmasına karşı daha yüksek direnç gösterebileceğini, pürüzlendirilmiş yüzeyin doğal olarak aşınmış taşa daha çok benzediğini ve küçük aşınmalara karşı görsel açıdan daha az hassas olduğunu ileri sürmektedir. Ancak bu iddialar, özellikle mermer üzerine yapılan kontrollü deneysel verilerle güçlü biçimde desteklenmemekte ve temkinli bir şekilde değerlendirilmelidir (Lisci vd. 2024).
- Bazı yüzey koruyucularla artan uyumluluk; Pürüzlü ve gözenekli yüzeyler, yüzey alanını ve kılcal erişimi artırarak hidrofobik koruyucuların ve diğer koruyucu işlemlerin mekanik tutunmasını güçlendirmektedir. Taş koruma literatürü, penetrasyon ve kılcal emmenin uzun vadeli koruma açısından kritik olduğunu vurgulamakta; alevle işlenmiş dokuların bu bağlamda koruyucu etkinliği artırıcı bir rol oynayabileceğini göstermektedir (Hashim vd. 2024).

Çoğunluğunu mermer dışındaki taşların oluşturduğu kaldırımlarda kullanılan levhalara yönelik alevle kaplama çalışmaları, alev uygulanan bölgelerde yüksek kırık yoğunluğu, darbeye dayanıklılıkta değişiklik, artan mikro çatlak oluşumu ve kenar/köşe hasarları meydana geldiğini göstermektedir. Ayrıca, alevli yüzeyden alınan numunelerin, levhanın daha derin kısımlarından elde edilen karotlara kıyasla farklı mekanik

davranışlar sergilediği vurgulanmaktadır (Grzesik vd. 2021). Benzer şekilde, ısıya duyarlı mermerler için alevle sertleştirme belirli bir yüzey sınıfı sağlayabilmekte; ancak bu durum çeşitli sonuçlar doğurabilmektedir (Wang vd. 2024):

- Yüzey çatlaklarının giderilmesi,
- Eğilme ve darbe dayanımlarında azalma,
- Donma-çözülme veya tuz kristalleşmesi nedeniyle yüzeyin bozulması,
- Kalsit kopması ve renk değişimi riski.

Alevlenmiş levhalar üzerinde yapılan çalışmalar, kısmen ısıl işlemle bağlantılı olarak kullanım sırasında karakteristik kenar ve köşe hasarının ortaya çıktığını göstermektedir. Daha ince mermer karolar veya cephe panelleri için bu risk daha da kritik hale gelmektedir; zira kenarlar mekanik olarak daha zayıf olup darbeye ve ısıl gradyanlara daha fazla maruz kalmaktadır (Grzesik vd. 2021).

Alevleme işlemi, honlanmış veya cilalı yüzeylere kıyasla daha pürüzlü ve mikro çatlaklı bir yüzey oluşturarak açık gözenekliliği ve sıvı emilimini artırabilmektedir (Feng vd. 2022). Alevlenmiş yüzeylerle ilgili çalışmalar, bu tür yüzeylerin “sıvıları emebileceğini” ve bu nedenle özellikle dış mekân uygulamalarında dikkate alınması gerektiğini vurgulamaktadır (Hashim vd. 2024).

Granitlere kıyasla kimyasal bileşenler ve lekelenmelere karşı daha hassas olan mermerlerde, artan emilim uygun şekilde işlenmediği takdirde kirlenme, biyolojik kolonizasyon ve hava koşullarına bağlı kırılmayı hızlandırabilmektedir (Feng vd. 2022).

2.3.5 Kumlama

Literatürde kumlama, mimari ve işlevsel amaçlarla mermer dokusu oluşturmak için kullanılan çok yönlü mekanik yüzey işleme tekniklerinden biri olarak uygulanmaktadır. Cilalama veya honlama işlemleri, yüzeyi aşındırıp pürüzsüzleştirirken, kumlama işlemi basınçlı hava veya özel kumlama makineleri ile aşındırıcı parçacıkları yüksek hızda taş yüzeyine yönlendirerek pürüzlü, mat ve homojen dokulu bir yüzey oluşturmaktadır.

Kumlama işlemi, darbe erozyonu, aşınma ve kalsit kristallerinin lokal parçalanmasıyla mikro ölçekli malzeme kaybına yol açan çıkarmalı bir yüzey modifikasyon yöntemi olarak tanımlanmaktadır. Bu işlem, yüzeydeki pürüzsüz tabakayı aşındırarak mermerin doğal kristal yapısını açığa çıkarmakta; görsel olarak homojen, mikro gözenekli ve kayma direnci artırılmış ince taneli bir doku oluşturmaktadır (Anaç ve Doğan 2023). Yöntem, kimyasal reaksiyon veya termal şok yerine mekanik kuvvet kullandığından, kalsiti termal olarak hasara uğratabilen alevle sertleştirmeye kıyasla mermer için daha güvenli ve daha kontrol edilebilir kabul edilmektedir.

Aşındırıcı bir püskürtme yöntemi olan kumlamanın, farklı mineralojiye sahip mermerler için uygunluğu literatürde sıkça vurgulanmaktadır. Bunun nedeninin, tekniğin farklı termal genişlemelere veya mikro yapısal kontrastlara güçlü biçimde bağlı olmamasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Bu özellik, alev uygulanamayan yumuşak, damarlı ve dolomitik mermerlerde kumlamanın kullanılabilir olmasını sağlamaktadır.

Malzeme bilimi açısından bakıldığında, kumlama işlemi tekrarlanan mikro darbeler ile mermer yüzeyinde çukurlar, oluklar ve hafif çöküntüler meydana getirerek yüzey morfolojisini değiştirmektedir. Bu süreç sonunda, yüzeyin pürüzlülük değerleri (R_a , R_z) önemli ölçüde artmakta ve daha belirgin bir doku kazanmaktadır. Profilometri ve taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılarak yapılan çalışmalar, kumlanmış mermer yüzeylerin kırık kalsit taneleri, sık boşluklar ve yüzeye yakın bölgede sınırlı mikro çatlaklarla karakterize edilen düzensiz ancak kontrollü bir pürüzlülük sergilediğini ortaya koymaktadır. Bu kontrollü mikro kırılma, taşın yapısal bütünlüğünü korurken dokunsal ve görsel özelliklerini geliştirmektedir (Bigerelle vd. 2025).

Kumlama sonrası pürüzlülük derecesinin; aşındırıcı parçacık boyutu, püskürtme basıncı, nozul açısı, nozul-taş mesafesi, maruziyet süresi ve aşındırıcı ortam türü (silika kumu, garnet, alüminyum oksit vb.) gibi çeşitli parametrelere bağlı olduğu vurgulanmaktadır. Bu değişkenlerin ayarlanması, üreticilerin hafif buzlu yüzeylerden agresif derecede pürüzlü ve kaymaz yüzeylere kadar geniş bir doku yelpazesi elde etmesine olanak tanımaktadır. Dolayısıyla kumlama, yüzey estetiğini ve işlevsel performansı artırmak için en etkin tekniklerden biri olarak değerlendirilmektedir (Bigerelle vd. 2025).

Araştırmacılar, kumlama işleminin yüzeyin kayma direncini artırdığını ve bunun suya veya çeşitli hava koşullarına maruz kalan uygulamalar açısından kritik bir avantaj sunduğunu vurgulamaktadır (Sarışık vd. 2011).

Mimari tasarım literatüründe, kumlanmış mermerin dış mekân döşemelerinde, havuz çevrelerinde, teraslarda, yürüyüş yollarında ve merdivenlerde yaygın olarak tercih edildiği belirtilmektedir. Buna karşılık cilalı mermer, düşük sürtünme katsayısı nedeniyle kayma riski oluşturmakta ve bu tür uygulamalarda tehlikeli olabilmektedir. Kumlama ile oluşturulan mat yüzey, ışığı dağınık biçimde dağıtarak parlamayı azaltmakta ve taşı, dış mekânlarda görsel olarak daha çekici hale getirmektedir. Çizikler, aşınma izleri ve çabuk aşınma gösteren cilalı yüzeylerin aksine, kumlanmış mermerin pürüzlü dokusu küçük yüzey hasarlarını gizlediği için eşit şekilde yaşlanmaktadır. Bu nedenle birçok cephe kaplama sisteminde, görsel bozulmaya dirençli, stabil ve düşük parlaklıkta bir estetik yüzey elde etmek amacıyla kumlanmış mermer kullanılmaktadır (Resim 2.3).



Resim 2. 3 Kumlanmış mermer ve traverten yüzeyleri

Literatürde, kumlanmış yüzeylerin gelişmiş yapışma özelliklerine sahip olduğu ve bu nedenle sızdırmazlık maddeleri, konsolidantlar, hidrofobik işlemler ile gelişmiş nano kaplamalar için uygun yüzeyler sunduğu vurgulanmaktadır (Tena-Santafé vd. 2025). Artan yüzey alanı ve mikro gözeneklilik, koruyucu maddelerin daha derinlere nüfuz

etmesine olanak tanımakta ve bu sayede lekelenmelere, donma-çözülme döngülerine ve atmosferik kirleticilere karşı direnci önemli ölçüde artırabilmektedir (Hashim vd. 2024).

Avantajlarına rağmen kumlama, taş koruma ve performans çalışmalarında sıklıkla tartışılan bazı zayıf noktalara yol açabilmektedir. Aşındırıcı darbeler sonucunda oluşan mikro pürüzlü yüzey, cilalı veya honlanmış yüzeylere kıyasla daha yüksek açık gözeneklilik ve su emilimi göstermektedir (Zhang vd. 2023). Yüksek gözeneklilik, yüzey uygun şekilde kapatılmadığında lekelenmeye, biyolojik büyümeye ve hava koşullarına bağlı bozulmaya neden olabilmektedir (Alves vd. 2021). Dış ortamlarda artan su emilimi, soğuk iklimlerde donma-çözülme hasarını hızlandırabileceği gibi kıyı bölgelerinde tuz kristalleşmesi kaynaklı bozulmalara da yol açabilmektedir. Bunun yanı sıra kumlama, özellikle yüksek damarlı mermerlerde, mermerin içinde önceden var olan mikro çatlakları ortaya çıkarabilir veya genişletebilir; bu durum ise özellikle ince levhalarda eğilme mukavemetinin azalmasına neden olabilmektedir (Zhang vd. 2023).

Kumlama işleminin kontrollü parametrelerle gerçekleştirildiğinde, mekanik zayıflamanın sınırlı kaldığı ve alevle işlenmiş mermerlerde gözlemlenen mikro yapısal hasara göre çok daha az şiddetli sonuçlar doğurduğu belirlenmiştir (Alves vd. 2021).

Araştırmalar, aşındırıcı seçiminin istenmeyen hasarı en aza indirmede kritik bir rol oynadığını ortaya koymaktadır. Alüminyum oksit gibi daha sert aşındırıcılar daha derin yüzey profilleri üretirken, silika kumu gibi daha yumuşak aşındırıcılar ise özellikle daha yumuşak mermerler için uygun olan daha hassas dokular oluşturmaktadır.

Önemli bir tartışma konusu olarak ele alınan kumlama, çevresel ve sağlıkla ilgili bazı sorunları da gündeme getirmektedir. Geleneksel silika kumlama, çalışanlar için tehlikeli olan solunabilir kristal silika tozu üretmektedir. Bu nedenle birçok modern taş işleme tesisi, silika içermeyen aşındırıcıların kullanımına, kapalı kumlama kabinlerine, toz bastırma sistemlerine ve ıslak kumlama tekniklerine yönelmiştir. Özellikle ıslak kumlama, toz oluşumunu azaltması ve yüzey sıcaklığını düşürmesi nedeniyle daha temiz ve daha homojen bir yüzey elde edilmesini sağlayan bir yöntem olarak öne çıkmaktadır (Zulkarnain vd. 2021).

Robotik ve bilgisayar kontrollü kumlama sistemleri, yüksek kaliteli mimari taş üretiminde giderek yaygınlaşmaktadır. Bu sistemler, manuel kumlamanın sağlayamadığı tekrarlanabilirliği, doku derinliğinin hassas kontrolünü ve dekoratif desenlerin oluşturulmasını mümkün kılmaktadır. Söz konusu teknolojik dönüşüm, seri üretimde tutarlılığı artırmakta ve fırçalama, honlama veya tamburlama gibi diğer finisaj işlemleriyle daha verimli entegrasyon sağlamaktadır (Nguyen vd. 2024).

Kumlama işlemi, çekiçleme, alevleme, su jeti ile dokulandırma ve fırçalama yöntemleriyle karşılaştırılmaktadır (Bortolussi vd. 2002). Literatürde kumlama, çekiçlemeye göre daha az aşındırıcı, alevlemeye göre daha düşük riskli bir teknik olarak tanımlanmaktadır. Bu özellikleri kumlamayı, malzeme bütünlüğünün korunarak dokulu yüzey elde edilmesi istenen uygulamalar için stratejik bir seçenek hâline getirmektedir (Gherardi vd. 2017). Bu yöntem, karmaşık damarlı veya heterojen taneli taşlarda dahi homojen mikro dokular oluşturabilmektedir. Ancak çekiçleme gibi diğer teknikler, bu sonucu düzenli ve tutarlı bir şekilde sağlayamamaktadır (Bortolussi vd. 2002).

Nano özellikli mineraller üzerine gelişmiş yüzey modifikasyonuna odaklanan araştırmalar açısından kum püskürtme özel bir önem taşımaktadır. Bu yöntemin oluşturduğu mikro pürüzlülük, nano parçacık birikimi, mineral bazlı dolgu maddeleri ve konsolidantlar için ideal tutunma noktaları sunarak yüzey mühendisliğinde kritik avantajlar sağlamaktadır.

Genişletilmiş yüzey alanı ve açık gözenek sistemi, penetrasyonu, kaplama stabilitesini ve kimyasal bağlanmayı önemli ölçüde artırarak kum püskürtmeyi deneysel nano-geliştirilmiş mermer yüzeyler için değerli bir ön işlem haline getirmektedir. Bu bağlamda kumlama yöntemi; kontrollü, uyarlanabilir ve yaygın biçimde uygulanabilir bir mermer yüzey işlemi olarak endüstriyel uygulamalarda ve literatürde önemli bir konuma sahiptir.

Yöntem, gelişmiş kayma direnci, doğal mat bir estetik görüntü, koruyucu işlemlerle yüksek uyumluluk ve farklı mermer türlerinde uygulama gibi birçok avantaj sağlamaktadır. Gözenekliliği kapatılmadığı takdirde uzun vadeli dayanıklılığı

etkileyebilse de modern sızdırmazlık teknolojileri ve nano bazlı yüzey işlemleri bu olumsuzlukları azaltabilmekte ve kumlamayı hem iç hem de dış mekân mermer uygulamaları için dengeli ve işlevsel bir seçenek haline getirmektedir. Ayrıca yöntemin mekanik yapısı, özellikle nanomalzemeler veya polimer–mineral hibrit sistemlerini içeren yeni yüzey mühendisliği stratejilerinin değerlendirilmesinde önemli bir karşılaştırmalı temel oluşturmaktadır (Gherardi vd. 2017).

Kumlama tekniği, genellikle silika kumu kullanılan yüksek basınçlı aşındırıcı parçacıkların mermer yüzeye yönlendirilmesiyle gerçekleştirilmektedir. Bu işlem, homojen bir pürüzlü doku ile hafif soluk bir görünüm elde edilmesini sağlamaktadır. Pürüzlülük derecesi ise uygulanan basınç, aşındırıcı tanecik boyutu ve kumlama süresi gibi parametreler ayarlanarak kontrol edilebilmektedir (Śmielak vd. 2023).

Kumlama, özellikle dış mekân döşemelerinde ve kamusal alanlardaki uygulamalarda yüzey tutuşunu artırmada etkili olmaktadır. Ayrıca dolgu malzemelerinin yapışması için mevcut yüzey alanını genişletmektedir. Bununla birlikte aşırı kumlama, fazla gözenek açılmasına yol açmakta ve sonrasında pürüzsüz bir yüzey elde edebilmek için daha fazla dolgu malzemesi kullanımını gerektirebilmektedir (Śmielak vd. 2023).

2.4 Malzeme Biliminde Nanoteknoloji

2.4.1 Nanomalzemelerin Temelleri

Nanomalzemeler, en az bir boyutu 1 ile 100 nm arasında olan yapılar olarak tanımlanmaktadır. Bu ölçekteki malzeme, klasik malzemelerden tamamen farklı fiziksel ve kimyasal davranışlar sergilemektedir. Parçacık boyutu nanometre aralığına indiğinde, atomların çoğunun yüzeyde yer almasıyla birlikte, çok büyük bir yüzey alanı oluşmakta ve bu durum, yüksek yüzey enerjisine ve dolayısıyla reaktif olmalarına neden olmaktadır. Hacimlerine göre bu kadar yüksek oranda yüzeye sahip olan nanomalzemeler, bağlayıcı matrislerle güçlü bir şekilde etkileşime girebilmekte ve mikro seviyelerdeki boşlukları doldurarak yoğun homojen yapılar oluşturmaktadırlar (Eker vd. 2024).

Kuantum etkilerinin baskın rol oynamaya başladığı nano ölçekli rejimde bir sistemin mekanik, optik ve kimyasal özellikleri, makro ölçekli karşılıklarında gözlemlenenlerden çok sık farklılık göstermektedir (Sanchez ve Sobolev 2010). Örneğin, mineraller nano ölçekte daha yüksek elastik modül veya diğer malzemelerle bağ kurma yeteneğinde artış gösterebilmektedir (Gleiter 2000).

Reaksiyon kinetiği, bu küçük hacim içinde ölçüldüğünde hızlanmış görünmektedir (Pacheco-Torgal ve Jalali 2011). Tüm bu özellikler, esas olarak çimento bazlı ve polimer bazlı kompozitler üzerindeki mikro yapısal kontrol yoluyla önemlidir (Sanchez ve Sobolev 2010). Literatürde nano katkı maddelerinin, hidrasyon ürünlerinin daha düzenli ve yoğun gelişimini sağlayan çekirdeklenme merkezleri gibi davrandığı yaygın olarak bildirilmiştir (Li vd. 2025).

Nanomalzemeler, mekanik performansın yanı sıra işlenebilirlik, reoloji ve uzun süreli dayanıklılık gibi parametreleri de etkiler. Düşük dozlarda bile performansı iyileştirebildikleri için, geleneksel mikronize katkı maddelerine kıyasla yüksek verimliliğe sahiptirler. Bu anlamda, nanoteknoloji sadece yapısal malzemelerde bir katkı maddesi yaklaşımı olarak değil, mikro yapı mühendisliğine dayalı yeni bir tasarım paradigması olarak da kabul edilmektedir (Sanchez ve Sobolev 2010).

2.4.2 Nanoteknolojinin İnşaat Sektöründeki Uygulamaları

İnşaat sektöründe nanomalzemelerin kullanımı, özellikle beton, harç, kaplama ve yapıştırıcı sistemler için performans artırıcı bir bileşen olarak hızla artmaktadır. Nano-silika, nano-kil, nano-TiO₂ ve nano-CaCO₃ gibi bileşenler, basınç ve eğilme dayanımlarını, su geçirmezliği ve kimyasal direnci artırmak için çimento bazlı sistemlere eklenmektedir (Tanimola ve Efe 2024). Bu katkı maddeleri, çimento matrisinin boşluk yapısını iyileştirmeye yardımcı olarak daha düşük gözeneklilik ve daha kompakt bir mikro yapı elde edilmesini sağlamaktadır.

Nano katkı maddeleri, erken yaşta mukavemet artışı ve mikro çatlakların önlenmesi yoluyla büyük ölçekli mühendislik yapılarının hizmet ömrünü uzatmada hayati bir

atılım sağlamaktadır. Nanomalzemeler, bağlayıcı faz ve agrega arasındaki geçiş bölgesini (ITZ) güçlendirerek bu zayıf bölgeyi homojen bir yapıya dönüştürmektedir. Sülfat saldırısına uğramış betonda donma-çözülme döngüleri veya karbonatlaşma gibi çevresel bozulma mekanizmalarından kaynaklanan mekanik performans, ITZ'ler nanomalzemelerle iyi korunduğunda daha fazla direnç gösterecektir.

Nanoteknoloji, doğal taş yüzeyler için dolgu ve onarım malzemelerinin geliştirilmesinde hala çok yeni bir alan olarak kabul edilmektedir. Son çalışmalar, nano modifiye edilmiş dolgu maddelerinin taş yüzeyine daha iyi yapıştığını ve renk uyumunu iyileştirdiğini kanıtlamıştır ve mikro boşlukları doldurmanın yanı sıra, özellikle traverten ve mermer gibi gözenekli doğal taşlarda hem estetik hem de yapısal bütünlüğün uzun vadeli korunmasını sağlamaktadır (Urbanek vd. 2025).

2.4.3 Dolgu Minerallerinin Nanoteknolojik Özellikleri

2.4.3.1 Nano-Silika (SiO₂)

Nanomineraller veya nano ölçekteki mineraller, mekanik dayanımı ve uygulama kolaylığı ile yüzey uyumluluğuyla ilgili diğer özellikleri doğrudan etkilemektedir. Mikro ve kılcal boşluklara nüfuz ederek daha bütünlüklü bir dolgu yapısı oluşturmada ve taş-dolgu arayüzlerinde sürekliliği artırmaktadırlar (Shewale vd. 2025). Nanomineraller tarafından oluşturulan bu arayüzün, geleneksel sistemlerde çok yaygın olan ayrışma, renk değişimi, yapışma kaybı gibi sorunları önemli ölçüde azalttığı literatürde vurgulanmaktadır.

Nano katkı maddeleriyle ilgili bir diğer önemli avantaj, dolgu harcı içindeki reolojik davranışın düzenlenmesi yoluyla taze işlenebilirliğin ve sertleşmiş mukavemetin optimizasyonu olarak açıklanabilmektedir. Parçacık boyutunun azalması, dolgu maddelerinin matrisi içinde daha iyi paketleme yoğunluğu anlamına gelmekte ve bu da daha düşük su ihtiyacı ve büzülme mikro çatlaklarının oluşumunun kısıtlanmasıyla birlikte meydana gelir. Bu nedenle, nano mineraller dolgu malzemelerinde çok fonksiyonlu bir tasarım aracı olarak ortaya çıkmaktadır (Regalla 2024).

2.4.3.2 Nano-Alümina (Al_2O_3)

Nano-alümina, yüksek sertliği ve elastisite modülü sayesinde dolgu sistemlerinde mekanik takviye görevi üstlenmektedir. Reçine ve çimento bazlı matrislerde mikro takviye unsuru işlevi görerek yüzey sertliğini, aşınma direncini ve çizilme dayanımını artırmaktadır (Shahabaz vd. 2023). Bu özellik, özellikle insan yoğunluğunun fazla olduğu zemin kaplamalarında önemli bir husustur. Nano-alüminanın yüksek termal kararlılığı, dolgu-taş ara yüzeyindeki termal gerilmeleri azaltarak dış mekân uygulamalarında çatlama ve ayrışma riskini düşürmektedir (Arab vd. 2025). Bununla birlikte, nano-alümina, matris içerisinde mikro çatlak ilerlemesini sınırlandırarak kırılma tokluğunu artırmaktadır (Al Qader vd. 2022). Bu etki, dolgunun servis ömrünü uzatarak bakım ve yenileme ihtiyacını azaltan önemli bir performans kazanımı sunmaktadır (Al-Saffar vd. 2023).

2.4.3.3 Nano-Kalsiyum Karbonat (CaCO_3)

Nano- CaCO_3 , mermer ve travertenin ana bileşeni olan kalsiyum karbonatla kimyasal uyumu, dolgularda yüksek yapışma (aderans) ve görsel bütünlük sağlayarak önemli bir avantaj sunmaktadır. (Yang vd. 2024). Renk uyumu, özellikle dekoratif yüzeylerde estetik açıdan kritik bir parametre olarak kabul edilmektedir.

Nano- CaCO_3 çimento esaslı sistemlerde çekirdeklenme etkisiyle hidratasyonu hızlandırarak daha düzenli bir mikro yapı oluşturmaktadır (Fu vd. 2022). Bu durum, mikro yapının yoğunlaşmasına ve erken yaş dayanımının artmasına yol açmaktadır (Cao vd. 2010). Parçacıkların boşluk doldurucu etkisi sayesinde porozite ve su emme kapasitesi azalmaktadır (Mohammed vd. 2025).

Reolojik açıdan nano-kalsit, dolgu harcının akışkanlığını ve yayılma davranışını düzenleyerek uygulama kolaylığı sağlamaktadır (Meng vd. 2017). Tikotropik dengeyi iyileştirerek yüzeyde sarkmayı önlemekte ve boşlukların doldurulmasına olanak tanımaktadır (Yang vd. 2025). Bu yönüyle nano- CaCO_3 , estetik ve yapısal performansı geliştiren çok yönlü bir katkı malzemesidir (Cao vd. 2019).

2.4.4 Nano-Killer ve Diğer Mineraller

Nano-killer, yüksek yüzey enerjili tabakalı yapısıyla reoloji düzenleyici ve bariyer görevi görmektedir. Tiksotropiyi artırarak dolgu harcının dengeli yayılmasını sağlayıp akma ve çökmesini engelleyen bu özellik, özellikle düşey yüzey uygulamalarında büyük avantaj sunmaktadır (Uddin vd. 2024). Nano-killerin bir diğer önemli katkısı, nem ve gaz geçirgenliğini azaltmalarıdır. Tabakalı yapı, dolgu matrisinde difüzyon yollarını uzatarak su ve zararlı iyonların ilerlemesini sınırlandırmaktadır. Bu durum, dış ortamdaki doğal taş yüzeylerde uzun vadeli dayanıklılığın artmasına katkı sağlamaktadır. Ayrıca nano-killer ve diğer nano mineraller, UV ışınlarına ve termal yaşlanmaya karşı direnci artırarak dolgu sistemlerinin renk stabilitesini ve yapısal bütünlüğünü korumaktadır. Bu yönüyle nano-killer, estetik ve dayanıklılığı birlikte hedefleyen modern doğal taş koruma ve onarım teknolojilerinin önemli bileşenleri arasında yer almaktadır (Langaroudi ve Mohammadi 2018).

3. MATERYAL ve METOT

Araştırma kapsamında, nano ölçekli minerallerin yüksek performanslı mermer levha dolgu maddeleri olarak kullanılması için en etkili tekniklerin belirlenmesi amacıyla kapsamlı bir dizi deneysel çalışma yürütülmüştür. Araştırma dört temel aşama etrafında yapılandırılmıştır:

- Seçilen hammaddelerin fiziksel ve kimyasal özellikleri, dolgu işlemlerine uygunluklarının belirlenmesi amacıyla kapsamlı biçimde analiz edilmiştir. Bu karakterizasyon aşaması; nano-bor, nano-kalsit, nano-silika bakımından zengin traverten tozu ve beyaz mineral dolgu maddeleri gibi nano ölçekli katkılara odaklanmış ve sonraki formülasyon çalışmalarına temel veriler sağlamıştır.
- İlk aşamada elde edilen analiz sonuçlarına dayanılarak, nano-mineral oranları, bağlayıcı bileşimleri ve işleme parametreleri sistematik biçimde değiştirilmiş; mermer matrisiyle etkileşimleri artırılarak optimize edilmiş dolgu formülasyonları geliştirilmiştir.
- Üretilen dolgu sistemlerinin hidrolik, reolojik ve mekanik özellikleri, standart test protokolleri kullanılarak titizlikle değerlendirilmiştir. Bu değerlendirmeler kapsamında, her bir formülasyonun genel etkinliğinin belirlenmesi amacıyla priz alma davranışı, penetrasyon kapasitesi, yapıştırma performansı, mikroyapısal gelişim ve nihai mekanik kararlılık gibi parametreler incelenmiştir.
- Son olarak, üstün performans sağlayabilecek nano-mineral türleri ve oranlarının en uygun kombinasyonlarının belirlenmesine yönelik optimizasyon çalışmaları yürütülmüştür. Bu çalışmalar kapsamında, traverten levha kusurlarına uygulandığında en yüksek estetik uyum, dayanıklılık ve yapısal güçlendirme sağlayan formülasyonları belirlemek amacıyla test edilen tüm sistemler karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir.

Bu dört aşamanın bulguları, seçilen nano ölçekli minerallerin entegrasyonunun mermer dolgularının işlevsel ve mekanik davranışını önemli ölçüde iyileştirebileceğini ve endüstriyel uygulamalara özel gelişmiş dolgu malzemeleri geliştirmek için güçlü bir temel sağlayabileceğini göstermektedir.

Çalışma kapsamında geliştirilen yöntemsel yaklaşım, mermer ve traverten gibi doğal taş yüzeylerinde uzun yıllardır kullanılan geleneksel dolgu malzemelerinin sınırlılıklarını aşmak amacıyla tasarlanmış olup, nano özellikli minerallerin çimento bazlı dolgu sistemlerine entegrasyonunu bilimsel olarak test etmeyi hedeflemektedir.

Mermer endüstrisinde özellikle traverten türü taşların gözenekli ve heterojen yapıları, mekanik dayanımın düşmesine, estetik bütünlüğün bozulmasına ve ticari değer kaybına yol açtığından, dolgu uygulamaları endüstriyel üretim süreçlerinin vazgeçilmez bir aşamasını oluşturmaktadır. Bu bağlamda, nano boyutlu mineral katkıların çimento matrisine dahil edilmesi hem hidrasyon kinetiğinin hızlandırılması hem de mikro yapının yoğunlaştırılması yoluyla mevcut dolgu teknolojilerinin ötesine geçen bir performans sunma potansiyeline sahiptir.

Çalışmanın metot kısmı, çimento–nano mineral–traverten tozu karışımından oluşan yeni nesil dolgu reçetelerinin hazırlanması, uygulanması ve karakterizasyonuna yönelik ayrıntılı bir yöntemsel çerçeve sunmaktadır. Bu çerçeve hem akademik araştırmalarda kullanılabilirliği hem de mermer fabrikalarındaki pratik uygulamalara uyum sağlama kapasitesi göz önünde bulundurularak planlanmıştır. Sonuç olarak, elde edilen sonuçların hem bilimsel hem de endüstriyel açıdan yüksek geçerliliğe sahip olması amaçlanmıştır.

3.1 Mermer Levha Örnekleri

Çalışmada kullanılan mermer ve traverten levhalar, homojen mikro yapıları ve üstün estetik değeriyle dünya çapında yüksek kaliteli kristalin mermer ve traverten yataklarıyla tanınan Afyonkarahisar-İscehisar bölgesinden temin edilmiştir.

Mermer ve traverten örnekleri, endüstriyel sınıf elmas tel testereleler kullanılarak 60 cm x 20 cm x 2 cm boyutlarında standart levhalar halinde kesilmiştir. Bu levhalar, homojen kalınlık ve yüzey düzlemselliğinin sağlanması için kalibre edilmiş ve doğal topoğrafyadaki değişikliklerin dolgu penetrasyonunu veya bağlanma davranışını etkilememesi sağlanmıştır.

Deneylerden önce yüzeyler basınçlı suyla temizlenmiş ve reçine bazlı dolgu yapışmasını engelleyebilecek adsorbe olmuş nemi gidermek için 60 °C'de kontrollü bir fırında 24 saat kurutulmuştur.

Endüstriyel onarım koşullarının simüle edilebilmesi için mikro çatlaklar, taneler arası boşluklar, fissürler, stilolitler ve küçük dokusal süreksizlikler gibi doğal kusurlar dokunulmadan bırakılmıştır. Bu kusurlar, dolgu maddesinin nüfuz derinliğini, bağlanma kabiliyetini ve mekanik iyileştirmeyi değerlendirmek için tutarlı ve temsili bir ortam sağlamıştır.

Her levha görsel olarak incelenip kategorize edilmiş ve dolgu maddesi uygulamasından önce hiçbir kimyasal yüzey işlemi uygulanmamış, bu da doğal mermer koşullarında dolgu maddesinin performansının gerçek bir değerlendirmesine olanak sağlamıştır.

3.2 Malzemeler

3.2.1 Traverten Plakalar ve Traverten Atığı

Deneysel çalışmalarda kullanılan traverten plaka örnekleri Afyonkarahisar-İscehisar bölgesinden temin edilmiş olup örnekler yüksek poroziteli karakteristik yapıyı temsil etmektedir. Traverten örneklerinin yüzeyleri kalibre edilmiş, doğal kusurlar korunarak herhangi bir ön kaplama işlemi uygulanmamıştır. Traverten üretiminden elde edilen ince tozlar pigment yerine kullanılmış olup, estetik uyum ve sürdürülebilirlik açısından avantaj sağlayabileceği ön görülmüştür.

3.2.2 Beyaz Çimento

Bağlayıcı olarak yüksek saflıktaki Portland tipi beyaz çimento kullanılmıştır. Düşük Fe_2O_3 ve Mn içeriği nedeniyle yüksek beyazlık indeksine sahiptir. Çimento miktarı bazı reçetelerde azaltılmış olup, bunun yerine traverten tozu ve nano katkılar eklenmiştir. Ancak ön deneme çalışmalarında beyaz çimento yerine Portland Cem I 42,5 R gri çimento kullanılmıştır.

3.2.3 Nano Kalsit

Nano kalsit, 450 nm paracak boyutuna ve %99,95 saflık oranına sahip nano kalsit üretimi yapan endüstriyel işletmelerden temin edilmiştir. Artan yüzey alanı sayesinde imento matrisine daha etkin entegre olarak mikro çatlak kapanmasına ve dayanım artışına katkı sağlaması amaçlanmıştır.

3.2.4 Nano Bor (Kolemanit)

Nano bor, 450 nm paracak boyutuna ve %99,50 saflık oranına sahip nano bor üretimi yapan AR-GE laboratuvarlarından temin edilmiştir. Kolemanit, nano forma getirildiğinde hidrasyon hızını artırmakta, priz süresini kısaltmakta ve matris dayanımını yükseltmektedir.

Çalışmada kullanılan nano borun temel fonksiyonu, mermer dolgu priz sürecinin hızlandırılması ve mikro çatlak kapanmasının iyileştirilmesidir. Kolemanit, nanometre lğine indirildiğinde yüksek özgül yüzey alanı ve artan yüzey enerjisi, imento esaslı veya reçine esaslı bağlayıcı sistemle etkileşimini önemli ölçüde artırmaktadır.

Nano düzeyde bor içeren fazlar oldukça reaktif çekirdeklenme merkezleri olarak işlev görerek, mineral bazlı dolgu maddelerinde C–S–H jeli ve etrenjit benzeri yapılar gibi hidrasyon ürünlerinin hızlı oluşumunu desteklemektedir. Bu hızlandırılmış çekirdeklenme, hidrasyonun indüksiyon süresini kısaltmakla kalmaz, aynı zamanda matrisin erken dönemdeki sertliğini de artırmaktadır (Davraz 2015). Bu zellik, özellikle hızlı üretim döngüleri gerektiren mermer levha dolgu maddeleri için avantaj sağlarken, nano-kolemanit de daha homojen jel oluşumunu destekleyip birbirine bağlı gözenek hacmini azaltarak daha yoğun bir mikro yapı oluşurmaktadır.

Bu çalışmada, nanoborun fonksiyonel bir katkı maddesi olarak kullanımı ikili bir rol üstlenmektedir. Nano bor erken hidrasyonu katalize etmesinin yanı sıra, mermer matrisindeki mikro boşlukları ve mikro çatlakları dolduran ikincil jel fazlarının oluşumunu artırarak mikro çatlak iyileşmesine yardımcı olmaktadır (Wang vd. 2021).

Nano boyutlu bor parçacıkları, mikro kusurlara derinlemesine nüfuz ederek traverten tozu ve bağlayıcı fazları arasında güçlü kimyasal ve fiziksel köprüler oluşturmaktadır. Bu durum, ara yüzey bağlarının iyileştirilmesine, çatlak ilerlemesine karşı daha yüksek dirence ve genel olarak mekanik dayanıklılıkta bir artışa yol açmaktadır. Reaktif borat gruplarının varlığı, dolgu yapısının termal ve nem kaynaklı gerilmelere karşı stabilize edilmesine yardımcı olarak endüstriyel mermer ve traverten yüzey işlemlerinde uzun vade performansın iyileştirilmesine de katkıda bulunmaktadır. Çizelge 3.1’de çimento dolgusunda kullanılan harç karışımları verilmiştir.

Çizelge 3. 1 Çimento dolgusunda kullanılan harç karışımları

Karışım Kodu	Beyaz Çimento (%)	Traverten Tozu (%)	Nano Bor (%)	Nano Kalsit (%)
ÇDH1	93	5	1	1
ÇDH2	86	10	2	2
ÇDH3	79	15	3	3
ÇDH4	72	20	4	4
ÇDH5	65	25	5	5

3.3 Çimento Reçinesi ve Bağlayıcı Sistemleri

Çalışmada kullanılan dolgu matrisleri, doğal taş endüstrisinde geleneksel polimerik dolgulara kıyasla sürdürülebilir ve mineral uyumlu bir alternatif olarak giderek daha fazla araştırılan çimento bazlı bir bağlayıcı sisteme dayanmaktadır. Polyester veya epoksi reçinelerinin aksine, çimentomsu bağlayıcı, baskın olarak inorganik ve kalsiyum açısından zengin faz bileşimi sayesinde mermerle mineralojik bir yakınlık göstermekte; bu da mermerin kalsitli yapısıyla kimyasal uyumluluğu artırmaktadır.

Bu çalışmada kullanılan çimento bazlı bağlayıcı sistemi, parlak rengi, düşük safsızlık içeriği ve Afyon beyaz ile Afyon gri gibi yüksek değerli mermer türleriyle sağladığı üstün estetik uyum nedeniyle özel olarak seçilen ince öğütülmüş beyaz Portland çimentosu kullanılarak formüle edilmiştir. Çimento, hidrasyon kinetiğini iyileştirmek, gözenekliliği azaltmak, mikroyapısal inceliği artırmak ve kürlenmiş dolgunun mekanik bütünlüğünü güçlendirmek amacıyla nano-bor ve nano-kalsit gibi nano-mineral katkı maddeleriyle harmanlanmıştır. Ayrıca, belirli formülasyonlara az miktarda traverten

tozu eklenerek reoloji iyileştirilmiş, çatlama eğilimleri azaltılmış ve dolgunun zamanla renk stabilitesi artırılmıştır.

Çimento esaslı dolgu karışımları, nano katkıların homojen dağılımını sağlamak amacıyla yüksek kesmeli mekanik bir karıştırıcı kullanılarak hazırlanmıştır. Hazırlık sonrası, sıkışan havanın dışarı çıkması için karışımlar kısa süre dinlendirilmiş ve kusur türü ile gereken nüfuz derinliğine bağlı olarak hem manuel hem de vakum destekli sıзма yöntemleriyle mermer yüzeylere uygulanmıştır. Çimento esaslı dolgular daha sonra, mikro çatlaklara veya alt mermer tabakaya yapışmayı olumsuz etkileyecek hızlı nem kaybını önlemek amacıyla kontrollü sıcaklık ve nem koşullarında kürlenmiştir. Bu yaklaşım ile mermer matrisiyle yapısal uyumu yüksek, mekanik olarak dayanıklı, çevre dostu ve kullanım koşullarında uzun süreli dayanıklılık sağlayan bir dolgu harcı oluşturulması hedeflenmiştir.

3.3.1 Malzemelerin Hazırlanması

Bu çalışmada kullanılan klinker, alçıtaşı ve traverten tozları Afyon Kocatepe Üniversitesi İncehisar Meslek Yüksekokulu Mermer Atölyesi'nde bulunan laboratuvar tipi bilyalı değirmen kullanılarak yüksek enerjili mekanik öğütme yoluyla üretilmiştir (Resim 3.1).



Resim 3. 1 Kırma ve öğütme işlemlerinin yapılması

Kontrollü öğütme işlemi, parçacık boyutunu nanometre ölçeğine indirmenin yanı sıra yapısal kusurlar, kafes bozulmaları ve genişletilmiş özgül yüzey alanları oluşturarak malzemelerin yüzey reaktivitesini artırmıştır. Bu tür mekanik aktivasyon, dolgu

sistemlerinin performansını artırmak için kritik öneme sahiptir; çünkü artan yüzey enerjisi, çimento bazlı veya reçine bazlı bağlayıcı fazlarla daha güçlü arayüz bağları oluşmasını sağlamaktadır. Öğütme sırasında homojen parçacık boyutu dağılımını sağlamak ve aglomerasyonu en aza indirmek amacıyla dönme hızı, bilye-toz oranı ve öğütme süresi gibi parametreler optimize edilmiş; böylece üretilen malzemelerin genel dispersiyon potansiyeli iyileştirilmiştir.

3.3.2 Harç Formülasyonlarının Hazırlanması

Çalışmanın bu aşamasında, beyaz çimento oranı sistematik olarak azaltılırken, nano katkı maddeleri ve traverten tozu miktarları orantılı olarak artırılarak beş farklı dolgu formülasyonu tasarlanmıştır. Bu kademeli ikame yaklaşım, çimento içeriğinin azaltılmasının ve nano mineral yükünün artırılmasının dolgu matrisinin reolojisini, hidrolik özelliklerini ve mekanik performansını nasıl etkilediğinin değerlendirilmesini sağlamıştır. Her formül, karışımlar arasında aynı toplam bağlayıcı ve dolgu maddesi miktarlarını sağlamak ve performans parametrelerinin tutarlı bir şekilde karşılaştırılmasını sağlamak için kütle bazında hesaplanmıştır.

Nano katkı maddeleri özellikle nanobor ve nanokalsit matris yoğunlaşması, erken hidrasyon kinetiği ve çatlak doldurma kabiliyeti üzerindeki sinerjik etkilerini araştırmak için kontrollü oranlarda eklenmiştir. Beş formülasyonda kademeli ayarlamalar yapılarak; çalışma, işlenebilirlik, priz süresi, yapısal bütünlük ve endüstriyel mermer dolgu uygulamaları için ekonomik fizibiliteyi dengeleyen optimum bileşimin belirlenmesi amaçlanmıştır.

Formülasyon aşamasının ardından, tüm kuru bileşenler, traverten-çimento matrisi içinde nano katkı maddelerinin homojen dağılımını sağlamak amacıyla mekanik bir karıştırıcıda harmanlanmıştır (Resim 3.2). Ön homojenizasyon, özellikle nanopartikül aglomerasyonunu önlemek açısından kritik bir adımdır; zira aglomerasyon, dolgu kıvamını ve mikroyapısal homojenliği olumsuz etkileyebilmektedir. Kuru harmanlamanın tamamlanmasının ardından, ön denemelerle belirlenen optimize edilmiş su/bağlayıcı oranına göre macun kıvamına ulaşmak için kademeli olarak su eklenmiştir.

Sonrasında hapsolmuş havayı gidermek ve ince partiküllerin tamamen ıslanmasını sağlamak amacıyla taze karışımlar yaklaşık beş dakika dinlendirilmiştir. Bu işlem neticesinde, nihai malzemenin kohezyonu ve sıklığı önemli ölçüde artırılmıştır.



Resim 3. 2 Dolgu harcı karışımlarının hazırlanması

3.3.3 Yüzey Hazırlama İşlemleri ve Dolgu Harcı Uygulanması

Traverten levhalara dolgu uygulamasından önce alt tabaka ile modifiye dolgu formülasyonları arasında optimum yapışmayı sağlamak için kontrollü bir yüzey hazırlama işlemi gerçekleştirilmiştir (Resim 3.3).



Resim 3. 3 Dolgu harcı karışımlarının deney örneklerine uygulanması

Levha yüzeyleri, yüzeysel kirleticileri gidermek, mikro gözenekleri açmak ve homojen bir mikro doku oluşturmak için 200 grit zımpara ile hafifçe pürüzlendirilmiş ve dolgu matrisiyle mekanik kenetlenme güçlendirilmiştir (Resim 3.4). Bu işlem, bağlanma performansını etkileyebilecek cilalama kalıntılarının ve zayıf bağlı parçacıkların da giderilmesine yardımcı olmuştur. Pürüzlendirmenin ardından, levhalar basınçlı hava ve kuru bir bezle temizlenerek yüzeyde toz veya gevşek kalıntı kalmaması sağlanmış ve sonraki uygulama için stabil ve kirletici içermeyen bir alt tabaka elde edilmiştir.



Resim 3. 4 Dolgu harcı uygulanmış deney örneklerinde yüzey düzeltilmesi

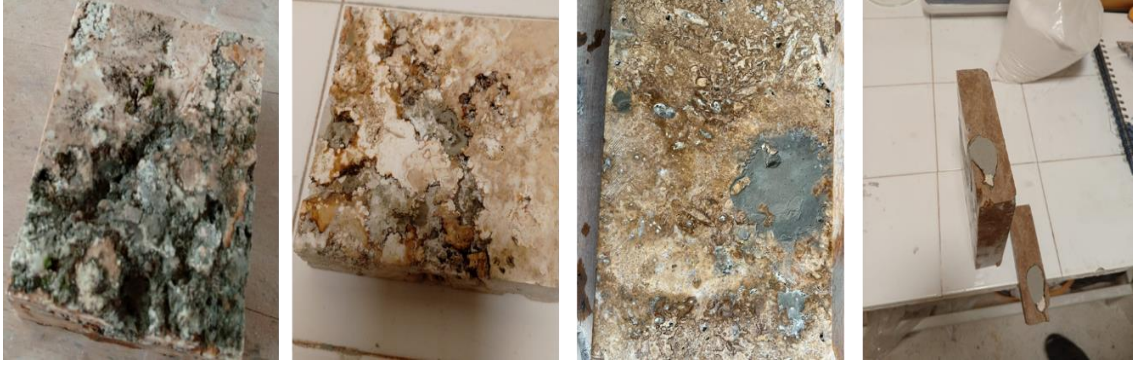
Hazırlanan dolgu karışımları, dolgu macununun kirlenmesini önleyen, reaktif olmayan ve aşındırıcı özellik göstermeyen nitelikleri nedeniyle paslanmaz çelik mala kullanılarak manuel olarak uygulanmıştır. Uygulama esnasında, dolgunun travertenin karakteristik özelliği olan birbirine bağlı gözenek yapısı ile mikro çatlaklara etkin biçimde nüfuz etmesini kolaylaştırmak amacıyla malaya sabit ve tutarlı bir basınç uygulanmıştır (Resim 3.5, Resim 3.6 ve Resim 3.7). Bu basınç destekli yöntem, nano takviyeli dolgu maddesinin yüzeyde ve yüzeyin altındaki boşlukları yeterli düzeyde doyurmasını sağlayarak yapısal dayanımı artırmış ve estetik bütünlüğü geliştirmiştir.



Resim 3. 5 Dolgu işlemlerine hazırlık çalışmaları



Resim 3. 6 Dolgu işlemi tamamlanan deney örneklerinin düzeltilmesi



Resim 3. 7 Dolgu işlemi tamamlanan deney örneklerinin cilalanması

Uygulama tamamlandıktan sonra işlenmiş levhalar kontrollü kapalı laboratuvar koşullarında 24 saatlik priz süresi boyunca müdahale edilmeksizin bekletilmiştir. Bu süre, hidrasyon reaksiyonlarının gerçekleşmesi, matrisin konsolidasyonu ve erken mekanik bütünlüğün oluşması için yeterli zamanı sağlamıştır. Standartlaştırılmış bu kürleme aşaması, sonraki performans ve mikroyapı analizlerinde elde edilen deneysel sonuçların güvenilirliğini ve tekrarlanabilirliğini garanti altına almıştır.

3.4 Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) Analizleri

Dolgu maddesinin penetrasyon derinliği, yüzey morfolojisi, çatlak doldurma verimliliği ile nanopartiküller, reçineler ve mermer yüzeyleri arasındaki mikroyapısal etkileşimleri değerlendirmek için Afyon Kocatepe Üniversitesi Teknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezi'ndeki (AKÜ-TUAM) Leo 1430 Vp taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılarak analizler yapılmıştır (Resim 3.8). Element dağılımını belirlemek ve dolgu matrisi içindeki nanopartikülleri doğrulamak için geri saçılmış elektron (BSE) görüntüleme ve enerji dağılımlı X-ışını spektroskopisi (EDX) haritalama yöntemleri kullanılmıştır.

Deney örneklerine SEM analizi uygulanmış; traverten–dolgu ara yüzeyindeki mikro aderans mekanizması, çatlak oluşumu ve dolgunun gözeneklere nüfuz derinliği mikroyapı ölçeğinde ortaya konulmuştur (Resim 3.9). Alınan SEM görüntüleri sayesinde, dolgu fazı ile doğal taş matrisi arasındaki bağlanma sürekliliği, boşluk dağılımı ve olası ayrılma bölgeleri net biçimde değerlendirilmiştir.



Resim 3. 8 Leo 1430 Vp SEM analiz cihazı (AKÜ-TUAM)



Resim 3. 9 SEM analizi için hazırlanan deney örnekleri

3.5 Yüzey Pürüzlülüğü Ölçümü

Doğal taş numunelerinin yüzey pürüzlülüğü ölçümleri, TS 6956 EN ISO 4287 standardı dikkate alınarak gerçekleştirilmiştir (TS 2004). Ölçümler, Afyon Kocatepe Üniversitesi Teknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezi'ndeki Time Tr200 yüzey pürüzlülüğü ölçüm cihazı (Anonim₁ 2025) ile yapılmıştır (Resim 3.10).



Resim 3. 10 Time Tr200 yüzey pürüzlülüğü ölçüm cihazı (Anonim₁ 2025)

Yüzey pürüzlülüğü ölçümleri hem dolgu uygulanmış yüzeylerde hem de ham yüzeylerde gerçekleştirilmiştir. Ölçümlerin tekrarlanabilirliğini sağlamak amacıyla numune yüzeylerinde 5x5 cm boyutlarında karelajlar oluşturulmuş ve veriler bu alanların orta noktalarından alınmıştır. Ölçüm sırasında cihazın elmas uçlu probu yüzey boyunca doğrusal bir hat üzerinde ilerleyerek yüzeydeki mikro düzensizliklere nüfuz etmekte ve çıkmaktadır. Bu hareketten kaynaklanan mekanik titreşimler yüksek büyütme oranlarıyla algılanarak kaydedilmiştir. Böylece yüzey pürüzlülüğü profili mikrometre mertebesinde (Ra) yüksek hassasiyetle belirlenebilmiştir.

3.6 Renk Ölçümü

Deney örneklerinin renk özellikleri, dolgu harç uygulaması öncesi ve sonrasında ASTM D2244-2017 standardına göre belirlenmiştir (ASTM 2017). Renk ölçümleri, PCE-XXM 20 taşınabilir renk ölçüm cihazı (Anonim₂ 2025) ile gerçekleştirilmiştir (Resim 3.11).

Ölçümler sırasında numune yüzeylerinden RGB (Kırmızı-Yeşil-Mavi) renk değerleri elde edilmiştir. Ölçüm yapılan bölgeler, doğal taş endüstrisinde karşılaşılan gerçek kullanım koşullarını temsil edecek şekilde seçilmiştir (Resim 3.12).

Ölçülen RGB değerleri Commission Internationale de l'Éclairage (CIE) 1931 tristimulus renk sistemine uygun olarak X, Y ve Z değerlerine dönüştürülmektedir

(Wyszecki ve Stiles 2000). Bu dönüşüm, sRGB renk uzayının doğrusal olmayan yapısının düzeltilmesi ve ölçülen değerlerin cihazdan bağımsız, insan görme sistemine uyumlu bir biçimde ifade edilmesi amacıyla gerçekleştirilmektedir (Gonzalez 2009).



Resim 3. 11 PCE-XXM 20 taşınabilir renk ölçüm cihazı (Anonim₂ 2025)



Resim 3. 12 Renk ölçümlerinin yapılması

Çalışmada kullanılan PCE-XXM 20 renk ölçüm cihazı, ölçüm sırasında RGB değerlerini almakta ve bu değerleri denklemlerde (3.1, 3.2 ve 3.3) belirtilen şekilde X, Y ve Z tristimulus değerlerine otomatik olarak dönüştürmektedir. Bu değerler, ışık kaynağının spektral dağılımını, traverten yüzeyinin yansıtıcılığını ve insan gözünün renk algısını birlikte tanımlayan temel parametrelerdir. Traverten plakaların renk tayinleri için kullanılacak olan kolorimetrik analiz cihazı, ölçüm işlemleri öncesinde

üretici tarafından sağlanan kalibrasyon plakası kullanılarak kalibre edilmiştir (Resim 3.11). Kalibrasyon işlemi, ölçüm doğruluğunu sağlamak amacıyla her 1 saatte bir veya ortam sıcaklığında ± 5 °C değişim meydana geldiğinde tekrarlanmıştır.

$$X = 0,4124 \left(\frac{R+0,055}{1,055} \right)^{2,4} + 0,3576 \left(\frac{G+0,055}{1,055} \right)^{2,4} + 0,1805 \left(\frac{B+0,055}{1,055} \right)^{2,4} \quad (3.1)$$

Buradaki R, G ve B harfleri sırasıyla ölçülen kırmızı, yeşil ve mavi renk kanalı değerlerini, X ise CIE 1931 tristimulus X değerini ifade etmektedir (Gonzalez 2009).

$$Y = 0,2126 \left(\frac{R+0,055}{1,055} \right)^{2,4} + 0,7152 \left(\frac{G+0,055}{1,055} \right)^{2,4} + 0,0722 \left(\frac{B+0,055}{1,055} \right)^{2,4} \quad (3.2)$$

Y değeri, insan gözünün algıladığı parlaklık (luminance) bilgisini temsil etmekte ve hesaplanırken ölçülen R, G ve B değerleri kullanılmaktadır (Gonzalez 2009).

$$Z = 0,0193 \left(\frac{R+0,055}{1,055} \right)^{2,4} + 0,1192 \left(\frac{G+0,055}{1,055} \right)^{2,4} + 0,9505 \left(\frac{B+0,055}{1,055} \right)^{2,4} \quad (3.3)$$

Z değeri, rengin kromatik özelliklerini ifade etmekte ve yine ölçülen R, G ve B kanalları temel alınarak hesaplanmaktadır (Gonzalez 2009).

CIELAB (L^* , a^* , b^*) renk uzayı, 1976 yılında CIE tarafından tanımlanmış ve insan gözünün renk algısına daha yakın, cihazdan bağımsız bir renk ölçüm yöntemi olarak geliştirilmiştir (Wyszecki ve Stiles 2000). Bu yöntem, özellikle renk karşılaştırmaları ve renk farklarının nicel analizinde kullanılmaktadır (Gonzalez 2009).

Elde edilen X, Y ve Z tristimulus değerleri, ASTM D2244-23 standardına uygun olarak CIE standart aydınlatıcı (standard illuminant) D65 için tanımlanan referans beyaz (X_n , Y_n , Z_n) değerlerine göre normalize edilmiştir. Bu kapsamda $Y_n = 100$ olarak kabul edilmiş, X_n ve Z_n değerleri ise ilgili referans aydınlatıcıya ait standart CIE değerleri olarak alınmıştır. Normalize edilen bu değerler daha sonra 3.4, 3.5 ve 3.6'daki denklemlere göre bulunan CIELAB renk uzayındaki L^* , a^* , b^* değerlerine dönüştürülmekte ve böylece insan gözünün algısına daha yakın renk değerleri elde edilmektedir (ASTM 2023). Şekil 3.1'de görüldüğü üzere CIELAB renk uzayındaki L^*

değeri siyah-beyaz eksenindeki parlaklığı, a^* değeri kırmızı-yeşil eksenindeki renk farklılığını ve b^* değeri sarı-mavi eksenindeki renk farklılığını temsil etmektedir (Tsurumoto vd. 2025). Kullanılan PCE-XXM 20 cihazı, ölçülen X, Y ve Z değerleri üzerinden bu dönüşümü otomatik olarak gerçekleştirmektedir.

$$L^* = 116 \left(\frac{Y}{Y_n} \right)^{1/3} - 16 \quad (3.4)$$

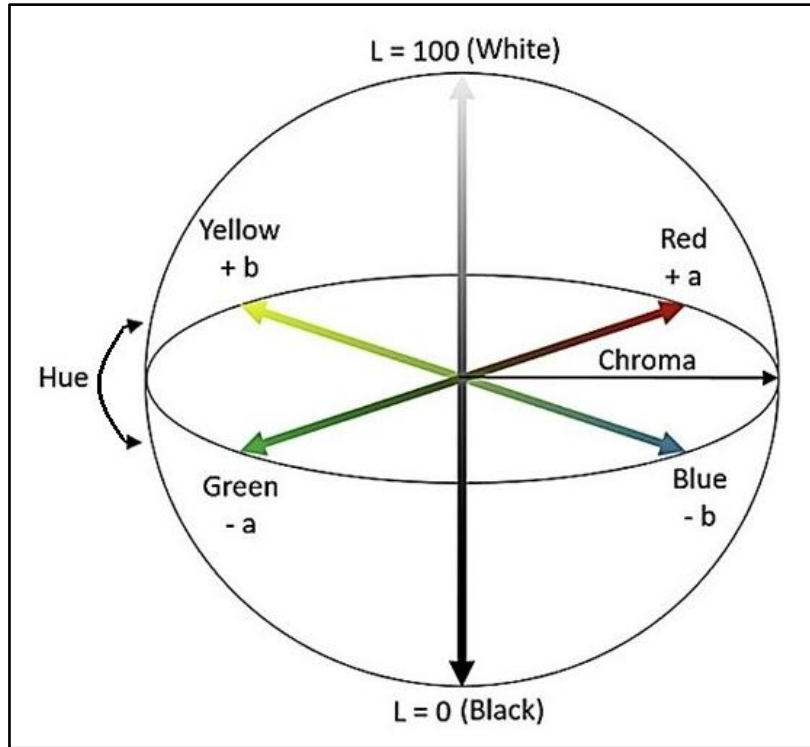
Parlaklık değeri L^* ile bulunmaktadır (Wyszecki ve Stiles 2000).

$$a^* = 500 \left[\left(\frac{X}{X_n} \right)^{1/3} - \left(\frac{Y}{Y_n} \right)^{1/3} \right] \quad (3.5)$$

Kırmızı-yeşil eksenindeki renk farklılığı a^* ile bulunmaktadır (Wyszecki ve Stiles 2000).

$$b^* = 200 \left[\left(\frac{Y}{Y_n} \right)^{1/3} - \left(\frac{Z}{Z_n} \right)^{1/3} \right] \quad (3.6)$$

Sarı-mavi eksenindeki renk farklılığı b^* ile bulunmaktadır (Wyszecki ve Stiles 2000).



Şekil 3. 1 CIELAB renk uzayı (Tsurumoto vd. 2023).

Traverten yüzeylerinde L^* değerinin azalması koyulaşmayı, artması ise beyazlaşmayı; a^* ve b^* değerlerindeki değişimler ise sırasıyla kırmızı-yeşil ve sarı-mavi tonlara kaymayı göstermektedir (Sert 2023).

CIELAB renk uzayındaki değerler kullanılarak, traverten numunelerinde çimento harcı dolgu uygulaması sonrasında meydana gelen toplam renk değişimi 3.7’de verilen denklemdeki ΔE^* değeri ile hesaplanmaktadır (Sert 2023).

$$\Delta E^* = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2} \quad (3.7)$$

Hesaplanan ΔE^* değerleri, literatürde yaygın olarak kabul edilen sınıflandırmaya göre yorumlanmış olup, renk farkının insan gözü tarafından algılanabilirlik düzeyi bu sınıflara göre değerlendirilmiştir. Bu yaklaşım, travertenlerde dolgu uygulama öncesi ve sonrası yüzey işlemlerinin renk uyumu üzerindeki etkilerinin nicel olarak ortaya konmasını sağlamıştır (Sert 2023).

4. BULGULAR

Bu tez çalışması kapsamında, nano ölçekli minerallerin traverten plaka dolgu malzemesi olarak kullanımına yönelik optimum yöntemlerin belirlenmesi amacıyla kapsamlı deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Araştırma süreci, deneysel çalışmalarda kullanılan minerallerin fiziksel ve kimyasal özelliklerinin detaylı olarak karakterize edilmesi, traverten plaka dolgu malzemesi üretimine yönelik optimum dolgu harcı formülasyonlarının geliştirilmesi, elde edilen harç dolgu örneklerinin hidrolik ve mekanik performanslarının yanı sıra; yüzey pürüzlülüğü ve renk tayini testlerinin sistematik değerlendirilmesi ve ilgili optimizasyon süreçlerinin bilimsel yöntemlerle uygulanması olmak üzere dört temel bileşenden oluşmaktadır.

4.1 Harç Karışımlarında Kullanılan Malzemelerin Kimyasal Özellikleri

Çimento esaslı dolgu harçlarındaki malzemelerin kimyasal bileşimleri, reaktivitesi, çimentolu sistemlerle uyumluluğu ve traverten restorasyonundaki performansları, sahip oldukları mineralojik özelliklere bağlı olarak belirginleşmektedir (Yue ve Wang 2024).

Kimyasal analiz sonuçlarına göre beyaz çimentoda CaO (%65,1) baskın olup, bunu orta düzeyde SiO₂ (%21,6) takip etmekte ve bu da az miktarda silisli faz içeren kalsit açısından zengin bir yapıyı göstermektedir (Çizelge 4.1). Düşük Fe₂O₃ ve MgO içerikleri, yüksek saflığı sayesinde kararlı renk özelliklerini destekler ve açık renkli traverten yüzeylerde uygulandığında lekelenme riskini azaltma potansiyeline sahiptir. Ayrıca, hidratasyon sırasında sınırlı sülfat etkileşimlerine katkıda bulunabilecek ölçülebilir miktarda SO₃ (%2,3) içerirken, kızdırma kaybı (%5,3) karbonat minerallerinin varlığını doğrulamaktadır.

Nano kalsitin, CaO açısından zengin (%54,9) olduğu, ancak çok yüksek bir kızdırma kaybı (%42,5) ile ultra ince karbonat yapısını doğrulamaktadır. Düşük SiO₂, Al₂O₃ ve Fe₂O₃ içerikleri, bu malzemenin çimento hidratasyonu sırasında çekirdeklenme süreçlerini destekleyebilen bir yapı sergilediğini ve dolgu formülasyonlarında yüksek kimyasal saflık sunduğunu göstermektedir (Oltulu ve Şahin 2013).

Çizelge 4. 1 Harç malzemelerinin kimyasal sonuçları

İçerik	Beyaz Çimento (%)	Traverten Tozu (%)	Nano Bor (%)	Nano Kalsit (%)
SiO ₂	21,6	0,32	5,2	0,28
Al ₂ O ₃	4,05	0	0,16	0,11
Fe ₂ O ₃	0,26	0	0,044	0,009
CaO	65,1	53,96	27,14	54,9
MgO	1,3	0,25	2,74	1,1
SO ₃	2,3	0	0,16	0,02
K ₂ O	0	0	0	1,02
Na ₂ O	0	0,32	0,2	-
P ₂ O ₅	0	0	0,14	0,01
SrO	0	0	0,8	0
B ₂ O ₃	0	0	40,23	0
KK	5,3	44,62	23,17	42,5
Toplam	99,91	99,47	99,98	99,95

Eser miktarda K₂O (%1,02) ve MgO (%1,1) bulunması, hidratasyonu olumsuz etkilemeden işlenebilirlik ve priz özelliklerinde hafif değişikliklere katkıda bulunan küçük yardımcı mineralleri akla getirmektedir (Krishnan vd. 2021). Bunun aksine, nano-bor katkı maddesi, kalsiyum açısından zengin dolgu maddelerinden farklı, benzersiz bir kimyasal bileşime sahiptir. Oldukça yüksek B₂O₃ içeriği (%40,23) ile bu malzeme, polimer modifiyeli sistemlerde puzolanik ve çapraz bağlama davranışlarıyla bilinen bor bazlı bileşikler sunmaktadır (Davraz 2015).

CaO içeriği (%27,14) ve orta düzeydeki kızdırma kaybı (%23,17), karışık bir karbonat-borat yapısına işaret ederken, MgO (%2,74) ve SrO (%0,8) varlığı, mikroyapısal gelişimi etkileyebilecek ek mineral fazlarını yansıtmaktadır. Yüksek CaO (%53,96) ve orta düzeyde SiO₂ (%5,2) ile karakterize edilen traverten tozu, doğal olarak gözenekli bir karbonat malzemedir. Düşük safsızlık seviyeleri ve nispeten yüksek kızdırma kaybı (%44,62), ağırlıklı olarak kalsitik yapısını vurgulayarak, ince mikro yapısı sayesinde dolgu penetrasyonunda potansiyel iyileştirmeler sunabilmekte ve çimento esaslı matrislerle uyumlu olabilmektedir.

Çizelge 4.1'e göre çalışmada kullanılan malzemelerin kimyasal analiz sonuçları, dört malzemenin de (beyaz çimento, nano kalsit, nano bor ve mikronize traverten) çimento

esaslı traverten dolgularda kullanım için uygun bileşimlere sahip olduğunu göstermektedir. Değişen CaO içerikleri, karbonat yapıları ve spesifik fonksiyonel oksitleri (özellikle nano-bor içindeki B_2O_3), traverten onarım uygulamalarında bağlanmayı, mikro yapısal inceliği ve mekanik kararlılığı artıran özel dolgu formülasyonlarına olanak sağlayabilecek belirgin performans avantajları sağlayabilmektedir (Kasar vd. 2022).

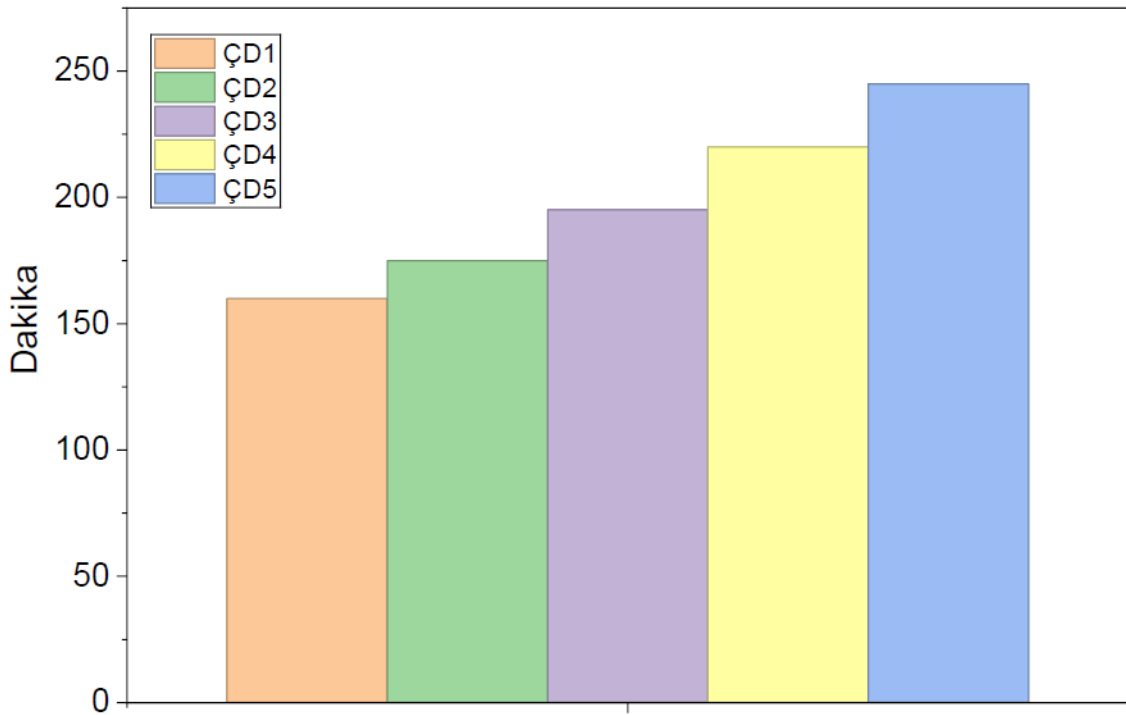
4.2 Harç Karışımlarının Hidrolik Özellikleri

Traverten levhalardaki boşlukları doldurmak için kullanılan dolgu harcı, temelde beyaz çimento, traverten tozu, nano kalsit ve nano bor ilavesiyle modifiye edilmiş çimento esaslı bir bağlayıcıdır. Bu tür katkı maddesi ilaveleri hidrolik özellikleri etkilemektedir. Hidratasyon kinetiği, priz süresi, hacimsel kararlılık ve su talebi/su tutma davranışının bilinmesi önemlidir (Li ve Cao 2024). Bu farklı etkileri ve özellikle hidrolik performansın çimento harcı dolgu içeriğine bağlı olarak nasıl değiştiğini öğrenmek, dolgulu levhaların neme, mekanik yüklere ve muhtemelen harç ile taş arasında farklı hareketlere maruz kalabileceği olasılığını da göz önünde bulundurarak, harcın tatmin edici bir performans sergileyip sergilemediğinin belirlenmesinde kilit önem taşıyacağı düşünülmektedir.

Bu tez çalışmasında, traverten levhalar içindeki boşlukları doldurmak için geliştirilen çimento esaslı bir dolgu harcının hidrolik davranışı detaylı olarak değerlendirilmiştir. Harçlar, ana bağlayıcı olarak beyaz çimento kullanılarak formüle edilmiş olup, traverten tozu, nano-bor ve nano-kalsitin farklı oranlardaki birleşik etkileri, prizlenme özellikleri, hacimsel stabilite ve suyla ilgili davranış üzerindeki etkileri araştırılmıştır.

Traverten tozu oranının %5'ten %25'e, nano-bor ve nano-kalsit oranlarının ise orantılı olarak (%1'den %5'e) artırılmasıyla beş farklı karışım grubu (ÇDH1, ÇDH2, ÇDH3, ÇDH4 ve ÇDH5) hazırlanmıştır. Özellikle harcın düşük gözenekli doğal taş yüzeylerle doğrudan temas halinde olduğu uygulamalar için, mineral dolgu maddesi içeriğinin ve nano-modifiye edicilerin erken hidratasyon kinetiği ve uzun vadeli hidrolik performans üzerindeki etkisi hedeflenmiştir.

Vicat aleti ile gerçekleştirilen çimento kıvam ve priz süresi tayinlerinden elde sonuçlar, tüm karışımların toz bileşimleriyle tutarlı, belirgin ve sistematik eğilimler sergilediğini göstermiştir. Düşük ve orta düzeydeki traverten tozu (ÇDH1, ÇDH2 ve ÇDH3) katkılı karışımlar, yüksek traverten tozu katkılı karışımlara (ÇDH4 ve ÇDH5) nispeten hızlı başlangıç ve bitiş priz süreleri göstermiştir. Bu numunelerde, ince öğütülmüş CaCO_3 parçacıkları ile çimento hidrasyon ürünleri arasındaki etkileşim, belirgin bir çekirdeklenme etkisi yaparak erken aşamalarda C-S-H oluşumunu ve büyümesini hızlandırdığı öngörülmüştür (Yeo vd. 2023). Bu durum, söz konusu harçların aşırı su ihtiyacı olmadan erken sertlik geliştirmesini sağlamış ve bu seviyelerdeki mineral ilavelerinin çimento matrisiyle sinerjik etki ettiğini düşündürmüştür. Bu üç karışım arasında en düşük dolgu oranına sahip olan ÇDH1 karışımı en kısa başlangıç priz süresini göstermiştir. ÇDH2 ve ÇDH3 karışımları taş restorasyonu ve levha dolgusunda yerinde uygulama için kabul edilebilir priz sürelerini korumuştur (Şekil 4.1).

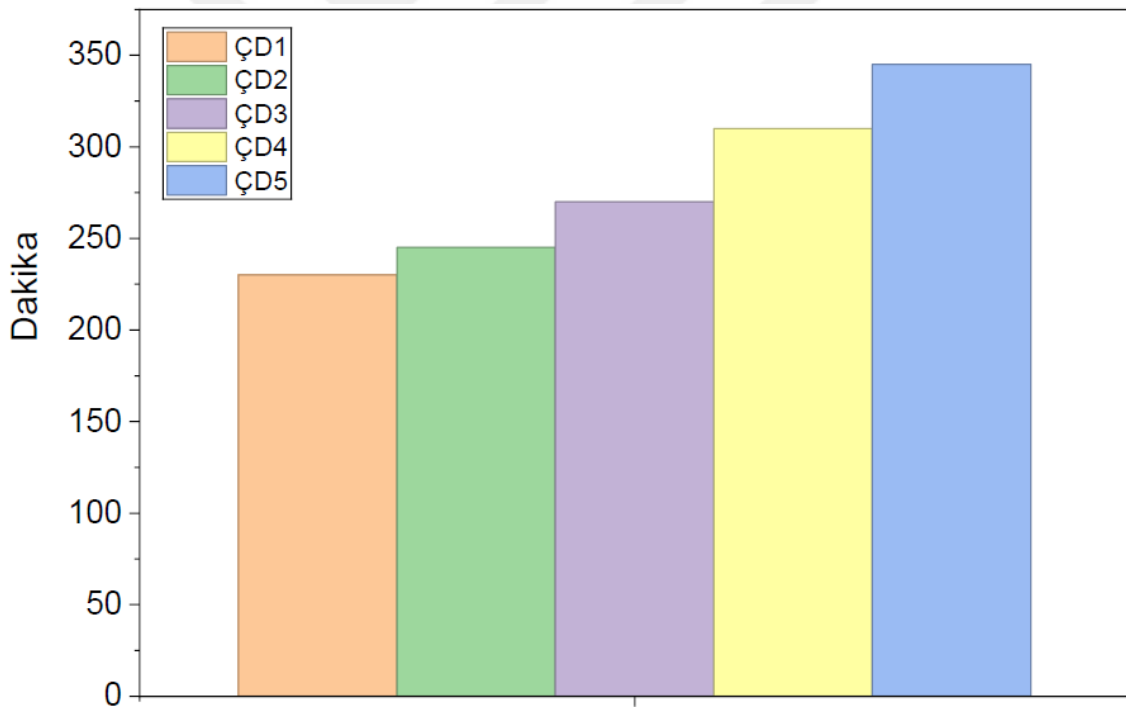


Şekil 4. 1 Çimento dolgu pasta örneklerinin priz başlangıç süreleri

ÇDH4 ve ÇDH5 karışımlarında ters bir eğilim görülmüştür. Traverten tozu ve nano katkı maddelerinin oranındaki artış, ağırlıklı olarak uzun prizlenme sürelerine sahip aktif klinker fazlarının daha belirgin bir şekilde seyrelmesini sağlamıştır. Reaktif faz

miktarındaki azalma, düşük katkılı karışımlarda ortaya çıkan hızlanma etkisinin, çimento içeriğindeki azalmayı dengeleyemediğine işaret etmektedir (Pacewska ve Wilińska 2020).

%65 oranında beyaz çimento içeren ÇDH5 numunesi, hidrasyon ürünlerinin gelişiminin görece yavaş ilerlemesi nedeniyle incelenen karışımlar arasında en uzun prizlenme süresi sergilemiştir (Şekil 4.2). Bu durum, uygulama aşamasında hedeflenen plastisite seviyesine ulaşılabilmesi için ÇDH4 numunesiyle birlikte nispeten daha fazla işlem ve ayarlamaya ihtiyaç duymaktadır. ÇDH4 ve ÇDH5 karışımları yavaş prizlenme özelliklerine rağmen, her iki karışım da işlenebilirliğini korumuş ve nihayetinde yapısal bütünlük için yeterli sertliğe ulaşmıştır. Ancak daha yavaş hidrasyon süreçleri, erken yaşlarda kontrollü kürlenme ihtiyacını düşündürmektedir.

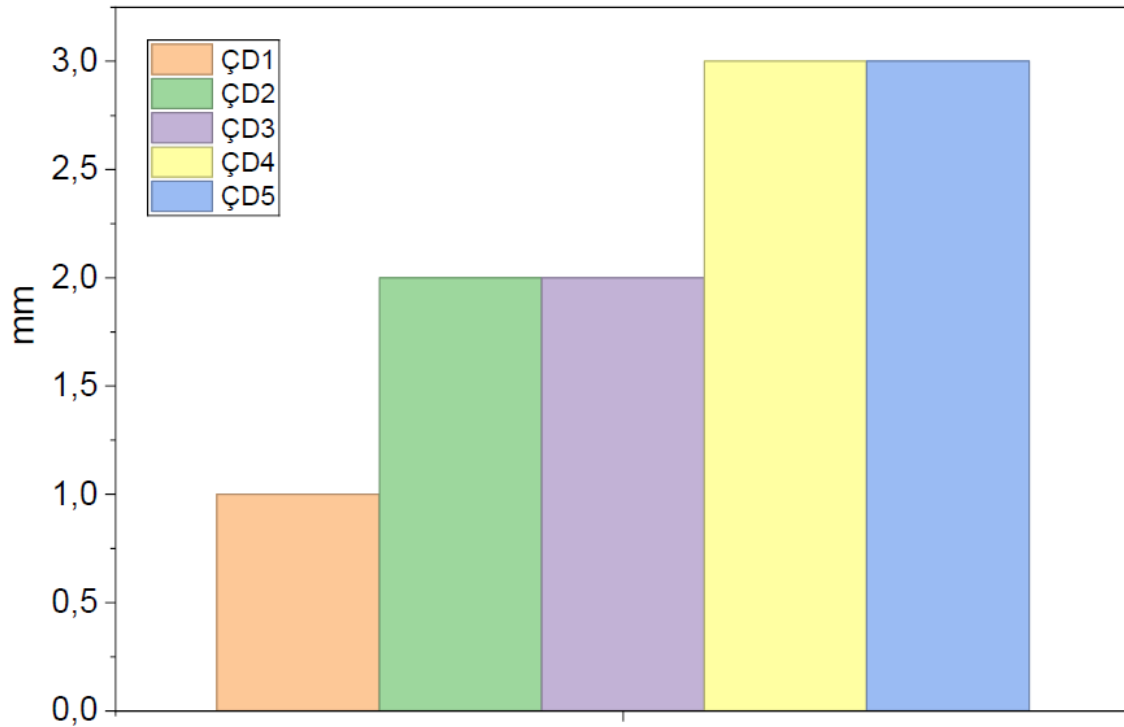


Şekil 4. 2 Çimento dolgu pasta örneklerinin priz bitiş süreleri

Priz süresi sonuçları, nano-borun hidrasyon kinetiği üzerindeki baskın etkisini göstermektedir. Nano-borun dozajı %1'den %5'e çıktıkça, ilk priz süresi yaklaşık 160 dakikadan 245 dakikaya, son priz süresi ise 230 dakikadan 345 dakikaya yükselmektedir. Bu gecikme, bor içeren bileşiklerin erken aşama C_3S ve C_3A

hidratasyonunu engelleyerek etkili geciktiriciler olarak hareket ettiğine dair yerleşik bulgularla uyumludur. Karbonat dolgu maddeleri ek çekirdeklenme alanları sağlayarak gecikmeyi kısmen dengelemekte; ancak hızlandırıcı etkileri, nano-borun güçlü geciktirici etkisinin gerisinde kalmaktadır. Matris boyunca priz sürelerindeki kademeli ve kontrollü artış ise katkı maddelerinin uyumsuzluğa yol açmadığını ve hidratasyonun tüm yer değiştirme seviyelerinde düzgün ilerlediğini göstermektedir (Zhao vd. 2020).

Çimento dolgu pastalarının hacimsel genleşme değerlendirmeleri, örneklerin hidrolik performansı hakkında daha fazla bilgi sağlamıştır. Hacim değişimi sonuçları, karışımların dolgu içeriğine bağlı olarak farklı performansa sahip olduklarını göstermiştir (Şekil 4.3). ÇDH2 ve ÇDH3 karışımları hidratasyon sırasında minimal genleşme ve çok hafif bir büzülme göstermiş, boyutsal değişimler ise standartlar dahilinde kalmıştır. İnce traverten tozu ve nano-kalsitin mikroyapısal yoğunlaştırmaya katkıda bulunduğu, kılcal gözeneklerin boyutunu küçülttüğü ve nem kaynaklı deformasyonu sınırladığı görülmüştür. Ayrıca, nano-borun homojen dağılımı, özellikle ÇDH2 ve ÇDH3 karışımlarında mikro çatlakların yayılmasını sınırlayarak harcın yapısal kohezyonunu iyileştirmiştir (Bhojaraju ve Ouellet-Plamondon 2025).

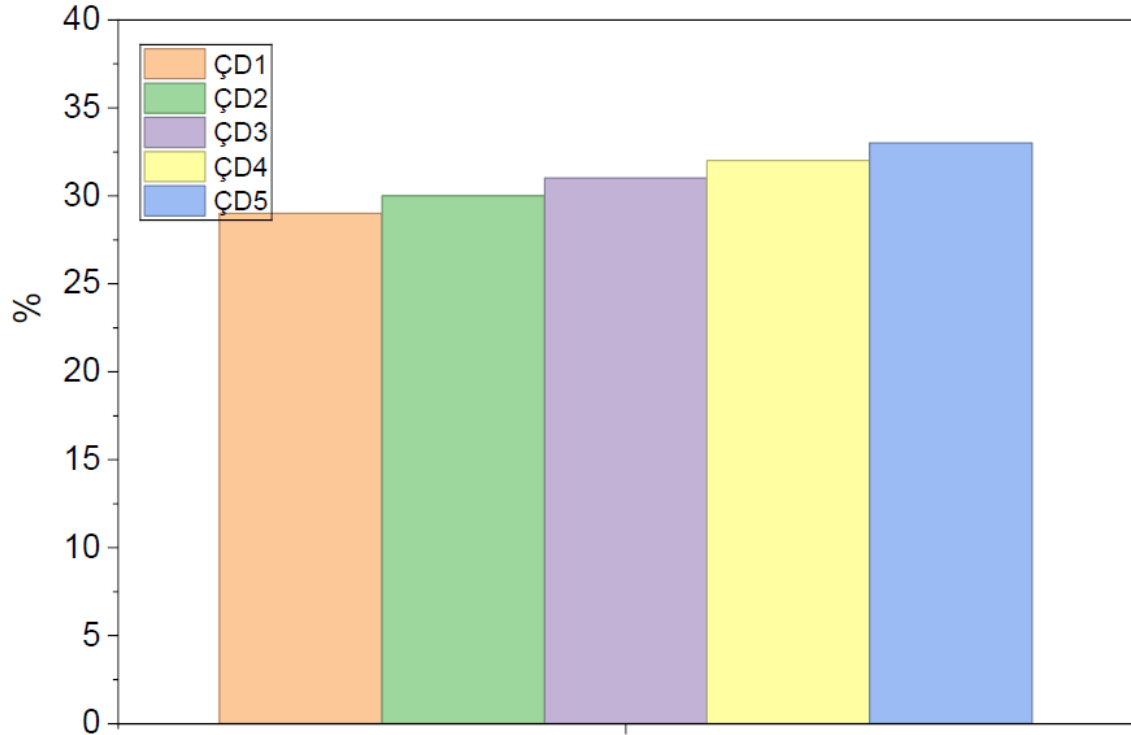


Şekil 4. 3 Çimento dolgu pasta örneklerinin hacimsel genleşme miktarları

Hacimsel genleşme değerlerinin tüm karışımlar için 1-3 mm arasında kaldığı tespit edilmiştir. Bu durum, ilgili standartlarca belirlenen sınırlar dahilinde tatmin edici bir boyut kararlılığına işaret etmektedir. Ne traverten esaslı dolgu maddesi ne de nano mineral katkı maddeleri, anormal genleşmeye neden olabilecek aşırı serbest kireç, serbest magnezya veya genleşen yan ürünler oluşturmadığı görülmüştür. Çimento dolgusu pasta örneklerinin hidrolik davranışları, hacimsel performansını istikrarlı bir şekilde koruduğu bilinen tipik kireçtaşı dolgulu veya nano karbonat modifiyeli sistemlerle tutarlıdır (Saidu ve Lawal 2020). Genel olarak veriler, katkı maddesi içeriğinin artmasının hidrasyon kinetiğini ve su ihtiyacını değiştirmesine rağmen, karışımların yapısal bütünlüklerini koruduğunu ve çimento esaslı dolgu sistemlerinde kullanım için temel kriterleri karşıladığını göstermektedir. Ancak, ÇDH4 ve ÇDH5 karışımları, diğer pasta örneklerine göre daha yüksek hacimsel değişim göstermiştir. Zararlı bir genleşme veya bozucu çatlama gözlenmezken, bu karışımlar nem dalgalanmalarına karşı daha fazla hassasiyet göstermektedir.

Dolgu harçlarının su muhtevası, ÇDH1'den ÇDH5'e doğru gidildikçe belirgin bir artış eğilimi göstermektedir (Şekil 4.4). Çimento dolgu harçlarının su ihtiyacı %29'dan %33'e yükselmiştir. Yüksek mineral dolgu malzemesi sonucu ince taneli karbonat bazlı dolgu maddelerinin (traverten tozu ve nano-kalsit gibi) yüzey alanını artırdığı ve dolayısıyla karıştırma suyu ihtiyacını yükselttiği yönündeki literatürdeki bilgilerle tutarlıdır (Li ve Cao 2024). Nano-minerallerin ultra ince parçacık boyutu bu etkiyi güçlendirerek adsorpsiyon kapasitesini artırmakta ve hamur reolojisini değiştirmesine rağmen, su yüzdeleri modifiye edilmiş çimento hamurları için kabul edilebilir sınırlar içinde kalarak işlenebilirlik sorunlarına yol açmamaktadır (Song ve Li 2021).

Artan katkı maddesi içeriği mikroyapısal iyileştirmeye fayda sağlasa da reaktif çimento fraksiyonlarındaki azalma nedeniyle daha yüksek etkili su-bağlayıcı oranına sahip bir matris oluşmuş ve bu durum, kontrollü su içeriği sağlanmadığında kılcal gözenekliliği artırabilmektedir (Lafhaj vd., 2006). Genel olarak çimento dolgusu, hidrolik özellikleri açısından doğal taş uygulamalarında tolere edilebilir sınırlar içinde kalmış ve yüksek dolgu seviyelerinde dahi uygun kütleme, aşırı büzülme veya kararsızlık risklerini büyük ölçüde azaltmıştır.



Şekil 4. 4 Çimento dolgu pasta örneklerinin su muhteviyatları

4.3 Gri Çimento Esaslı Harçların Ön Çalışma Kapsamında İncelenmesi

Bu çalışma, beyaz çimento esaslı dolgu harçlarının traverten yüzeylerdeki performansını belirlemeyi amaçlamaktadır. Bununla beraber, geliştirilen dolgu yaklaşımının farklı bağlayıcılardaki etkinliğini ölçmek için ilk aşamada, beyaz çimento yerine gri Portland çimentosu ile ön testler yapılmıştır. Bu kapsamda, gri Portland çimentosu kullanılarak nano-kalsit, nano-bor minerali ve mikronize traverten tozu içeren beş farklı dolgu harcı karışımı (ÇDH1, ÇDH2, ÇDH3, ÇDH4 ve ÇDH5) hazırlanmış ve farklı ebatlara sahip traverten plaka örnekleri üzerinde uygulanmıştır.

Karışımlar, gri çimento oranının kademeli olarak azaltıldığı ve traverten tozu, nano-bor ile nano-kalsit içeriklerinin kontrollü şekilde artırıldığı bir seri olarak tasarlanmıştır (Çizelge 4.2). ÇDH1'den ÇDH5'e doğru ilerleyen bu tasarım, bağlayıcı matris içinde mineral ve nano ölçekli katkı maddelerinin birlikte kullanımından kaynaklanabilecek etkileşimleri sınırlayarak, katkı maddesi oranlarındaki değişimin mikroyapısal gelişim ve potansiyel performans üzerindeki etkilerini daha net ortaya koymayı amaçlamıştır.

Çizelge 4. 2 Ön çalışma kapsamında hazırlanan harç karışımları

Karışım Kodu	Gri Çimento (%)	Traverten Tozu (%)	Nano Bor (%)	Nano Kalsit (%)
ÇDH1	93	5	1	1
ÇDH2	86	10	2	2
ÇDH3	79	15	3	3
ÇDH4	72	20	4	4
ÇDH5	65	25	5	5

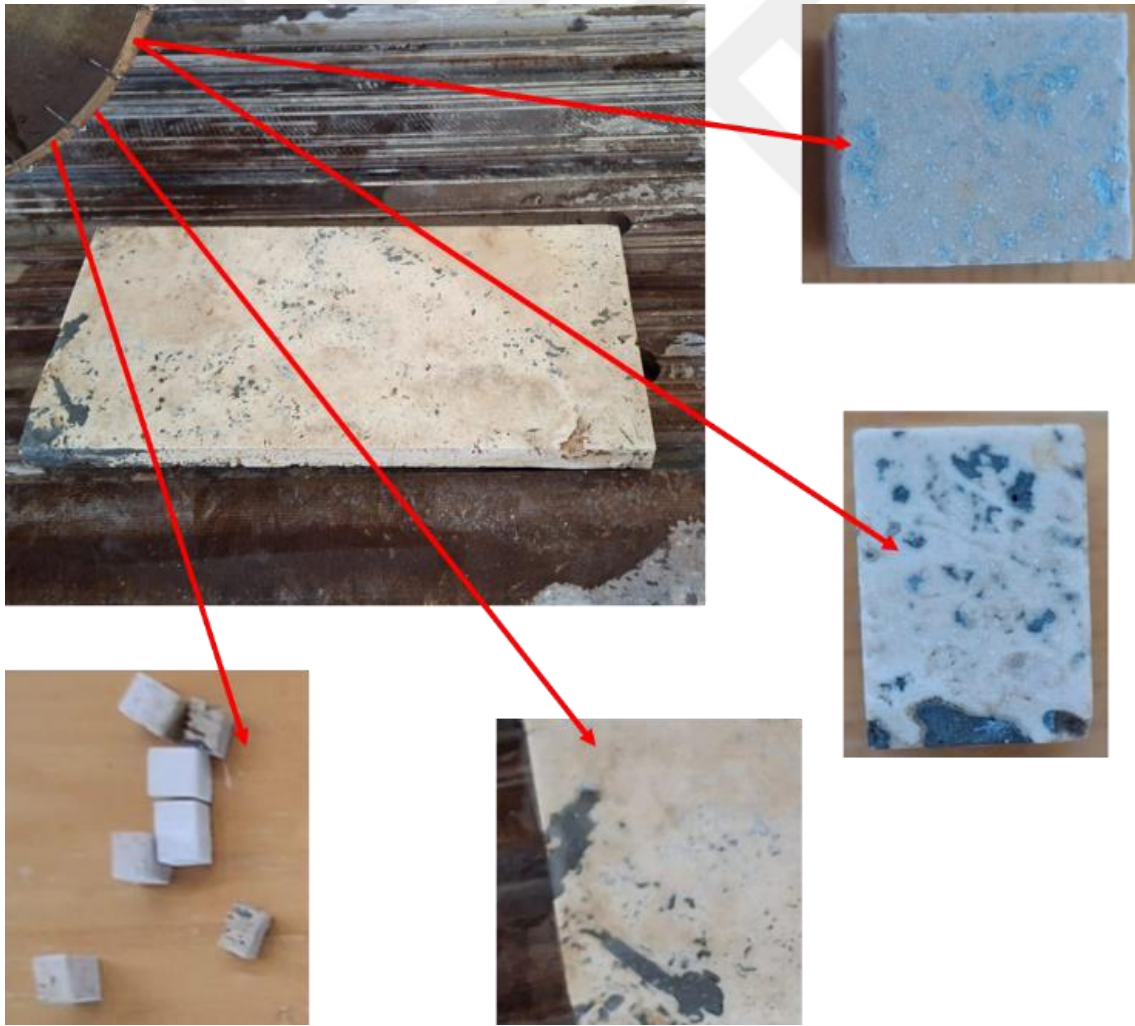
Uygulama aşamasında, düşük katkı oranına sahip ÇDH1 ve ÇDH2 karışımlarının klasik çimento esaslı dolgulara benzer bir işlenebilirlik sergilediği, ancak gri çimentonun doğal koyu tonu nedeniyle dolgu bölgelerinin traverten yüzeyde belirgin biçimde ayırt edilebilir olduğu gözlemlenmiştir (Resim 4.1). Buna karşın, diğer karışımlarda traverten tozu oranının artmasıyla birlikte dolgu–taş ara yüzeyinde renk geçişlerinin nispeten yumuşadığı, dolgu alanlarının daha dengeli bir dağılım sergilediği belirlenmiştir. Ayrıca, gri çimentonun baskın renk etkisinin tamamen ortadan kaldırılamadığı ve estetik uyumun beyaz çimento esaslı sistemlere göre sınırlı kaldığı değerlendirilmiştir.



Resim 4. 1 Gri çimentolu dolgu harcının deney örneklerine uygulanması

Reolojik açıdan bakıldığında, nano-kalsitin artışıyla birlikte dolgu harcı kohezyonunun ve boşluklara nüfuz kabiliyetinin iyileştiği, özellikle ÇDH3, ÇDH4 ve ÇDH5 karışımlarında mikro ve makro boşlukların doldurulduğu gözlemlenmiştir. Nano-bor katkısının hidratasyon sürecini etkileyerek priz sürelerini uzattığı, bu durumun uygulama sırasında dolgunun daha kontrollü yayılmasına olanak tanıdığı belirlenmiştir (Davraz 2015). Ancak nano-bor oranının yükseldiği ÇDH4 ve ÇDH5 karışımlarında, erken yaş sertleşmenin beyaz çimento sistemlerine kıyasla daha düzensiz ilerlediği ve yüzey bitirme işlemlerinde dikkatli kür kontrolü gerektirdiği belirlenmiştir.

Elmas testere ile kesilen gri çimento esaslı kompozit dolgu harçlı traverten örneklerinde, dolgu-taş arayüzü yüksek mekanik ve yapısal bütünlük göstermiş; kesme sırasında ve sonrasında dökülme ya da kırılma gözlenmemiştir (Resim 4.2).

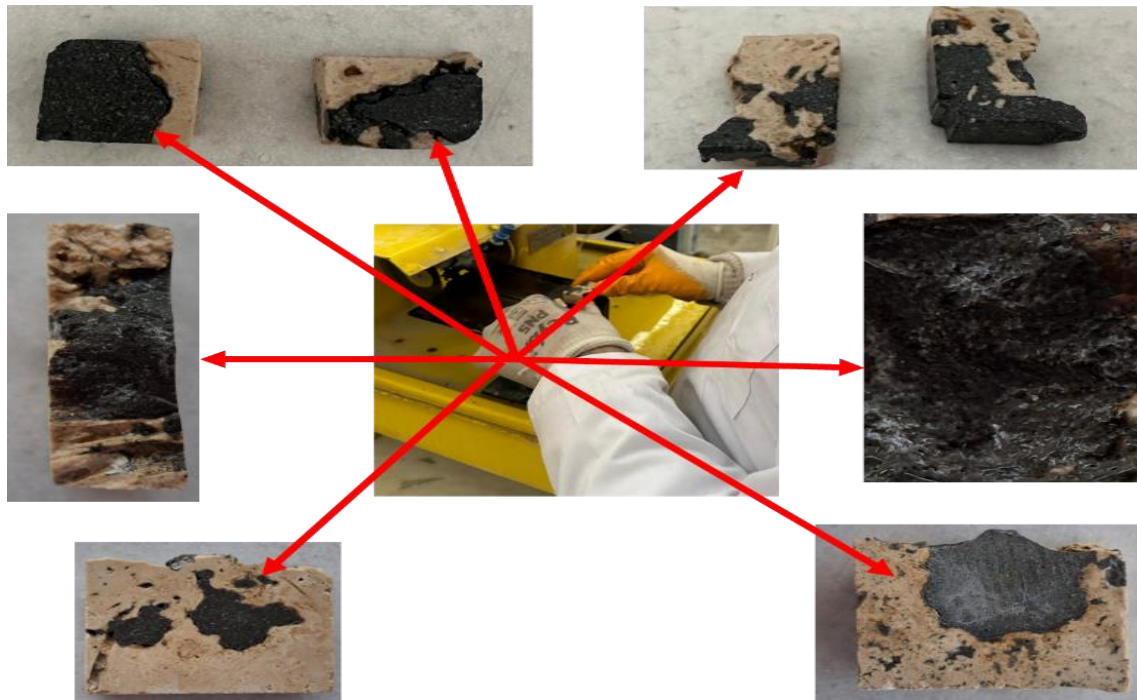


Resim 4. 2 Gri çimento dolgulu işlenmiş deney örneklerinin kesilmesi

Dolgu malzemesi, traverten yüzeyiyle bütünleşerek güçlü ve dayanıklı bir bağ oluşturmaktadır. Alınan kesitlerde fazın homojenliğini koruduğu ve elmas testere ile oluşturulan yüksek kesme gerilimlerinde ayrılmadığı; traverten matrisi ile bütünleşik bir kompozit yapı gibi davrandığı belirlenmiştir. Ayrıca, kenar bölgelerde arayüz zayıflığını gösteren çatlak veya boşluk gözlemlenmemiş; gri çimentonun travertenin gözenekli yapısına etkin bir şekilde nüfuz ettiği ve mekanik kenetlenmeyi sağladığı görülmüştür.

Kesme işleminden sonra alınan örneklerde dolgu malzemesinde herhangi bir parçalanma gözlenmemiştir. Bu, malzemenin taş gövdesiyle uyumlu ve dayanıklı bir bağlayıcı faz görevi görmesinin yanı sıra yüzey kaplaması olarak da işlev gördüğünü ve kompozit dolgu uygulamasını hem bilimsel hem de pratik açıdan desteklediğini göstermektedir. Ayrıca, bu harcın traverten gibi doğal taşlarda kesme ve şekillendirme işlemlerine karşı yeterli yapışma ve iç bağ dayanımı sağladığı belirlenmiştir.

Ön çalışma kapsamında yapılan yüzey gözlemleri, gri çimento esaslı dolgu harçlarının mekanik olarak traverten boşluklarına yeterli düzeyde bağlandığını ve kür sonrası herhangi bir ayrılma, kabarma veya belirgin hacimsel genişleme göstermediğini ortaya koymuştur (Resim 4.3 ve Resim 4.4).

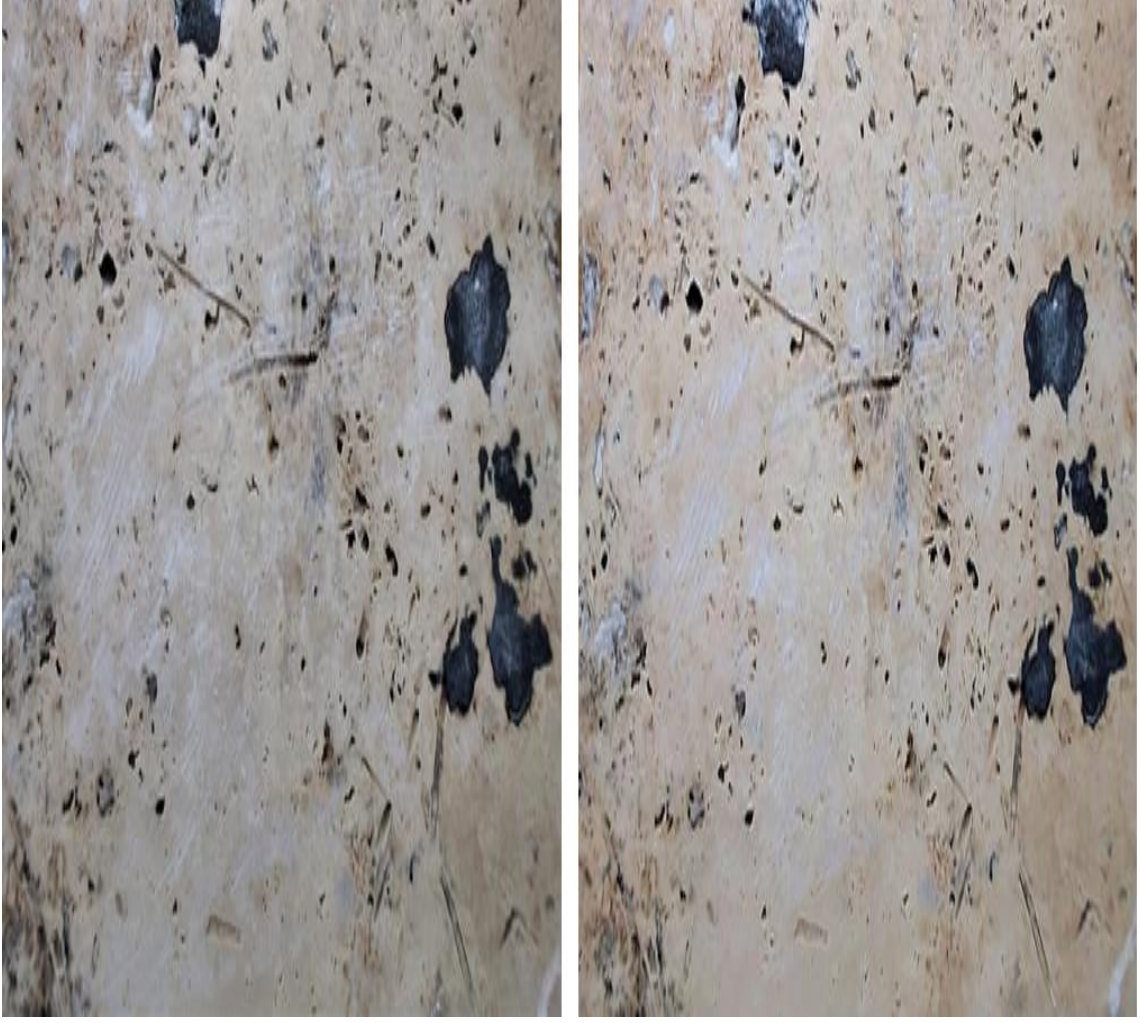


Resim 4. 3 Gri çimento dolgulu işlenmiş deney örneklerinin kesitleri



Resim 4. 4 Gri çimento dolgulu işlenmiş deney örneklerinin yüzeyleri

Cilalama ve parlatma aşamalarında, gri çimento esaslı dolguların doğal traverten yüzeyi ile aynı parlaklık seviyesine ulaşmakta zorlandığı, dolgu alanlarında matlaşma eğiliminin daha belirgin olduğu görülmüştür. Bu durum, gri çimentonun mineralojik ve renk karakterinin estetik performans üzerinde belirleyici bir rol oynadığını göstermektedir (Resim 4.5).



Resim 4. 5 Gri çimentolu dolgunun pürüz giderme işlemi sonrasındaki görünümü

Sonuç olarak, gri çimento kullanılarak gerçekleştirilen bu ön çalışma, geliştirilen nano-mineral katkılı dolgu yaklaşımının mekanik açıdan uygulanabilir olduğunu; ancak estetik uyum, renk bütünlüğü ve parlatılabilirlik açısından beyaz çimento esaslı sistemlerin daha avantajlı olduğunu ortaya koymuştur.

Elde edilen bulgular, gri çimento esaslı karışımların özellikle yapısal dolgu gerektiren, estetik beklentinin ikincil planda olduğu uygulamalar için uygun olabileceğini, buna karşılık traverten yüzeylerde görsel bütünlüğün öncelikli olduğu durumlarda beyaz çimento esaslı dolgu harçlarının tercih edilmesi gerektiğini göstermektedir (Resim 4.6). Bu nedenle gri çimento ile yapılan çalışmalar, ön deneme ve karşılaştırma amacıyla gerçekleştirilmiş olup, ayrıntılı performans analizleri beyaz çimento esaslı sistemler üzerinden sürdürülmüştür.



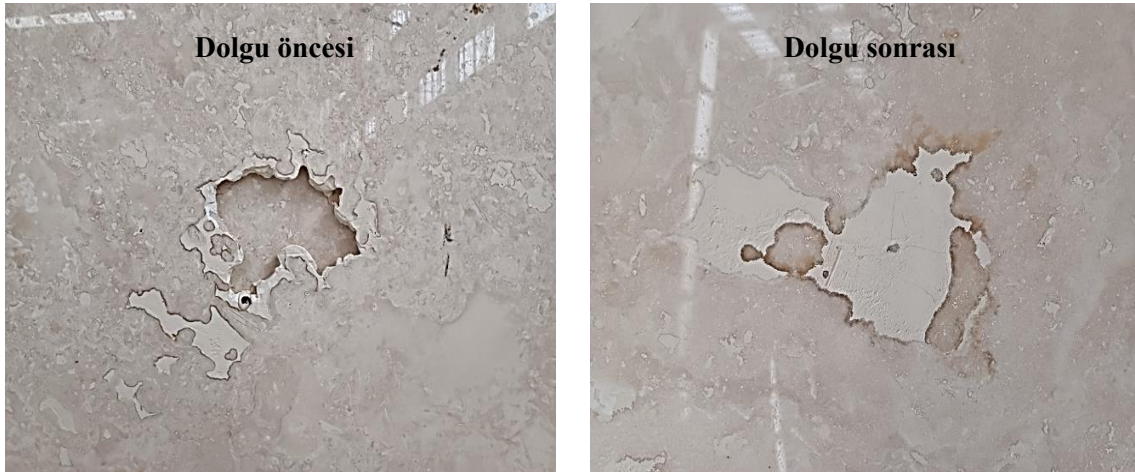
Resim 4. 6 Gri çimento dolgulu cilalanmış deney örnekleri

4.4 Beyaz Çimento Esaslı Dolgu Harçlarının Uygulanması

Bu bölümde, nano-kalsit, nano-bor minerali ve mikronize traverten tozu ile modifiye edilmiş beyaz çimento bazlı dolgu harçlarının (ÇDH1, ÇDH2, ÇDH3, ÇDH4 ve ÇDH5) traverten yüzeylere uygulanabilirliğinin, taze özellikleri, prizlenme davranışı, yayılabilirlik, yapışma performansı ve işleme sonrası yüzey bütünlüğü açısından akademik bir değerlendirmesi yer almaktadır. Laboratuvar ölçeğinde gerçekleştirilen deneysel çalışmalar ve endüstriyel uygulamalardan elde edilen gözlemler, farklı katkı maddesi kombinasyonlarının reolojik davranış, boşluk doldurma verimliliği ve dolgu harcının traverten matrisiyle uyumluluğu üzerindeki etkilerini ele almaktadır.

4.4.1 ÇDH1 Karışımının Uygulanması

Bileşiminde %93 çimento, %5 traverten tozu, %1 nano-bor ve %1 nano-kalsit bulunan ÇDH1 karışımı, yüksek çimento içeriği nedeniyle klasik çimento esaslı dolgu davranışına yakın bir performans sergilemiştir (Resim 4.7). Uygulama sırasında yeterli işlenebilirlik sağlanmış ve harcın, traverten yüzeylerdeki makro boşluklara etkin şekilde nüfuz ettiği gözlemlenmiştir.



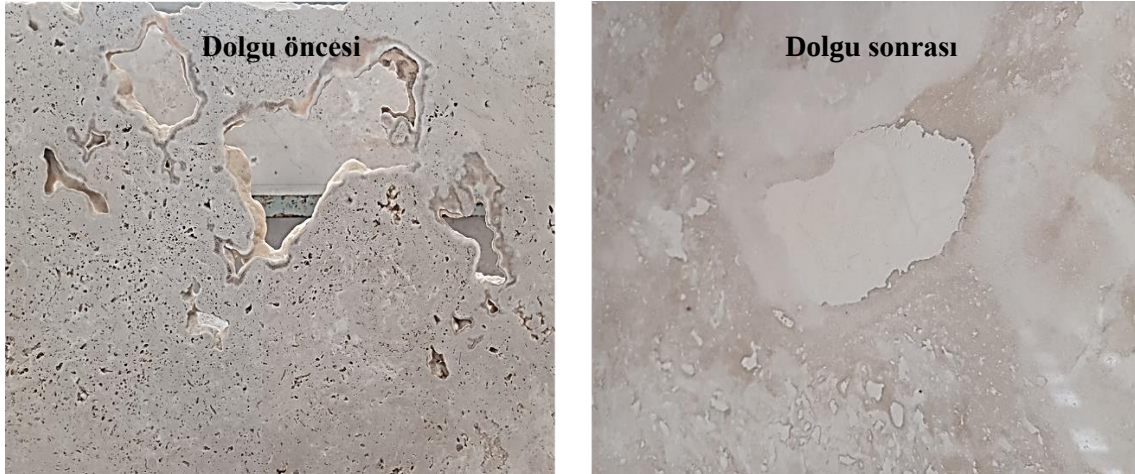
Resim 4. 7 ÇDH1 karışımı uygulanmış deney örneği

Nano-kalsit ve nano-borun düşük oranlarda bulunması, hidrasyon kinetiğini sınırlı ölçüde etkilemiş, dolgu harcı, erken yaşta yeterli dayanım kazanırken ani priz veya rötre çatlakları oluşturmamıştır. Ancak traverten tozu oranının düşük olması nedeniyle renk

uyumu sınırlı kalmış ve özellikle koyu tonlu traverten yüzeylerde dolgu bölgeleri kısmen ayırt edilebilir nitelikte olmuştur. Bu karışım, yapısal bütünlüğün öncelikli olduğu ancak estetik gereksinimlerin ikincil planda kaldığı uygulamalar için uygun görülmektedir.

4.4.2 ÇDH2 Karışımının Uygulanması

Bileşiminde %86 çimento, %10 traverten tozu, %2 nano-bor ve %2 nano-kalsit bulunan ÇDH2 karışımında traverten tozu ve nano-mineral oranlarının artırılması, dolgunun hem reolojik davranışını hem de yüzey uyumunu belirgin biçimde iyileştirmiştir (Resim 4.10). Nano-kalsitin sağladığı yüksek özgül yüzey alanı sayesinde harç, travertenin düzensiz iç boşluklarına daha homojen bir şekilde yayılmış, mikronize traverten tozu ise dolgu-taş ara yüzeyinde daha dengeli bir renk geçişi sağlamıştır (Resim 4.8). Nano-bor katkısı, hidrasyon sürecini kontrollü biçimde yavaşlatarak uygulama sırasında yeterli zaman sunmuş, sertleşme sonrasında ise kompakt bir mikro yapı elde edilmesine katkıda bulunmuştur. ÇDH2 hem traverten hem de açık renkli traverten yüzeyler için dengeli bir dolgu alternatifi olarak değerlendirilmiştir.

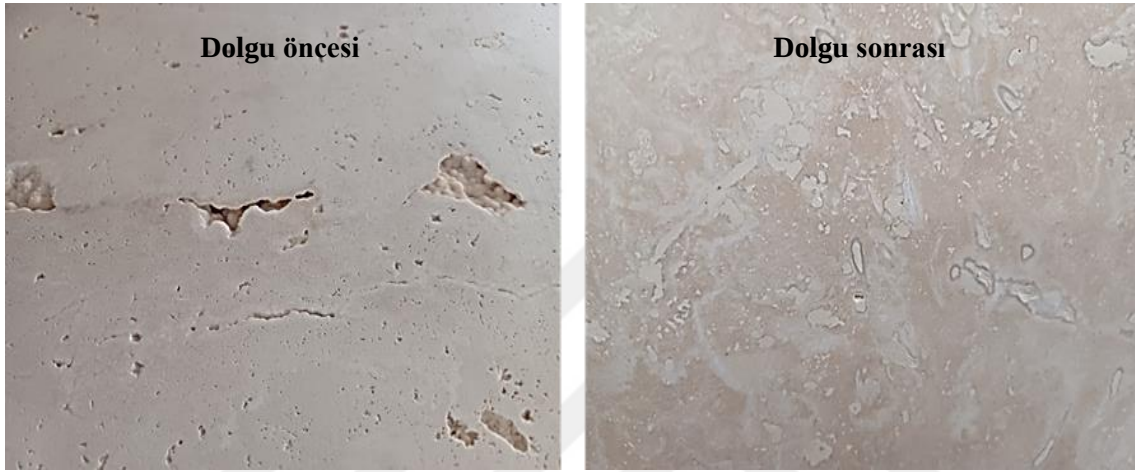


Resim 4. 8 ÇDH2 karışımı uygulanmış deney örneği

4.4.3 ÇDH3 Karışımının Uygulanması

Bileşiminde %79 çimento, %15 traverten tozu, %3 nano-bor ve %3 nano-kalsit bulunan ÇDH3 karışımı, çimento ikame oranının belirginleştiği ve nano-mineral katkıların

etkisinin baskın hâle geldiği bir kompozisyon sunmaktadır (Resim 4.9). Ancak bu reçetede nano-bor ve nano-kalsitin her birinin %3 seviyesine çıkarılması, dolgu harcının priz alma süresini anlamlı ölçüde uzatmış ve özellikle saha uygulamalarında işlenebilirlik açısından çeşitli zorluklara yol açmıştır. Artan nano-mineral yüzey alanı, karışımın su bağlama kapasitesini yükselterek hidrasyon kinetiğini yavaşlatmış, bu durum dolgunun nihai sertleşme süresinin uzamasına neden olmuştur.



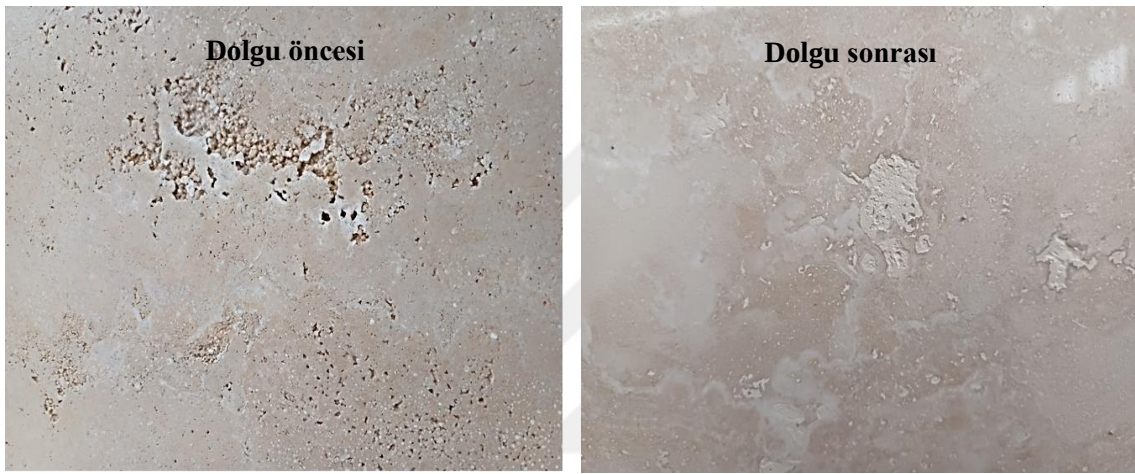
Resim 4. 9 ÇDH3 karışımı uygulanmış deney örneği

Priz gecikmesine bağlı olarak, dikey ve eğimli yüzeylerde uygulama süresinin uzaması, ardışık kat uygulamalarında bekleme gereksinimini artırmış ve üretim verimliliğini olumsuz etkilemiştir. Bununla birlikte, traverten tozu oranının %15'e çıkarılması dolgu bölgelerinin çevre taş dokusuyla renk ve doku uyumunu belirgin biçimde artırmış ve nano-kalsit ve nano-borun birlikte etkisiyle dolgu-taş ara yüzeyinde güçlü bir mekanik kilitlenme sağlanmıştır. Bu yönüyle ÇDH3, estetik ve mikro-yapısal uyum açısından avantaj sağlamakla birlikte, uzayan priz süresi nedeniyle hızlı ve seri uygulamaların gerekli olduğu endüstriyel traverten dolgularında sınırlı bir kullanım potansiyeline sahiptir.

4.4.4 ÇDH4 Karışımının Uygulanması

Bileşiminde %72 çimento, %20 traverten tozu, %4 nano-bor ve %4 nano-kalsit bulunan ÇDH4 karışımı, çimento ikame oranının ileri düzeye ulaştığı ve nano-mineral katkı miktarlarının kritik eşik değerleri aştığı bir kompozisyonu temsil etmektedir (Resim

4.10). Bu reçetede nano-bor ve nano-kalsitin her birinin %4 seviyesine çıkarılması, dolgu harcının hidrasyon sürecini belirgin biçimde baskılamış ve priz alma süresinin aşırı derecede uzamasına neden olmuştur. Artan nano-mineral yüzey alanı ve buna bağlı yüksek su adsorpsiyonu, çimento tanelerinin etkin hidrasyonunu sınırlandırmış, bu durum erken yaş mukavemet kazanımını geciktirmiştir (Dong vd. 2022). Priz gecikmesi nedeniyle dolgu harcı, uygulama sırasında yeterli erken rijitlik kazanamamış ve özellikle dikey ve eğimli yüzeylerde akma, kenar yuvarlanması ve yer yer segregasyon eğilimi gözlenmiştir.



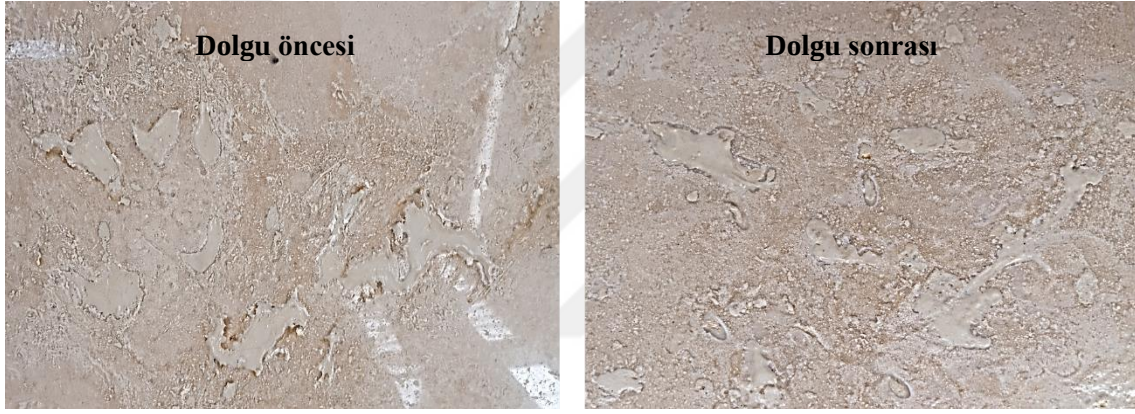
Resim 4. 10 ÇDH4 karışımı uygulanmış deney örneği

Traverten tozu oranının %20'ye yükselmesi, dolgu harcının renk ve doku açısından çevre taşla uyumunu artırmakla birlikte, bağlayıcı fazın sürekliliğini zayıflatmış ve dolgunun iç yapısında kohezyon kaybına yol açmıştır. Nano-borun hidrasyon geciktirici etkisi ile nano-kalsitin aşırı ince dolgu davranışı birleştiğinde, dolgu-taş ara yüzeyinde beklenen mekanik kilitlenme yeterli düzeyde gelişmemiştir. Bunun sonucunda, sertleşme sonrası mikroyapıda heterojen bölgeler oluşmuş, yüzey taşlama ve parlatma işlemleri sırasında dolgu bölgelerinde yerel kopmalar ve kenar bozulmaları meydana gelmiştir.

Bu olumsuzluklar dikkate alındığında, ÇDH4 karışımının hızlı priz, yüksek erken dayanım ve seri üretim gerektiren endüstriyel traverten dolgu uygulamaları için uygun olmadığı, ancak yalnızca deneysel sınırları tanımlamak amacıyla değerlendirilmesi gereken bir üst-limit reçete niteliği taşıdığı sonucuna varılmıştır.

4.4.5 ÇDH5 Karışımının Uygulanması

Bileşiminde %65 çimento, %25 traverten tozu, %5 nano-bor ve %5 nano-kalsit bulunan ÇDH5 karışımında, çimento ikame oranı maksimum düzeye ulaşmış ve nano-mineral katkıları bağlayıcı sistem üzerinde baskın hâle gelmiştir (Şekil 4.11). Nano-bor ve nano-kalsitin her birinin %5'e çıkarılması, çimento hidratasyonunu ciddi şekilde aksatmış ve priz süresinin kabul edilebilir sınırların ötesine uzamasına yol açmıştır. Aşırı artan özgül yüzey alanı ve yüksek su adsorpsiyon kapasitesi, bağlayıcı fazın sürekliliğini zayıflatmış; karışımın erken yaşlarda yeterli rijitlik kazanamaması uygulama sırasında ciddi işlenebilirlik problemlerine yol açmıştır.



Resim 4. 11 ÇDH5 karışımı uygulanmış deney örneği

Traverten tozu oranının %25'e yükselmesi, dolgu harcının agrega benzeri davranışını belirginleştirmiş; bağlayıcı–dolgu oranının bozulması sonucu karışım kohezyonunu büyük ölçüde kaybetmiştir. Bu durum özellikle dik ve eğimli yüzeylerde belirgin akma, kenar dağılması ve bazı bölgelerde boşluk oluşumu ile kendini göstermiştir. Nano-borun hidratasyonu geciktirici etkisi ile nano-kalsitin aşırı ince dolgu davranışı birleştiğinde, dolgu–taş ara yüzeyinde yeterli mekanik kenetlenme ve aderans gelişmemiş, sertleşme sonrası yapılan taşlama ve parlatma işlemlerinde dolgu bölgelerinde kopma, pullanma ve yüzey bütünlüğünün bozulması gözlenmiştir. Buna göre, ÇDH5 karışımının, traverten dolgularda estetik ve mekanik performans açısından uygun olmadığı, yalnızca nano-mineral katkı oranlarının üst sınırlarını tanımlamak ve olumsuz etkileri ortaya koymak amacıyla referans bir “yüksek katkı” reçetesi olarak değerlendirilmesi gerektiği sonucuna varılmıştır.

4.5 Genel Değerlendirme ve Optimum Karışımın Belirlenmesi

Bu çalışma kapsamında geliştirilen dolgu harçları, farklı çimento ikame oranları ve nano-bor ile nano-kalsit içerikleri dikkate alınarak ÇDH1'den ÇDH5'e kadar sistematik bir seri halinde incelenmiştir. Karışımlar, taze hal özellikleri (işlenebilirlik, kohezyon, tiksotropik davranış), priz alma süresi, uygulama performansı, sertleşmiş haldeki mekanik bütünlük ve yüzey işlemlerine verdikleri tepki açısından karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Elde edilen bulgular, harç tasarımı bağlayıcı faz sürekliliği ile nano-mineral katkı oranları arasında hassas bir denge olduğunu ortaya koymuştur.

ÇDH1 ve ÇDH2 karışımları, nispeten düşük çimento ikame oranları ve kontrollü nano-mineral içerikleri nedeniyle hidrasyon kinetiğini olumsuz etkilemeden uygulanabilirlik açısından yeterli performans sergilemiştir. Ancak ÇDH1 karışımı, sınırlı traverten tozu içeriği nedeniyle dolgu bölgelerinde çevre taş dokusuyla estetik uyum açısından kısmen yetersiz kalmıştır. Buna karşılık, ÇDH2 karışımında traverten tozu oranının %10 seviyesine çıkarılması, dolgu alanlarının renk ve doku bakımından doğal traverten yüzeyiyle bütünleşmesini sağlamış aynı zamanda bağlayıcı sistemin sürekliliği korunarak mekanik performanstan ödün verilmemiştir.

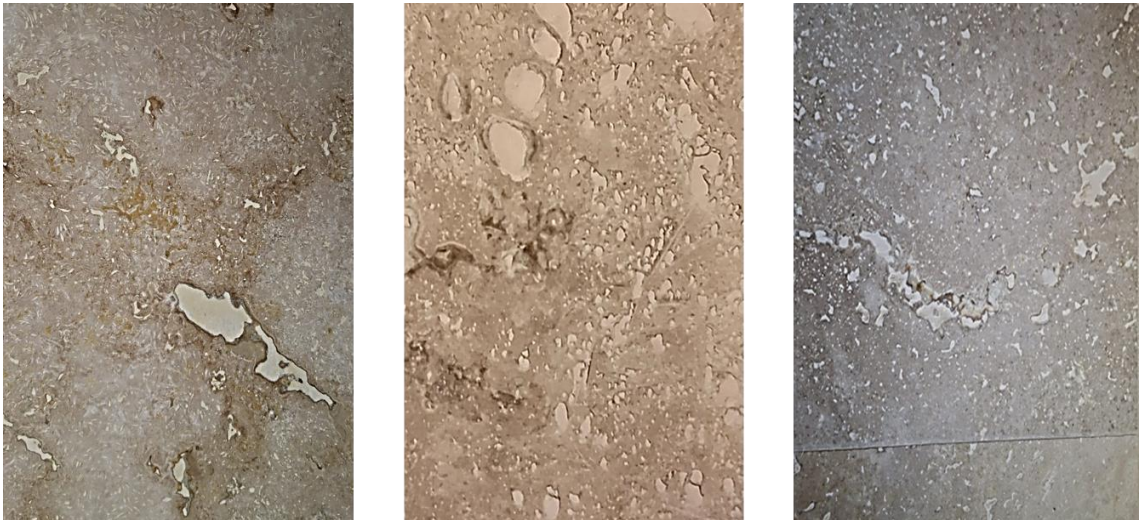
Nano-bor ve nano-kalsitin %2-%2 oranında birlikte kullanıldığı ÇDH2 karışımı, mikro ölçekte boşluk doldurma, tane paketlenmesi ve ara yüzey aderansı açısından en dengeli sonucu vermiştir. Bu katkı düzeyi, daha yüksek nano-mineral oranlarında gözlenen aşırı priz gecikmesi, su ihtiyacı artışı ve işlenebilirlik sorunlarını engellemiş, karışımın hem taze hem de sertleşmiş halde kararlı bir davranış sergilemesini sağlamıştır. Özellikle dikey ve eğimli yüzeylerde akma veya segregasyon gözlenmemesi, ÇDH2 karışımının endüstriyel uygulamalarda uygunluğunu teyit etmiştir. Buna karşılık ÇDH3, ÇDH4 ve ÇDH5 karışımlarında çimento ikame oranının artması ve nano-mineral katkıların kritik eşik değerlerin üzerine çıkması, karışım performansında belirgin olumsuzluklara yol açmıştır. Bu karışımlarda priz süresinin aşırı uzaması, erken yaş rijitlik kazanımının gecikmesi ve bağlayıcı fazın sürekliliğinin zayıflaması, uygulama sırasında akma, kenar dağılması ve yüzey bütünlüğünün bozulması gibi problemlere neden olmuştur (Resim 4.12, Resim 4.13, Resim 4.14, Resim 4.15 ve Resim 4.16).

Sertleşme sonrası taşlama ve parlatma işlemlerinde dolgu bölgelerinde kopmalar ve yüzey bozulmaları gözlenmiş, bu durum yüksek nano-mineral oranlarının dolgu harcı tasarımında sınırlayıcı bir faktör olduğunu göstermiştir.

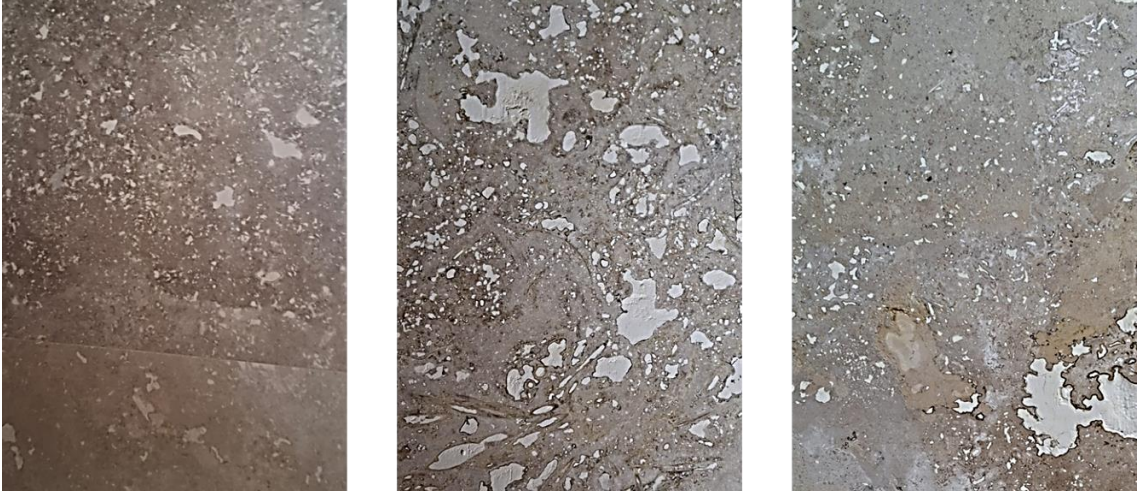
Tüm bu değerlendirmeler ışığında ÇDH2 karışımı; estetik uyum, mekanik bütünlük, uygulama kolaylığı ve endüstriyel uygulanabilirlik kriterlerini birlikte sağlayan en optimum dolgu harcı tasarımı olarak belirlenmiştir. Bu nedenle, traverten plakalardaki boşluk ve gözeneklerin doldurulmasında ÇDH2 reçetesi esas alınmış, sonraki yüzey işleme ve performans değerlendirme aşamaları karışım üzerinden yürütülmüştür.



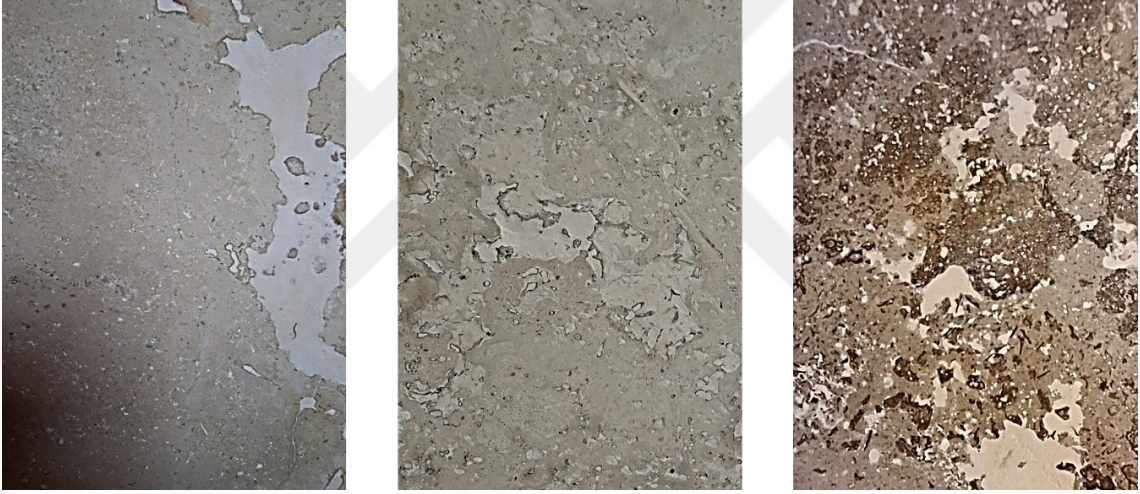
Resim 4. 12 ÇDH1 karışımı uygulanmış deney örneklerinin genel görünümü



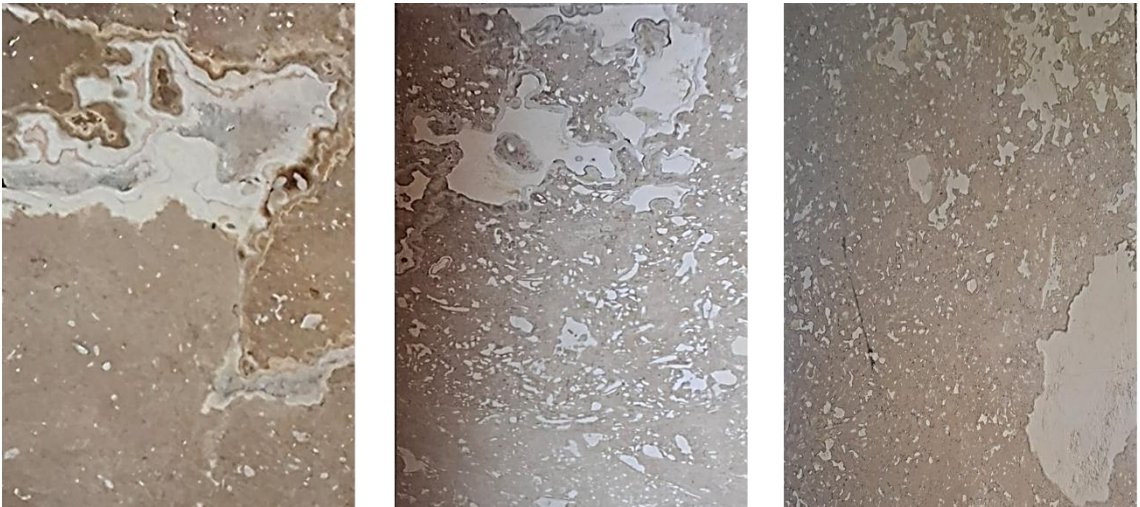
Resim 4. 13 ÇDH2 karışımı uygulanmış deney örneklerinin genel görünümü



Resim 4. 14 ÇDH3 karışımı uygulanmış deney örneklerinin genel görünümü



Resim 4. 15 ÇDH4 karışımı uygulanmış deney örneklerinin genel görünümü



Resim 4. 16 ÇDH5 karışımı uygulanmış deney örneklerinin genel görünümü

4.5 Çimento Dolgu Harçlarının Mikroyapıları

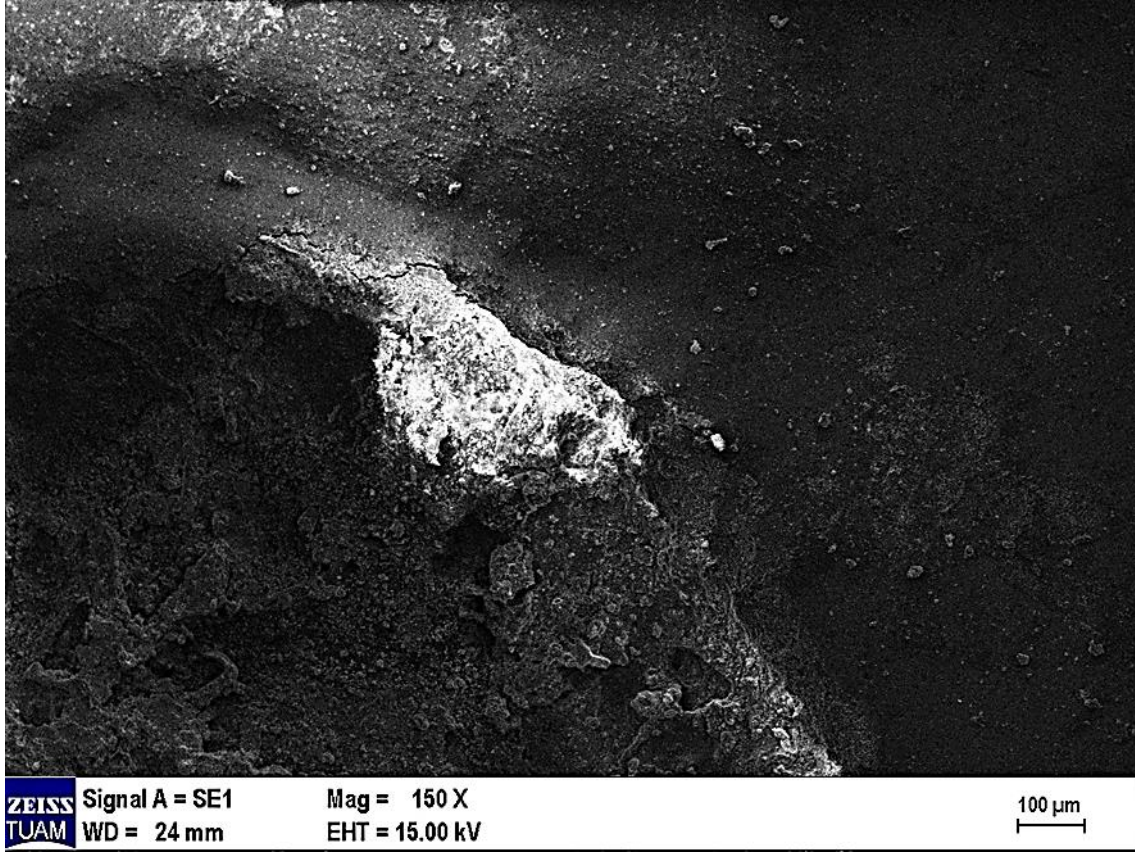
Bu çalışma kapsamında hazırlanan çimento esaslı dolgu harçlarının (ÇDH1, ÇDH2, ÇDH3, ÇDH4 ve ÇDH5) mikroyapısal özellikleri, taramalı elektron mikroskobu (SEM) analizleri ile incelenmiştir. Farklı karışım oranlarına sahip dolgu sistemlerinde, özellikle mermer yüzeyi ile çimento matrisi arasındaki etkileşimi, dolgunun ara yüzey davranışını ve hidrasyon sonucu oluşan mikroyapısal sürekliliği ortaya koymak amaçlanmıştır.

SEM incelemeleri, dolgu harcının mermer yüzeye nüfuz etme kabiliyeti, bağlayıcı matrisin yoğunluğu, porozite dağılımı ve ara yüzey geçiş bölgesinde (ITZ) meydana gelen mikroyapısal değişimleri değerlendirmek açısından önemli bilgiler sunmaktadır.

ÇDH1'den ÇDH5'e doğru ilerleyen SEM görüntüleri karşılaştırmalı olarak değerlendirildiğinde, dolgu matrisinin genel olarak hidrasyon ürünleriyle karakterize olduğu, ancak karışım içeriğine bağlı olarak porozite düzeyi, matris yoğunluğu ve kılcal-mikro çatlak oluşum eğiliminin farklılık gösterdiği belirlenmiştir. Bazı numunelerde dolgu-mermer ara yüzeyinde daha homojen ve süreklilik gösteren bir yapı izlenirken, bazı karışımlarda kuruma büzülmesi ve mikroyapısal heterojenlik kaynaklı kılcal ve mikro çatlakların oluştuğu tespit edilmiştir. Bu mikroyapısal gözlemler, ÇDH serisi dolgu harçlarının mermer plakalarda dolgu ve birleştirme performansının karışım tasarımı, bağlayıcı faz dağılımı ve kür koşulları ile yakından ilişkili olduğunu ortaya koymakta olup, tez kapsamında sunulan mekanik ve fiziksel bulguların mikroyapısal temellerini destekler niteliktedir.

ÇDH1 SEM görüntüsü (SE1 modu, 150x büyütme, yaklaşık 100 µm ölçek) incelendiğinde, çimento esaslı dolgu harcı ile mermer yüzeyi arasında belirgin bir ara yüzey bölgesinin oluştuğu görülmektedir (Resim 4.17).

SEM görüntüsünün merkezine yakın açık renkli bölge, dolgu harcının traverten yüzeyine nüfuz ettiği ve yerel olarak yoğunlaştığı bir alanı temsil etmektedir. Bu bölgenin traverten yüzeyine doğrudan temas etmesi ve keskin bir ayrılma hattı göstermemesi, dolgu malzemesinin travertenle fiziksel ve kısmen mekanik olarak bütünleştiğini düşündürmektedir.



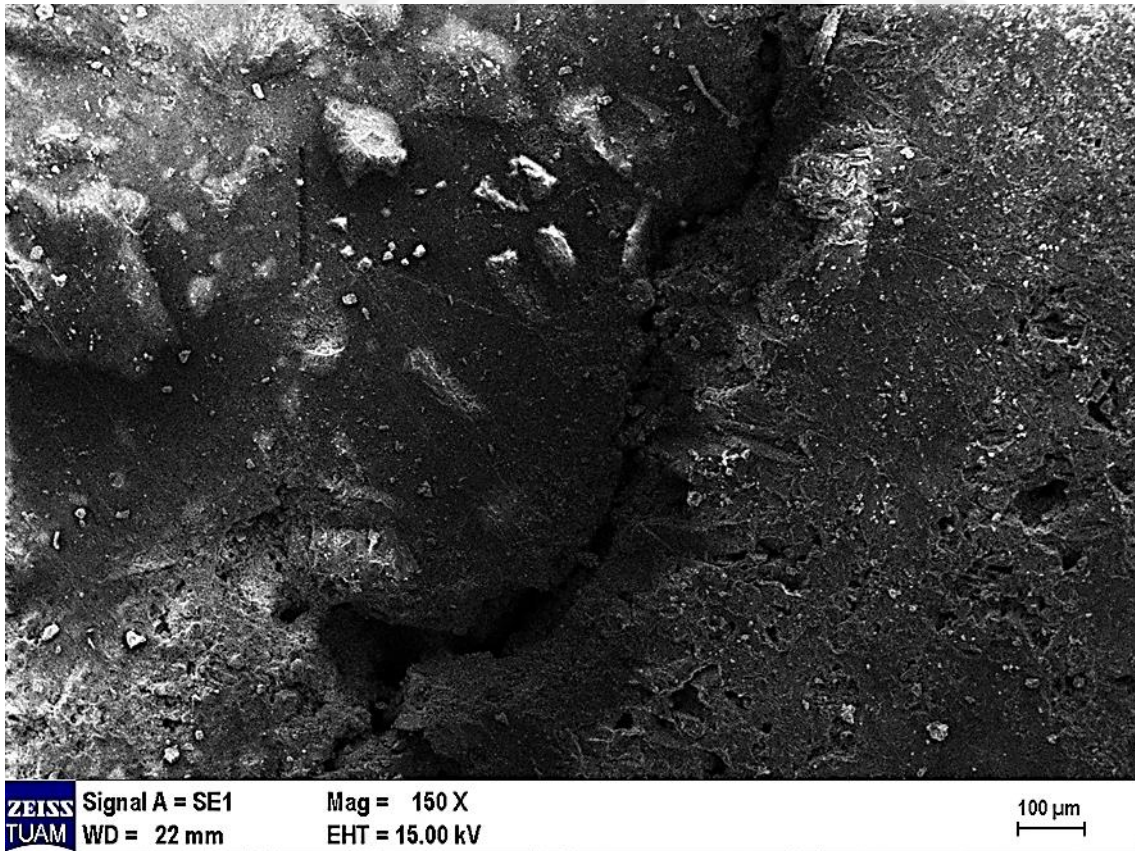
Resim 4. 17 ÇDH1 karışımı uygulanmış deney örneğinin SEM görüntüsü

Dolgu harcının mikroyapısı incelendiğinde, koyu tonlu ve daha homojen görünen alanların çimento hidratasyon ürünleriyle karakterize olduğu anlaşılmaktadır. Açık renkli ve daha pürüzlü morfolojiye sahip bölgeler ise hidratasyon ürünlerinin yoğunlaştığı veya bağlayıcı fazın yerel olarak biriktiği alanlar olarak değerlendirilmektedir. Bu yapı, dolgunun yalnızca yüzeysel bir kaplama şeklinde kalmadığını, traverten yüzeyindeki düzensizliklere uyum sağlayarak bağlayıcı bir matris oluşturduğunu göstermektedir.

Ara yüzey çevresinde yer yer düzensiz mikro boşluklar ve pürüzlü geçişler gözlenmektedir. Bu boşluklar, dolgu harcının uygulanması sırasında hava hapsi, yerel su/bağlayıcı oranı farklılıkları veya kuruma sürecinde meydana gelen mikro büzölmelerle ilişkili olabilmektedir. Ancak bu boşlukların süreklilik arz eden, travertenden dolguya ilerleyen belirgin bir çatlak yapısı oluşturmadığı görülmektedir. Bu durum, dolgu-mermer birleşiminin mikro ölçekte genel olarak stabil olduğunu göstermektedir.

Şekil 4.17’de dikkat çeken bir diğer husus, traverten yüzeyine yakın bölgede dolgu matrisinin daha yoğun ve kompakt bir yapı sergilemesidir. Bu durum, ara yüzey bölgesinde bağlayıcı fazın daha etkin çalıştığını ve traverten yüzeyinin dolgu harcı için bir tutunma yüzeyi oluşturduğunu düşündürmektedir. Dolgu malzemesinin traverten yüzey topografyasını takip etmesi, mekanik kilitlenme etkisinin varlığına işaret etmektedir.

ÇDH2’nin SEM görüntüsünde (SE1 modu, 150x büyütme, yaklaşık 100 µm ölçek), çimento esaslı dolgu harcı ile traverten yüzeyi arasında genel olarak süreklilik gösteren bir ara yüzey yapısı olduğu görülmektedir (Resim 4.18). Dolgu harcının traverten yüzeye temas ettiği bölgede belirgin ve sürekli bir ayrılma boşluğu veya kopma hattı gözlenmemekte, bu durum dolgu malzemesinin traverten yüzeyi ile yeterli düzeyde hidrolik aktivite gerçekleştirdiğini ve mekanik bağlanma sağladığını göstermektedir. Ara yüzey boyunca dolgu matrisinin traverten yüzey topografyasına uyum sağladığı ve mikro ölekte kilitlenme etkisi oluşturduğu anlaşılmaktadır.



Resim 4. 18 ÇDH2 karışımı uygulanmış deney örneğinin SEM görüntüsü

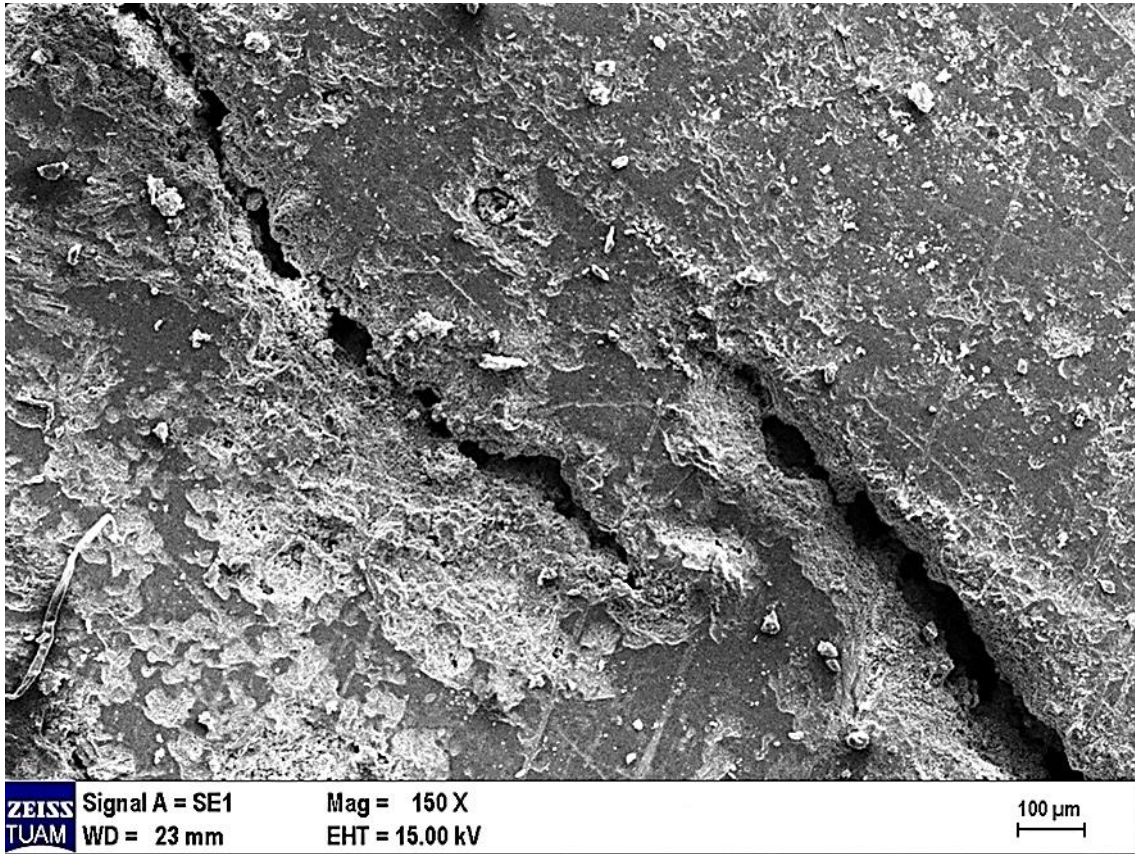
Dolgu harcının çimento matrisinde, yoğun ve nispeten homojen bir yapı hâkimdir. Koyu tonlu bölgeler, hidrasyon sonucu oluşan C–S–H jelinin baskın olduğu alanlara işaret ederken, yer yer gözlenen daha parlak ve düzensiz morfolojili oluşumlar portlandit veya ikincil hidrasyon ürünleri olarak değerlendirilebilmektedir. Bu mikro yapı, dolgunun yalnızca boşluk dolduran inert bir malzeme olmadığını, aksine bağlayıcı özellik gösteren ve traverten yüzey ile bütünleşebilen bir hidrasyon matrisi oluşturduğunu ortaya koymaktadır.

Resim 4.18'in bazı bölgelerinde, özellikle dolgu matrisinin iç kısımlarında ve ara yüzeye yakın alanlarda, düzensiz şekilli mikro boşluklar dikkat çekmektedir. Bu boşluklar genellikle onlarca mikrometre mertebesinde ve su/bağlayıcı oranının yerel farklılıkları, hava hapsi veya kuruma sürecinde meydana gelen büzülme etkileri ile ilişkilendirilebilmektedir. Bununla birlikte, bu gözeneklerin süreklilik gösteren makro çatlaklara dönüşmediği ve dolgu-mermer birleşiminin bütünlüğünü bozacak nitelikte olmadığı görülmektedir.

Bununla birlikte, travertenden dolgu harcına doğru ilerleyen belirgin bir mikro çatlak veya keskin bir kırılma yüzeyi tespit edilmemiştir. Gözlenen bazı çizgisel koyu alanların, gerçek çatlaklardan ziyade yüzey pürüzlülüğü veya numune hazırlama aşamasında oluşan yüzeysel etkilerden kaynaklandığı düşünülmektedir. Bu durum, dolgu harcı ile mermer arasındaki ara yüzeyin gevrek bir kopma davranışı sergilemediğini ve bağlanmanın mikro ölçekte sürekli bir yapıya sahip olduğunu göstermektedir.

ÇDH3'ün SEM görüntüsü (SE1 modu, 150x büyütme, yaklaşık 100 µm ölçek) dikkatle incelendiğinde, yüzey boyunca uzanan ince süreksizliklerin makro ölçekte gelişmiş çatlaklardan ziyade kılcal ve mikro çatlak karakteri taşıdığını ortaya koymaktadır (Resim 4.19). Gözlenen bu çatlaklar, dar açıklıklı, düzensiz ve sürekli olmayan bir morfolojiye sahip olup; geniş açılmış, keskin kenarlı veya tek bir kırılma düzlemi boyunca ilerleyen belirgin makro çatlak davranışı sergilememektedir. Bu bulgular, söz konusu yapıların erken evrede oluşmuş mikro ölçekli gerilme çatlakları olduğuna işaret etmektedir.

Mikro çatlakların çoğunlukla yüzey topoğrafyasını takip eden, zikzaklı ve yer yer kesintiye uğrayan bir hat boyunca ilerlediği görülmektedir. Bu morfoloji, çatlakların çimento esaslı dolgu matrisinin heterojen yapısı ve traverten-dolgu ara yüzeyine yakın bölgelerde oluşan gerilme yoğunlaşmalarıyla ilişkili olarak geliştiğini göstermektedir. Farklı elastik modüle ve büzülme davranışına sahip traverten ve çimento matrisinin birlikte çalıştığı bölgelerde, kılcal mikro çatlakların oluşması beklenen bir durumdur.

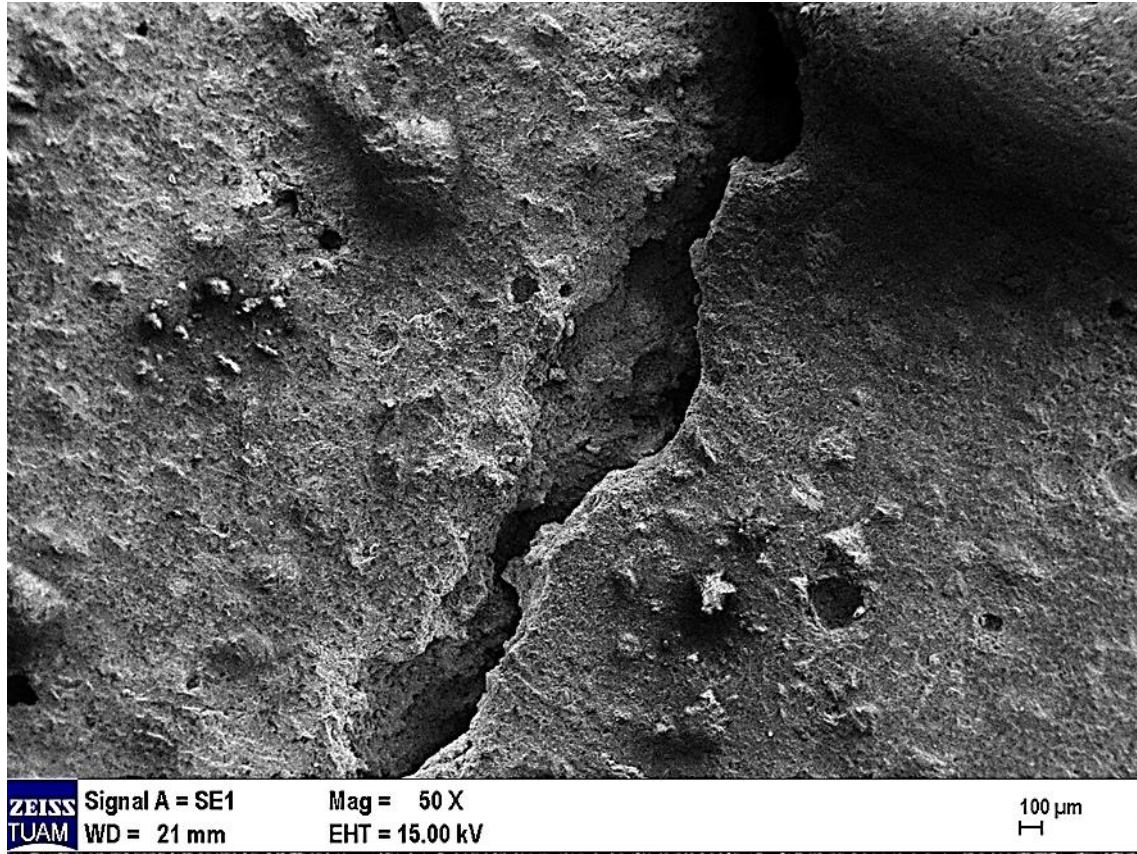


Resim 4. 19 ÇDH3 karışımı uygulanmış deney örneğinin SEM görüntüsü

Dolgu matrisinin bazı bölgelerinde çatlakların çevresinde daha pürüzlü ve granüler bir doku gözlenmektedir. Bu alanlar, çimento hidratasyon ürünlerinin yoğun olduğu ancak yerel porozitenin arttığı bölgeler olarak değerlendirilebilir. Mikro çatlakların bu gözenekli bölgeleri takip etmesi, çatlak gelişiminin zayıf bağlanmış veya daha düşük yoğunluklu mikroyapısal zonlar boyunca gerçekleştiğine işaret etmektedir. Bu durum, çatlakların kademeli gerilme birikimi sonucu oluştuğunu göstermektedir. Söz konusu kılcal ve mikro çatlakların oluşumunda, karışımın kuruma büzülmesi, su/bağlayıcı oranındaki yerel farklılıklar ve kür koşulları etkili olmuş olabilmektedir.

Traverten gibi rijit ve düşük deformasyon kapasitesine sahip bir altlık üzerine uygulanan çimento esaslı dolgularda, büzülmenin kısıtlanması sonucu mikro çekme gerilmeleri oluşabilmekte ve bu gerilmeler kılcal çatlaklar şeklinde yüzeye yansıyabilmektedir. Görüntüde çatlakların dar açıklıklı olması, bu çatlakların erken evrede durduğunu ve makro çatlaklara dönüşmediğini göstermektedir.

ÇDH4'e ait SEM görüntüsünde (SE1 modu, 50x büyütme, ~100 µm ölçek), yüzeyde belirgin şekilde oluşmuş ve kılcal-mikro çatlak niteliği taşıyan bir süreksizlik dikkat çekmektedir (Resim 4.20).



Resim 4. 20 ÇDH4 karışımı uygulanmış deney örneğinin SEM görüntüsü

Görüntünün merkezinde yer alan ve dar, uzun bir boşluk şeklinde uzanan yapı, ani ve gevrek kırılmalara işaret etmeyip, zamanla oluşmuş ve ilerlemesi sınırlı kalmış bir mikro çatlak morfolojisi sergilemektedir. Çatlak açıklığının düzensiz olması ve kenarlarının pürüzlü yapısı, bu süreksizliğin tek seferlik mekanik bir kırılma sonucu oluşmadığını düşündürmektedir.

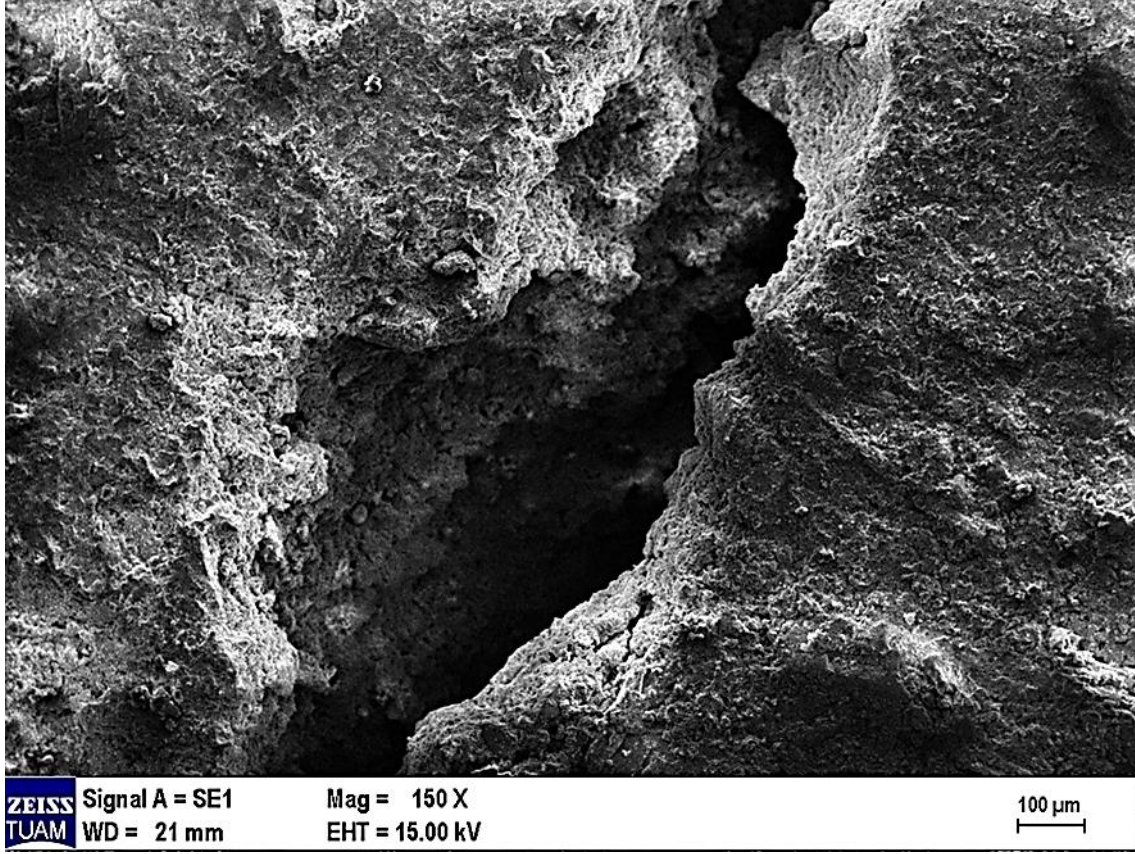
Çatlak kenarlarında gözlenen yoğun pürüzlülük ve granüler doku, çimento esaslı dolgu matrisinin heterojen mikroyapısını yansıtmaktadır. Bu bölgelerde hidrasyon ürünlerinin düzensiz dağılımı ve yerel porozite artışı göze çarpmaktadır. Mikro çatlağın, özellikle daha zayıf bağlanmış ve gözenekli bölgeleri takip ederek ilerlemesi, çatlak oluşumunun mikroyapısal zayıflıklarla ilişkili olduğunu göstermektedir. Bu durum, çatlağın bir “kopma yüzeyi” değil, gerilme birikimi sonucu gelişen kademeli bir süreksizlik olduğunu desteklemektedir. Bu tür mikro çatlakların oluşumunda en önemli etkenlerden biri, çimento esaslı dolgu harcının kuruma büzülmesi ve traverten gibi rijit bir altlık tarafından bu büzülmenin kısıtlanmasıdır.

Büzülme sırasında oluşan çekme gerilmeleri, özellikle ara yüzeye yakın veya porozitesi yüksek bölgelerde yoğunlaşarak kılcal ve mikro çatlaklar şeklinde ortaya çıkabilmektedir. Görüntüde çatlağın dar açıklıklı olması ve makro ölçekte yayılmaması, bu gerilmelerin sınırlı kaldığını ve çatlak ilerlemesinin erken aşamada durduğunu göstermektedir. Ayrıca çatlak yüzeylerinin nispeten düzensiz ve yumuşak geçişli olması, bu süreksizliğin dolgu– traverten sisteminin genel bütünlüğünü tamamen bozan bir hasar mekanizması oluşturmadığını düşündürmektedir. Çatlak, dolgu matrisinin içinde veya ara yüzeye yakın bir zayıf zon boyunca gelişmiş olup, sistem genelinde yaygın bir ayrılma veya kopma davranışı sergilememektedir.

ÇDH5’in SEM görüntüsü (SE1 modu, 150x büyütme, yaklaşık 100 µm ölçek) incelendiğinde, çimento esaslı dolgu harcının mikroyapısında genel olarak homojen ancak yer yer süreksizlikler içeren bir yapı sergilediği görülmektedir (Resim 4.21). Görüntünün merkezinde yer alan ve yüzey boyunca uzanan koyu hat, önceki görüntülerle uyumlu biçimde kılcal–mikro çatlak karakterinde bir süreksizliği temsil etmektedir. Çatlak açıklığının sınırlı olması ve düzensiz bir hat boyunca ilerlemesi, bu yapının makro ölçekte gelişmiş bir kırılma değil, mikroyapısal gerilmeler sonucu oluşmuş bir çatlak olduğunu göstermektedir.

Çatlak çevresindeki dolgu matrisinde belirgin bir pürüzlülük ve granüler doku hâkimdir. Bu durum, çimento hidrasyon ürünlerinin (özellikle C–S–H jelinin) düzensiz dağılımı ve yerel porozite ile ilişkilendirilebilir. Çatlak kenarlarının yuvarlak ve düzensiz yapısı,

söz konusu çatlağın ani bir mekanik yükleme sonucu değil kuruma büzülmesi veya uzun süreli gerilme birikimi sonucu kademeli olarak geliştiğini düşündürmektedir.



Resim 4. 21 ÇDH5 karışımı uygulanmış deney örneğinin SEM görüntüsü

Düşük büyütmede (50x) çatlağın genel yöneliminin ve sürekliliğinin izlenebilmesi, bu mikro çatlakların yüzey boyunca belirli zayıf zonları takip ettiğini ortaya koymaktadır. Bu zayıf zonlar, dolgu harcının iç yapısındaki porozite farklılıkları, bağlayıcı fazın yerel yoğunluk değişimleri veya traverten yüzeyi ile dolgu arasındaki geçiş bölgeleri ile ilişkili olabilmektedir. Bununla birlikte, çatlağın tüm alan boyunca yaygın ve ağsal bir yapı oluşturmaması, dolgu sisteminin genel bütünlüğünün korunduğunu göstermektedir.

Resim 4.21’de ayrıca, dolgu matrisinin farklı bölgelerinde izole halde bulunan küçük gözenekler ve mikro boşluklar dikkat çekmektedir. Bu boşluklar, çimento esaslı sistemlerde yaygın olarak görülen kapiler poroziteye karşılık gelmekte olup, çatlak oluşumunu tetikleyen veya yönlendiren ikincil faktörler olarak değerlendirilebilir. Ancak bu boşluklar, tek başına yapısal bir zayıflık oluşturacak boyutta değildir.

4.6 Çimento Dolgu Harçlarının Yüzey Pürüzlülüğüne Etkileri

Traverten ve mermer yüzeylerine uygulanan dolgu sistemlerinin yüzey kalitesi, yüzey pürüzlülüğü parametreleri olan Ra ve Rz değerleri üzerinden değerlendirilmiştir. Ölçümler, TS 6956 EN ISO 4287 standardı esas alınarak gerçekleştirilmiştir (TS 2004). Elde edilen veriler dolgu kompozisyonunun yüzey topoğrafyası üzerindeki etkilerini ortaya koymak amacıyla analiz edilmiştir. Karışım serileri ÇDH1'den ÇDH5'e doğru ilerledikçe beyaz çimento oranının azalması ve traverten tozu ile nano katkı oranlarının artması, yüzey pürüzlülüğünde kademeli bir artışa neden olmuştur.

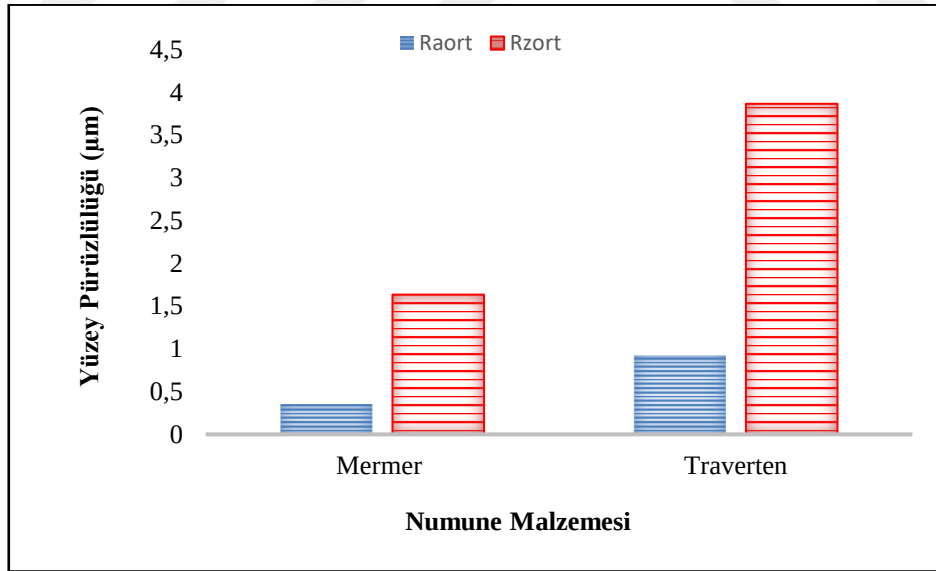
Parlatma öncesinde ve sonrasında yapılan yüzey pürüzlülüğü ölçümleri, dolgu malzemesinin yüzey performansı hakkında daha fazla bilgi sağlamaktadır. Sertleştirilmiş çimentolu sistemlerin granüler yapısı nedeniyle, dolgulu alanlardaki ilk pürüzlülük değerleri (Ra, Rz) daha yüksektir. Ancak, çok aşamalı endüstriyel taşlama ve parlatma işleminden sonra, bu değerler doğal traverten yüzeyinde ölçülen değerlerle dikkate değer ölçüde örtüşmüştür (Yavuz vd. 2011). Bu örtüşme, dolgu malzemesinin mikro yapısının, yüzey parçalanması, parçacıkların çekilmesi veya parlatma kaynaklı mikro çatlaklar olmadan önemli bir mekanik iyileştirmeye tabi tutulabilecek kadar güçlü ve kohezif olduğunu göstermektedir.

Pürüzlülükteki azalma, dolgu malzemesinin gelişmiş parçacık özelliklerine ve azaltılmış gözenek bağlantısına atfedilmektedir. Bu özelliklerin her ikisi de nano kalsit ve nano bor varlığından kaynaklandığı varsayılmaktadır. Nano kalsit, matrisin homojenliğini artırarak mermer yüzeyinin daha verimli bir şekilde pürüzsüz ve kesintisiz bir yüzey oluşturmasını sağlamaktadır. Ayrıca, nano-bor, kararlı hidratasyon ürünlerinin erken oluşumuna katkıda bulunarak sertliği ve aşınma direncini artırmaktadır. Bu birleşik etkiler, cilalama sırasında doğal taş benzer davranan bir dolgu maddesi oluşturarak yüzeyin yüksek parlaklık ve düşük pürüzlülük standartlarında bitirilmesini sağlamaktadır (Bhojaraju ve Ouellet-Plamondon 2025).

Doğal taş ve dolgulu bölgeler arasında benzer yüzey pürüzlülüğüne ulaşılması, görsel bütünlük, dokunsal tutarlılık ve uzun süreli temizlik için önemlidir. Pürüzlü yüzeyler toz

tutma eğiliminde olup, kolay lekelenmekte ve ışığı homojen şekilde yansıtılmamaktadır (Cevheroğlu vd. 2018). Bu çalışmada elde edilen sonuçlar, geliştirilen dolgu maddesinin yüksek kaliteli cilalama koşullarında travertenle eşdeğer performans göstermek için gerekli inceliği sağladığını göstermektedir. Bu, malzemenin birinci sınıf cilalı taş yüzeylerin endüstriyel ölçekte üretimi için uygunluğunu doğrulamaktadır.

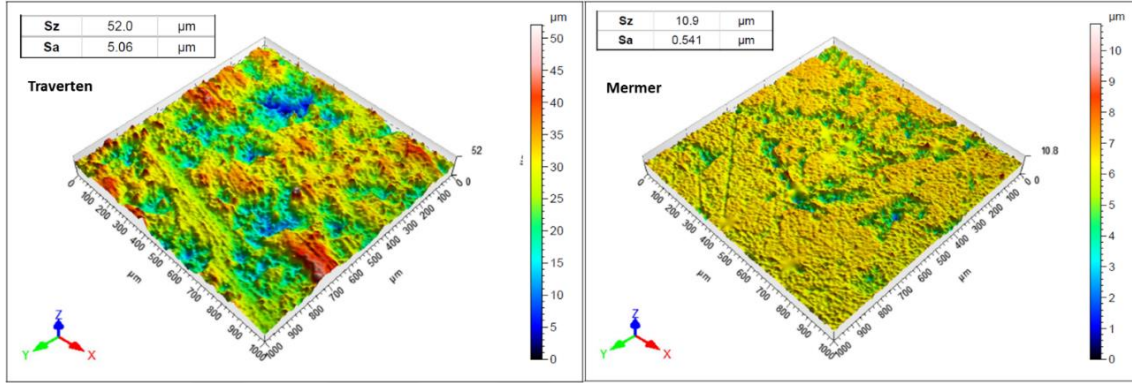
Mermer ve traverten numunelerinin yüzey topoğrafik özelliklerinin nicel olarak ortaya konulabilmesi amacıyla Time TR200 yüzey pürüzlülüğü cihazı kullanılarak ölçümler yapılmıştır. Bu ölçümler, her bir numune üzerinde 5 mm çizgisel tarama uzunluğu boyunca ve 5 µm örnekleme aralığı esas alınarak yapılmış; elde edilen yüzey profilleri üzerinden ortalama yüzey pürüzlülüğü (Ra) ile maksimum yüzey pürüzlülüğü (Rz) parametreleri hesaplanmıştır. Ölçüm tekrarlanabilirliğini ve istatistiksel güvenilirliği artırmak amacıyla, her bir numune için üçer bağımsız ölçüm alınmış olup, her malzeme türü için iki farklı numune değerlendirmeye dâhil edilmiştir. Elde edilen tüm ölçüm sonuçlarının aritmetik ortalamaları alınarak, deney numunelerinin yüzey pürüzlülüğü değerleri karşılaştırmalı olarak analiz edilmiş ve bu bulgular Şekil 4.5'te sunulmuştur.



Şekil 4. 5 Mermer ve traverten örneklerinin yüzey pürüzlülüğü analiz sonuçları

Mermer numunesinin yüzey kalitesinin, traverten numunesine kıyasla belirgin biçimde daha üstün olduğu açıkça görülmektedir (Şekil 4.5). Numuneler arasındaki yüzey kalitesi farklılığının morfolojik görünümünü daha net ve ayrıntılı biçimde ortaya

koyabilmek amacıyla, 1 mm²'lik numune yüzey alanı üzerinde 5 µm tarama adımı kullanılarak üç boyutlu yüzey tarama işlemleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen yüzey topoğrafyalarının karşılaştırmalı olarak sunulduğu Şekil 4.6'da mermer numunesinin traverten numunesine kıyasla yüzey düzensizliklerinin önemli ölçüde daha düşük olduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 4. 6 Mermer ve traverten örneklerinin yüzey pürüzlülük topoğrafyaları

Nicel analiz sonuçları, mermer numunesinin alan ortalamalı yüzey pürüzlülüğü (Sa) değerinin travertene göre yaklaşık beş kat, maksimum yüzey yüksekliği (Sz) değerinin ise yaklaşık on kat daha düşük olduğunu ortaya koyarak, mermerin yüzey bütünlüğü ve homojenliği açısından belirgin bir üstünlük sergilediğini doğrulamaktadır (Şekil 4.6).

Numuneler üzerinde gerçekleştirilen yüzey pürüzlülüğü ölçümleri neticesinde, çimento dolgu harcı içerisinde traverten toz artışın yüzey pürüzlülüğü üzerinde belirleyici bir etkiye sahip olduğu tespit edilmiştir (Çizelge 4.3).

Çizelge 4. 3 Mermer ve traverten örneklerinin yüzey pürüzlülük değerleri

Ra/Rz	Mermer					Traverten				
	ÇDH1	ÇDH2	ÇDH3	ÇDH4	ÇDH5	ÇDH1	ÇDH2	ÇDH3	ÇDH4	ÇDH5
Ra1	0,29	0,28	0,26	0,25	0,24	0,64	1,44	2,24	3,03	3,83
Ra2	0,43	0,61	0,78	0,96	1,14	1,01	0,93	0,85	0,77	0,69
Ra3	0,26	0,27	0,28	0,30	0,31	0,78	0,71	0,64	0,57	0,49
Rz1	1,29	1,19	1,09	0,99	0,89	2,56	5,40	8,24	11,08	13,92
Rz2	2,30	2,35	2,40	2,45	2,50	4,44	3,58	2,72	1,86	1,01
Rz3	1,25	1,42	1,59	1,76	1,93	4,03	3,17	2,31	1,45	0,59

Elde edilen bulgular, numune bileşiminde traverten oranının artmasına paralel olarak, yüzeydeki düzensizliklerin belirgin biçimde arttığını ve buna bağlı olarak yüzey pürüzlülüğü parametrelerinde anlamlı yükselmeler meydana geldiğini ortaya koymaktadır. Bu eğilim, özellikle ortalama yüzey pürüzlülüğü (Ra) ve maksimum yüzey pürüzlülüğü (Rz) değerlerinde gözlenen artışlarla desteklenmiş olup, traverten fazının gözenekli ve heterojen yapısının yüzey kalitesini olumsuz yönde etkilediğini göstermektedir.

Karışım serisi ÇDH1'den ÇDH5'e ilerledikçe (dolgu/nano katkı oranı arttıkça) hem Ra hem de Rz değerlerinde artış görülmektedir. Traverten dolgular, doğal gözeneklilik ve mikroyapı heterojenliği nedeniyle her karışımda mermer dolgulara kıyasla daha yüksek pürüzlülük değerleri sergilemiştir. Elde edilen Ra değerleri incelendiğinde, traverten dolgulu numunelerin tüm karışım serilerinde mermer dolgulu numunelere kıyasla daha yüksek pürüzlülük değerleri sergilediği görülmektedir. Bu durum, travertenin doğal gözenekli yapısı ve dolgu-taş arayüzeyinde oluşan mikroyapısal heterojenlik ile ilişkilendirilmektedir. Benzer eğilim Rz değerlerinde de gözlenmiş olup, özellikle yüksek dolgu oranına sahip ÇDH4 ve ÇDH5 karışımlarında maksimum profil yüksekliği belirgin şekilde artmıştır. Genel olarak değerlendirildiğinde, nano-bor ve nano-kalsit içeren dolgu sistemlerinde traverten tozu oranının artması, yüzey pürüzlülüğünü artıran temel faktörlerden biri olarak öne çıkmaktadır.

4.7 Çimento Dolgu Harçlarının Renk Uyumuna Etkileri

Çimento esaslı nano-mineral katkılı dolgu harçlarının traverten yüzeylerde oluşturduğu renk uyumu, CIELAB renk uzayı esas alınarak gerçekleştirilen kolorimetrik analizler ile değerlendirilmiştir. Bu kapsamda, dolgu uygulaması sonrası yüzey ile dolgu malzemesi arasındaki kromatik fark, toplam renk farkı (ΔE^*) parametresi üzerinden nicel olarak belirlenmiştir. ΔE^* değeri, dolgu bölgelerinin doğal taş yüzeyiyle görsel bütünlük oluşturma başarısını ortaya koyan temel bir gösterge olarak ele alınmıştır.

Kolorimetrik analiz sonuçları, optimize edilmiş dolgu karışımlarının dolgu bölgeleri ile çevreleyen traverten yüzeyi arasındaki renk farklılıklarını önemli ölçüde azalttığını

göstermektedir. Özellikle mikronize traverten atığının çimento esaslı matrise entegrasyonu bu olumlu etkinin elde edilmesinde belirleyici bir rol oynamıştır. Karışımlarda kullanılan traverten tozu, işlenen levhalarla aynı kökenden elde edildiğinden, mineralojik ve kromatik açıdan ana taşla doğal uyum sağlayarak, dolgunun geleneksel kireçtaşı veya saf kalsit esaslı çimento dolgularına kıyasla yüzeye çok daha yakın ton, renk doygunluğu ve parlaklık sunmasına olanak tanımıştır.

CIELAB renk ölçüm sonuçları, beyaz çimento–traverten tozu–nano bor–nano kalsit içeren dolgu harçlarının, dolgu öncesi doğal yüzeye kıyasla yüzey rengi üzerindeki etkisini nicel ve mekanik olarak ortaya koymaktadır (Çizelge 4.4).

Çizelge 4. 4 Traverten örneklerinin kolorimetrik analiz sonuçları

Dolgu Örnekleri	Dolgu Öncesi Ham Yüzey			Dolgu Sonrası İşlenmiş Yüzey			
	L*	a*	b*	L*	a*	b*	ΔE^*
ÇDH1	74,43	32,49	9,37	75,59	33,04	8,22	1,72
ÇDH2	74,67	34,61	8,2	76,08	33,49	7,95	1,81
ÇDH3	73,09	29,22	8,07	74,87	27,06	8,40	2,82
ÇDH4	75,48	32,18	7,9	78,47	29,76	8,98	3,99
ÇDH5	71,04	32,29	7,98	75,55	35,35	8,65	5,49

L* parametresi üzerinden yapılan değerlendirmeler, dolgu uygulaması ve yüzey cilalama işlemleri sonrasında açıklık değerlerinde minimum sapma meydana geldiğini ortaya koymuştur. Bu durum, dolgu bölgelerinin yüzeyin genel parlaklık profiliyle etkin biçimde bütünleştiğini göstermektedir. a* (yeşil–kırmızı eksen) ve b* (mavi–sarı eksen) değerleri ise dolgu ve ana taş arasında daha da yakın bir hizalanma sergileyerek, özellikle renk tonu farklılıklarının belirgin şekilde azaldığını ortaya koymuştur. Bu bulgu, sıcak tonlu ve ince renk geçişlerine sahip traverten yüzeylerde, dolgu malzemelerinin estetik uyum açısından ne denli kritik olduğunu açıkça göstermektedir. Bu sonuçlar, dolgu sonrası işlenmiş yüzeylerde oluşan renk değişiminin (ΔE) traverten ikame oranı ve nano mineral katkı dozajı ile doğrudan ilişkili olduğunu göstermektedir.

ÇDH1 numunesinin dolgu öncesi ve dolgu sonrası yüzey renk parametreleri karşılaştırıldığında, L* değerinin 74,43’ten 75,59’a yükseldiği görülmektedir. Bu artış,

dolgu harcının yüzey açıklığını sınırlı düzeyde artırdığını ve orijinal yüzey rengine yakın bir görünüm sağladığını göstermektedir. a^* değerinde gözlenen çok sınırlı artış ($32,49 \rightarrow 33,04$), kırmızı-yeşil ekseninde anlamlı bir yönelimin oluşmadığını; b^* değerindeki düşüş ise sarı ton bileşeninin kısmen baskılandığını ortaya koymaktadır. ΔE değerinin 1,72 olarak hesaplanması, dolgu sonrası yüzeyin ham yüzey ile yüksek renk uyumu sergilediğini ve renk değişiminin algılanabilirlik eşiğinin altında kaldığını göstermektedir.

ÇDH2 numunesinde, dolgu sonrası L^* değerinin 74,67'den 76,08'e yükselmesi, traverten tozu ve nano katkı oranındaki artışın yüzey açıklığını; ÇDH1'e kıyasla daha belirgin biçimde artırdığını ortaya koymaktadır. a^* değerinde dolgu sonrası gözlenen düşüş ($34,61 \rightarrow 33,49$), yüzey renginin kırmızımsı tonlardan uzaklaşarak daha nötr bir karakter kazandığını göstermektedir. b^* değerindeki sınırlı azalma, dolgunun sarı renk bileşenini baskılayıcı bir etki oluşturmadığını ve renk dengesinin korunduğunu düşündürmektedir. ΔE değerinin 1,81 olması, dolgu uygulamasının yüzey estetiğini değiştirmeden iyileştirici bir etki sağladığını ortaya koymaktadır.

ÇDH3 numunesi incelendiğinde, dolgu sonrası L^* değerinin 73,09'dan 74,87'ye yükseldiği belirlenmiştir. Bu artış, orta seviyedeki traverten tozu ve nano katkı oranının yüzey açıklığını artırmada etkin olduğunu göstermektedir. a^* değerinin dolgu sonrası azalması ($29,22 \rightarrow 27,06$), kırmızı renk bileşeninin baskılandığını ve yüzey renginin daha dengeli bir tona yöneldiğini ortaya koymaktadır. b^* değerinde gözlenen sınırlı artış, sarı ton bileşeninin büyük ölçüde korunarak renk dengesinin sürdürüldüğünü göstermektedir. ΔE değerinin 2,82 olması, dolgu sonrası oluşan renk farkının algılanabilir düzeyde olduğunu ancak doğal taş görünümü ile uyumlu kaldığını göstermektedir.

ÇDH4 numunesinde, dolgu sonrası L^* değerinin 75,48'den 78,47'ye yükselmesi, yüksek traverten tozu ve nano katkı içeriğinin yüzey açıklığını belirgin biçimde artırdığını ortaya koymaktadır. a^* değerindeki düşüş ($32,18 \rightarrow 29,76$), yüzey renginin kırmızımsı tonlardan uzaklaştığını ve daha açık renkli bir matris oluştuğunu göstermektedir. b^* değerindeki artış ($7,90 \rightarrow 8,98$) ise sarı ton bileşeninde sınırlı bir

artışa işaret etmekte olup, bu durum dolgunun yüzeyi daha etkin kaplaması ve ışık yansıma davranışındaki değişim ile ilişkilendirilebilir. ΔE değerinin 3,99 olması, dolgu uygulamasının yüzey rengi üzerinde belirgin ancak kontrollü bir değişim oluşturduğunu göstermektedir.

ÇDH5 numunesi, seride en yüksek traverten tozu ve nano katkı oranına sahip karışımı temsil etmektedir. Dolgu sonrası L^* değerinin 71,04'ten 75,55'e yükselmesi, başlangıçta daha koyu algılanan yüzeyin dolgu uygulaması ile önemli ölçüde açıldığını göstermektedir. a^* değerindeki artış (32,29 $\rightarrow$ 35,35), yüksek dolgu oranlarında yüzey mikro-topografyasının ve ışık saçılımının değişmesiyle birlikte kırmızı renk bileşeninin algısal olarak daha belirgin hâle geldiğini düşündürmektedir. b^* değerindeki artış (7,98 $\rightarrow$ 8,65) ise sarı ton bileşeninde sınırlı bir yükselmeye işaret etmekte, ancak bu artış genel renk dengesini bozacak düzeyde değildir. ΔE değerinin 5,49 olarak hesaplanması, dolgu sonrası yüzeyin orijinal yüzeye kıyasla belirgin bir renk farkı sergilediğini; ancak bu farkın, dolgu uygulamasının işlevsel ve estetik gereklilikleri kapsamında değerlendirilebilir sınırlar içerisinde kaldığını göstermektedir.

Toplam renk farkına göre renk uyumu sınıflandırması Çizelge 4.5'te verilmiştir (Sharma ve Bala 2017). Buna göre, levhalara ait toplam renk farkı değerlerinin 1,72–5,49 aralığında olması nedeniyle (Çizelge 4.4), dolgu sonrası oluşan renk farkının algılanabilir ancak estetik açıdan kabul edilebilir düzeyde olduğu belirlenmiştir.

Çizelge 4. 5 Toplam renk farkına göre renk uyumu sınıflandırması (Sharma ve Bala 2017).

Sınıf	ΔE^* (Renk Farkı)	Renk Uyumu Değerlendirmesi
A1	≤ 1	İnsan gözüyle algılanamaz
A2	1-2	Yakın gözlem yoluyla algılanabilir
A3	2-10	Bir bakışta algılanabilir
A4	10-49	Renkler zıttan daha benzer
A5	49-100	Renkler tam tersi

ÇDH1 ve ÇDH2 numunelerine ait ΔE değerlerinin 1,72–1,81 aralığında olması, dolgu uygulamasının ham traverten yüzeyiyle neredeyse tam bir renk uyumu sağladığını ve dolgunun renk açısından minimal düzeyde bir müdahale oluşturduğunu göstermektedir.

ÇDH3 ve ÇDH4 numunelerindeki ΔE değerlerinin 2,82–3,99 aralığında artış göstermesi, yüzeyde açıklık artışının belirginleştiğini ortaya koymakla birlikte, elde edilen görünümün doğal taş dokusuyla uyumlu olduğu gözlenmiştir.

ÇDH5 numunesinde ölçülen $\Delta E = 5,49$ değeri ise, yüksek traverten oranı ve nano-mineral katkı içeriğine bağlı olarak dolgu etkisinin görsel olarak daha belirgin hale geldiğini, ancak bu değişimin hâlâ kabul edilebilir sınırlar içerisinde kaldığını göstermektedir.

Tüm numuneler birlikte değerlendirildiğinde, traverten tozu ve nano bor–nano kalsit katkı oranının artmasıyla birlikte dolgu harçlarının yüzey açıklığının kademeli olarak arttığı, renk farkının ise kontrollü biçimde yükseldiği görülmektedir. Elde edilen ΔE değerleri, dolgu uygulamasının yüzey rengini tamamen değiştiren bir kaplama etkisi oluşturmadığını, yüzey görünümünü iyileştirirken doğal taş estetiği ile uyumlu bir renk karakterinin korunduğunu ortaya koymaktadır. Bu sonuçlar, çalışmada geliştirilen dolgu harçlarının renk uyumu açısından uygulanabilirliğini desteklemektedir.

5. TARTIŞMA ve SONUÇ

Bu çalışma kapsamında geliştirilen çimento esaslı nano-mineral katkılı dolgu harçları, traverten yüzeylerde estetik uyum (renk, pürüzlülük), uygulama performansı, hidrolik davranışı ve mikroyapısal gelişim açısından sistematik olarak değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, dolgu harcı tasarımında çimento ikame oranı ile nano-bor ve nano-kalsit miktarları arasında hassas bir denge bulunduğunu açık biçimde ortaya koymuştur.

Düşük ve orta düzeyde ikame oranlarına sahip ÇDH1 ve özellikle ÇDH2 karışımları, kabul edilebilir priz süreleri, yüksek işlenebilirlik, yeterli erken yaş dayanım stabilitesi ve traverten yüzeylerle yüksek renk uyumu sergileyerek hem estetik hem de mekanik açıdan dengeli bir performans sergilemiştir. ÇDH3 karışımı, artan nano-mineral içeriğine bağlı olarak hidrasyonun kısmen geciktiği bir davranış göstermesine rağmen, uygulama ve mikroyapısal bütünlük açısından kabul edilebilir sınırlar içerisinde kalmıştır. Buna karşılık, ÇDH4 ve ÇDH5 karışımlarında nano-bor ve nano-kalsit miktarlarının aşırı artırılması, priz sürelerinin standartların dışına çıkmasına, erken yaş hidrasyon mekanizmasının yavaşlamasına ve mikro yapıda kılcal çatlakların oluşmasına yol açmıştır.

Renk uyumu, yüzey pürüzlülüğü ve priz davranışı birlikte değerlendirildiğinde, yüksek ikame oranlarının traverten gibi poroz yapıya sahip doğal taşlarda estetik ve uygulama performansını olumsuz etkilediği belirlenmiştir.

Bu bağlamda, ÇDH2 karışımı (86% beyaz çimento, 10% traverten tozu, 2% nano bor, 2% nano kalsit), traverten levhaların dolgu uygulamalarında renk uyumu, uygulanabilirlik, priz süresi ve mikroyapısal kararlılık kriterlerini birlikte sağlayan en optimum dolgu harcı tasarımı olarak belirlenmiş ve doğal taş endüstrisi için teknik ve estetik açıdan uygulanabilir bir çözüm sunduğu sonucuna varılmıştır.

6. KAYNAKLAR

- Abbas M M, Muntean R, 2025, Marble Powder as a Sustainable Cement Replacement: A Review of Mechanical Properties, Sustainability, 17(2), 1-15.
- Abdaqadir Z K., Alshkane Y M, 2018, Physical and mechanical properties of metamorphic rocks. Journal of Garmian University, 5(2), 160-173.
- Al Qader H, Jasim A M, Salim H, Xing Y, Stalla D, 2022, Enhanced Mechanical and Durability Properties of Cement Mortar by Using Alumina Nanocoating on Carbon Nanofibers, Materials, 15(8), 2768.
- Al-Saffar F Y, Wong L S, Paul S C, 2023, An Elucidative Review of the Nanomaterial Effect on the Durability and Calcium-Silicate-Hydrate (CSH) Gel Development of Concrete, Gels, 9(8), 613.
- Al Qader H, Jasim A M, Salim H, Xing Y, Stalla D, 2022, Enhanced Mechanical and Durability Properties of Cement Mortar by Using Alumina Nanocoating on Carbon Nanofibers, Materials, 15(8), 2768.
- Alves C, Figueiredo C A, Sanjurjo-Sánchez J, Hernández A C, 2021, Effects of Water on Natural Stone in the Built Environment-A Review, Geosciences, 11(11), 459.
- Anaç N, Doğan Z, 2023, Effect of Organic Powders on Surface Quality in Abrasive Blasting Process, Processes, 11(7), 1925.
- Anonim₁, 2025, Manual TR-200: Surface Roughness Tester, Innovatest Europe BV.
- Anonim₂, 2025, Teknik Katalog PCE-XXM 20 Renk Ölçüm Cihazı, PCE Instruments.
- Arab M A E S, Mohamed A S, Taha M K, Nasr A, 2025, Microstructure, Durability and Mechanical Properties of High Strength Geopolymer Concrete Containing Calcinated Nano-Silica Fume/Nano-Alumina Blend, Construction and Building Materials, 472, 140903.
- Arnal F, Dias L, Mirão J, Pires V, Sitzia F, Martins S, vd., 2023, Chemical Composition of Hydrophobic Coating Solutions and Its Impact on Carbonate Stones Protection and Preservation, Sustainability, 15(22), 16135.

- Aslam M, 2017, *Marble and Granite: Characteristics and Properties*, Butterworth-Heinemann, Oxford.
- ASTM D2244, 2017, *Standard Practice for Calculation of Color Tolerances and Color Differences from Instrumentally Measured Color Coordinates*, ASTM Pennsylvania.
- Avdelidis N P, Delegou E T, Almond D P, Moropoulou A, 2004, Surface Roughness Evaluation of Marble by 3D Laser Profilometry and Pulsed Thermography, *NDT & E International*, 37(7), 571–575.
- Baghloul R, Babouri L, Hebhouh H, Boukhelf F, El Mendili Y, 2024, Assessment of Mechanical Behavior and Microstructure of Unsaturated Polyester Resin Composites Reinforced with Recycled Marble Waste, *Buildings*, 14(12), 3877.
- Bağrıaçık B, Mahmutluoğlu B, Ürünveren A, 2025, A Comprehensive Study on the Assessment of CaCO_3 -, Nano- CaCO_3 -, and Glass Fiber Chopped Strand (GFCS)-Treated Clay in Terms of Bearing Capacity and Settlement Enhancements, *Applied Sciences*, 15(14), 7779.
- Bhojaraju C, Ouellet-Plamondon C M, 2025, Boosting Cement Hydration with Boron Nitride Nanotubes, *Cement and Concrete Composites*, 157, 105894.
- Bigerelle M, Chevallier E, Lemesle J, Deltombe R, Robache F, Vayron R, vd., 2025, Determining Relevant 3D Roughness Parameters for Sandblasted Surfaces: A Methodological Approach, *Machines*, 13(12), 1122.
- Biradar P R, Katikar R S, 2018, Optimization Process Parameters in Honing Process: A Review Paper, *CiiT International Journal of Data Mining and Knowledge Engineering*, 10(6), 128.
- Bodi I, Piperi E, Hoxha M, Kaçani J, 2023, Evaluation of Surface Flatness and Roughness for Marble Products Produced with CNC Machining, *International Conference on Textile Conference & Conference on Engineering and Entrepreneurship*, 325–333, Cham.
- Bortolussi A, Careddu N, Ciccu R, Manca M G, Olla A, 2002, Surface Finishing of Marble with Abrasive Water Jet, *16th International Conference on Water Jetting*, 425-435, Aix en Provence.

- Braun E C, Bretti G, Di Fazio M, Medeghini L, Pezzella M, 2025, Data-Informed Mathematical Characterization of Absorption Properties in Artificial and Natural Porous Materials, arXiv preprint arXiv:2506.07656.
- Buj-Corral I, Alvarez-Florez J, Dominguez-Fernande A, 2019, Effect of Grain Size and Density of Abrasive on Surface Roughness, Material Removal Rate and Acoustic Emission Signal in Rough Honing Processes, *Metals*, 9(8), 860.
- Bukhari S A A, Basharat M, Janjuhah H T, Mughal M S, Goher A, Kontakiotis G, vd., 2023, Petrography and Geochemistry of Gahirat Marble in Relation to Geotechnical Investigation: Implications for Dimension Stone, Chitral, Northwest Pakistan, *Applied Sciences*, 13(3), 1755.
- Cao M, Ming X, He K, Li L, Shen S, 2019, Effect of Macro-, Micro-and Nano-Calcium Carbonate on Properties of Cementitious Composites-A Review, *Materials*, 12(5), 781.
- Cevheroğlu Çıra S, Dağ A, Karakuş A, 2018, Investigation of the Effects of Marble Material Properties on the Surface Quality, *Advances in Materials Science and Engineering*, 2018, 6514785.
- Chen K, Tang Y, 2024, Research Progress on the Design of Surface Texture in Tribological Applications: A Mini-Review, *Symmetry*, 16(12), 1523.
- Ci S, Wang B, Di C, Wang M, Zhu B, vd., 2025, Effect of Ultraviolet Aging on Properties of Epoxy Resin and Its Pultruded Fiber-reinforced Composite, *Polymers*, 17(3), 294.
- Cui Y, Xu C, Xue L, Bu F, Zhu J, 2025, Cracking Mechanism and Acoustic Emission Characteristics of Granite Under Varying Thermal Effects, *Scientific Reports*, 15(1), 29671.
- Çelik S B, Gireson K, Çobanoğlu İ, 2024, Non-linear Loss in Flexural Strength of Natural Stone Slabs Exposed to Weathering by Freeze-thaw Cycles, *Construction and Building Materials*, 434, 136682.
- Çetintaş S, 2025, Polishing Performance of Muğla White Marble with Different Abrasives, *Geoheritage*, 17(1), 23.

- Çıtak H, Çoramık M, Güneş H, Bıçakcı S, Ege Y, 2023, Comprehensive Review of Studies on Metamorphic Rocks, *International Journal of Geosciences*, 14(10), 999–1035.
- Çobanoğlu İ, Çelik S B, 2020, Evaluation of The Use of An Alternative Mixture For Pore Filling Material on Travertine Slabs, *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 26(8), 1373-1378.
- Davraz M, 2015, The Effect of Boron Compound to Cement Hydration and Controllability of This Effect, *Acta Physica Polonica A*, 128(2B).
- Demirdağ S, 2009, The Effect of Using Different Polymer and Cement Based Materials in Pore Filling Applications on Technical Parameters of Travertine Stone, *Construction and Building Materials*, 23(1), 522-530.
- Deniz V, Polat E, 2020, The Evaluation Potential as Micronized Calcite of White Marble Waste, *Inżynieria Mineralna*, 1(1), 195-201.
- Dong P, Allahverdi A, Andrei C M, Bassim N D, 2022, The Effects of Nano-silica on Early-Age Hydration Reactions of Nano Portland Cement, Cement and Concrete Composites, 133, 104698.
- Dudhal A L, Khadke S S, 2023, Multi-purpose Buffing Machine, *International Journal of Progressive Research in Engineering Management and Science (IJPREMS)*, 3(3), 262–275.
- Eker F, Duman H, Akdaşçı E, Bolat E, Sarıtaş S, Karav S, vd., 2024, A Comprehensive Review of Nanoparticles: From Classification to Application and Toxicity, *Molecules*, 29(15), 3482.
- Ersoy O, Güler D, Rençberoğlu M, 2021, Effects of Grinding Aids Used in Grinding Calcium Carbonate (CaCO_3) Filler on the Properties of Water-based Interior Paints, *Coatings*, 12(1), 44.
- Faramarzi L, Dehghani B, Azhari A, 2025, Influences of Freezing and Thermal Cyclic Loading on Physical and Mechanical Properties of Marble, *International Journal of Geo-Engineering*, 16(1), 2.

- Feng Y, Su H, Nie Y, Zhao H, 2022, Role of Cyclic Thermal Shocks on the Physical and Mechanical Responses of White Marble, *Machines*, 10(1), 58.
- Gabrielli A, Masi G, Graziani G, Cocchi L, Laidlaw F, Nudelman F, vd., 2025, Mineralogical, Microstructural and Mechanical Characterization of Marble Consolidated by Ammonium Phosphate after Thermal Ageing and Salt Contamination, *Construction and Building Materials*, 495, 143567.
- Gherardi F, Gulotta D, Goidanich S, Colombo A, Toniolo L, 2017, On-site Monitoring of the Performance of Innovative Treatments for Marble Conservation in Architectural Heritage, *Heritage Science*, 5(1), 1-15.
- Ghimire A, Manohar S, 2025, Assessment of Thermal Weathering Effects and Optimized Simulation Protocols for Heritage Makrana Marbles, *npj Heritage Science*, 13(1), 523.
- Gkrava E, Tsiridis V, Manoudis P, Zorba T, Pavlidou E, Konstantinidis A, vd., 2024, A Robust Superhydrophobic Coating of Siloxane Resin and Hydrophobic Calcium Carbonate Nanoparticles for Limestone Protection, *Materials Today Communications*, 38, 108393.
- Gleiter H, 2000, Nanostructured Materials: Basic Concepts and Microstructure, *Acta Materialia*, 48(1), 1-29.
- Gomez-Villalba L S, Salcines C, Fort R, 2023, Application of Inorganic Nanomaterials in Cultural Heritage Conservation, Risk of Toxicity, and Preventive Measures, *Nanomaterials*, 13(9), 1454.
- Gonzalez R C, 2009, *Digital Image Processing*, Pearson Education, India.
- Grzesik B, Grygierek M, Rokitoski P, Adamczyk Z, Nowak J, 2021, Adverse Effects of Flaming as a Surface Treatment Method for Stone Slabs Used in Road Pavements, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1202(1), 012014.
- Güneş N, Göktan R M, 2023, Abrasion Resistance Prediction of True Marbles Using Chemical Composition Data: A New Approach, *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 11(4), 1245-1256.

- Hashim H, Dias L, Martins S, Pires V, Costa M, Barrulas P, 2024, Optimization of the Application of Commercial Hydrophobic Coatings for Natural Stone Protection and Preservation, *Heritage*, 7(7), 3495-3510.
- Huang S, Lu J, Xu X, Cui C, 2024, Surface Evolution and Optimizing Strategy for Polishing Natural Heterogeneous Marble Using Sol-gel Diamond Pad, *Applied Sciences*, 14(18), 8314.
- Huang S, Guo Y, Huang J, Yin F, Lu J, 2025, Research on Robotic Polishing Process of Marble with Complex Curved Surface Based on Sol-Gel Flexible Tools, *Applied Sciences*, 15(1), 318.
- Ivaniciuc L, Sutiman D, Ciocinta R C, Favier L, Sendrea G, Ciobanu G, vd., 2021, Advanced Recovery of Calcium Carbonate Waste as a Filler in Waterborne Paint, *Environmental Engineering & Management Journal (EEMJ)*, 20(4).
- Jose P A, Alex A G, Gebrehiwet T, Murugan S, 2023, Influence of Fe₂O₃ Nanoparticles on the Characteristics of Waste Marble powder Mixed Cement Mortars, *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 17(1), 23.
- Kamal M A, Chomal N S, Koundal A, 2024, Exploring Stone Craft in Contemporary Interior Design: Innovative Applications and Techniques, *Architect Eng Sci*, 5(3), 2413.
- Kandi S G, Panahi B, Zoghi N, 2022, Impact of Surface Texture from Fine to Coarse on Perceptual and Instrumental Gloss, *Progress in Organic Coatings*, 171, 107028.
- Kasar A K, Watson K P, D'Souza B, Menezes P L, 2022, Role of B₂O₃ and CaO in Al₂O₃ Matrix Composite: In-situ Phases, Density, Hardness and Wear Resistance, *Tribology International*, 172, 107588.
- Krishnan S, Singh A, Bishnoi S, 2021, Impact of Alkali Salts on the Hydration of Ordinary Portland Cement and Limestone–Calcined Clay Cement, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 33(9), 04021223.
- Lafhaj Z, Goueygou M, Djerbi A, Kaczmarek M, 2006, Correlation Between Porosity, Permeability and Ultrasonic Parameters of Mortar with Variable Water/Cement Ratio and Water Content, *Cement and Concrete Research*, 36(4), 625-633.

- Langaroudi M A M, Mohammadi Y, 2018, Effect of Nano-clay on Workability, Mechanical and Durability Properties of Self-consolidating Concrete Containing Mineral Admixtures, *Construction and Building Materials*, 191, 619-634.
- Laskaridis K, Arapakou A, Patronis M, Kouseris I, 2021, Investigation of the Freezing-Thawing Effect on the Slip Resistance of Natural Stones, *Materials Proceedings*, 5(1), 32.
- Li H, Zhao Y, Zhao Y, Zhang M, Niu Y, Cao X, 2025, Advances in the Mechanism and Application of Nanoparticles in Concrete Property Modification, *Inorganics*, 13(9), 305.
- Li X, Cao M, 2024, Recent Developments on the Effects of Micro-and Nano-Limestone on the Hydration Process, Products and Kinetics of Cement, *Materials*, 17(9), 2133.
- Lisci C, Sitzia F, Pires V, Aniceto M, Mirão J, 2023, Stone Endurance: A Comparative Analysis of Natural and Artificial Weathering on Stone Longevity, *Heritage*, 6(6), 4593-4617.
- Lisci C, Galhano C, Simão J, Pires V, Sitzia F, vd., 2024, Hydrophobic Coatings' Efficiency and Limestones' Resistance to Salt Crystallisation, *Sustainability*, 16(2), 816.
- Lobarinhas R, Dionísio A, Paneiro G, 2024, High Temperature Effects on Global Heritage Stone Resources: A Systematic Review, *Heritage*, 7(11), 6310.
- López-Buendía A M, Guillem C, Cuevas J M, Mateos F, Montoto M, 2013, Natural Stone Reinforcement of Discontinuities with Resin for Industrial Processing, *Engineering Geology*, 166, 39-51.
- Luque A, Ruiz-Agudo E, Cultrone G, Sebastián E, Siegesmund S, 2011, Direct Observation of Microcrack Development in Marble Caused by Thermal Weathering, *Environmental Earth Sciences*, 62(7), 1375-1386.
- Meng T, Yu Y, Wang Z, 2017, Effect of Nano-CaCO₃ Slurry on the Mechanical Properties and Micro-Structure of Concrete with and Without Fly Ash, *Composites Part B: Engineering*, 117, 124-129.

- Menningen J, Sassoni E, Sobott R, Siegesmund S, 2021, Constraints of the Durability of Inorganic and Organic Consolidants for Marble, *Environmental Earth Sciences*, 80(10), 370.
- Mohammed A M A, Al Saadi H K H, Fahad A R M, Ali A N N, Salim A W N, Said A M N, vd. 2025, Influence of Nano CaCO_3 on Pore Structure and Compressive Strength in Concrete Bricks, *Journal of Building Engineering*, 105, 112520.
- Nguyen V B, Tran S B Q, Ahmad S A R, Cheng K F H, Ahluwalia K, Tan S H, vd., 2024, Optimal Model-based Control for Automated Robotized Abrasive Blasting System, *Journal of Manufacturing Processes*, 109, 1-15.
- Oltulu M, Şahin R, 2013, Effect of Nano- SiO_2 , Nano- Al_2O_3 and Nano- Fe_2O_3 Powders on Compressive Strengths and Capillary Water Absorption of Cement Mortar Containing Fly Ash: A Comparative Study, *Energy and Buildings*, 58, 292-301.
- Pacheco-Torgal F, Jalali S, 2011, Nanotechnology: Advantages and Drawbacks in the Field of Construction and Building Materials, *Construction and Building Materials*, 25(2), 582-590.
- Pacewska B, Wilińska I, 2020, Usage of Supplementary Cementitious Materials: Advantages and Limitations: Part I. C–S–H, C–A–S–H and Other Products Formed in Different Binding Mixtures, *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 142(1), 371-393.
- Price C A, Doehne E, 2011, *Stone Conservation: An Overview of Current Research*, Getty Publications, Los Angeles.
- Rai S, 2023, An Impact Analysis on Natural Stone and Marble Market Size & Share in India, *International Journal of Research and Analytical Reviews (IJRAR)*, 10(1).
- Raul Jr L, Benedict S K, Reymarvelos O, Ariel B, Arnold A, Mylah V T, vd., 2025, Nanosilica-based Hybrid Hydrophobic Coatings for Stone Heritage Conservation: An Overview, *Minerals*, 15(11), 1134.
- Regalla S S, 2024, Effect of Nano SiO_2 on Rheology, Nucleation Seeding, Hydration Mechanism, Mechanical Properties and Microstructure Amelioration of Ultra-High-Performance Concrete, *Case Studies in Construction Materials*, 20, e03147.

- Rezaei N, Ghasemi E, Nasiri Sarvi M, 2024, A Laboratory Investigation for Assessing the Effectiveness of Wastewater Treatment Using Flocculation Process in Building Stone Processing Industry on Stone Surface Quality and Abrasive Tool Wear, *Discover Civil Engineering*, 1(1), 57.
- Saidu S R, Lawal D R, 2020, Effect of Limestone Addition on Physicochemical Properties of Cement: A Case Study of Laboratory Prepared Portland Cement, Sokoto Portland Cement and Dangote Portland Cement, *Asian Journal of Chemical Sciences*, 7, 1-10.
- Sanchez F, Sobolev K, 2010, Nanotechnology in Concrete—a Review, *Construction And Building Materials*, 24(11), 2060-2071.
- Sanmartín P, Silva B, Prieto B, 2011, Effect of Surface Finish on Roughness, Color and Gloss of Ornamental Granites, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 23(8), 1239-1248.
- Sarıışık A, Akdas H, Sarıışık G, Gültekin C, 2011, Slip Safety Analysis of Differently Surface Processed Dimension Marbles, *Journal of Testing and Evaluation*, 39(5), 908-917.
- Sarıışık A, Sarıışık G, Akdaş H, 2012, Slip Analysis of Surface-processed Limestones, *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Construction Materials*, 165(5), 279-296.
- Sarıışık A, Can S, Ürün K, 2020, Traverten Atıklarının Çimentolu Dolgu Malzemesi Olarak Kullanımında Renk ve Parlaklık Değerlerinin Araştırılması, *Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi*, 11(1), 447-455.
- Sender P, Buj-Corral I, 2023, Influence of Honing Parameters on the Quality of the Machined Parts and Innovations in Honing Processes, *Metals*, 13(1), 140.
- Sert M, 2023, Farklı Yüzey Özelliklerine Sahip Magmatik Kökenli Doğal Taşların Yaşlandırma Koşullarına Bağlı Olarak Güneş Işığı Yansıma İndeks (SRI) Değerlerinin Değişiminin İncelenmesi, *Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi*, 250s, Afyonkarahisar.

- Shahabaz S M, Mehrotra P, Kalita H, Sharma S, Naik N, Noronha D J, vd., 2023, Effect of Al_2O_3 and SiC Nano-Fillers on the Mechanical Properties of Carbon Fiber-reinforced Epoxy Hybrid Composites, *Journal of Composites Science*, 7(4), 133.
- Sharif N U, Habibu S, Wang H, Veera Singham G, Huang H K, Hu C, vd., 2025, Advancing Renewable Functional Coatings: Sustainable Solutions for Modern Material Challenges, *Journal of Coatings Technology and Research*, 1-27.
- Sharma G, Bala R (Ed.), 2017, *Digital Color Imaging Handbook*, CRC Press.
- Shewale M, Chidambaram R S, Ravindran G, Khartode B, Shinde N, 2025, Integrated Micro and Nano-Silica in Advanced Composite High-Strength Mortar for TRM System, *Scientific Reports*, 15(1), 42303.
- Siegesmund S, Snethlage R (Ed.), 2011, *Stone in Architecture: Properties, Durability*, Springer Science & Business Media, Berlin.
- Singh P, 2025, The Material Touch: Exploring How Surface Textures and Finishes Affect User Experience in Interior Design, *Journal of Engineering and Technology Management*, 76.
- Śmielak B, Klimek L, Krześniak K, 2023, Effect of Sandblasting Parameters and the Type and Hardness of the Material on the Number of Embedded Al_2O_3 Grains, *Materials*, 16(13), 4783.
- Song H, Li X, 2021, An Overview on the Rheology, Mechanical Properties, Durability, 3D Printing, and Microstructural Performance of Nanomaterials in Cementitious Composites, *Materials*, 14(11), 2950.
- Strzałkowski P, Köken E, Sousa L, 2023, Guidelines for Natural Stone Products in Connection with European Standards, *Materials*, 16(21), 6885.
- Sudoł E, Szewczak E, Małek M, 2021, Comparative Analysis of Slip Resistance Test Methods for Granite Floors, *Materials*, 14(5), 1108.
- Suh J I, Jeon D, Yoon S, Oh J E, Park H G, 2017, Development of Strong Lightweight Cementitious Matrix for Lightweight Concrete Simply by Increasing a Water-To-Binder Ratio in $\text{Ca}(\text{OH})_2$ - Na_2CO_3 -Activated Fly Ash System, *Construction and Building Materials*, 152, 444-455.

- Tanimola J O, Efe S, 2024, Recent Advances in Nano-Modified Concrete: Enhancing Durability, Strength and Sustainability through Nano Silica (nS) and Nano Titanium (nT) Incorporation, *Applications in Engineering Science*, 19, 100189.
- Tazzini A, Gambino F, Casale M, Dino G A, 2024, Managing Marble Quarry Waste: Opportunities and Challenges for Circular Economy Implementation, *Sustainability*, 16(7), 3056.
- Tena-Santafé V M, Kaur G, Fernández J M, Navarro-Blasco Í, Álvarez J I, 2025, Hydrophobic and Oleophobic Photocatalytic Coatings for Stones and Cementitious Building Substrates: A Bibliometric Perspective (2010–2025), *Coatings*, 15(12), 1391.
- Torabi-Kaveh M, Moshrefyfar M, Shirzaei S, Moosavizadeh S M A, Ménendez B, vd., 2022, Application of Resin-TiO₂ Nanoparticle Hybrid Coatings on Travertine Stones to Investigate Their Durability Under Artificial Aging Tests, *Construction and Building Materials*, 322, 126511.
- Török Á, Přikryl R, 2010, Current Methods and Future Trends in Testing, Durability Analyses and Provenance Studies of Natural Stones Used in Historical Monuments, *Engineering Geology*, 115(3-4), 139-142.
- TS 6956 EN ISO 4287, 2004, Geometrik Mamul Özellikleri (GMÖ)-Yüzey Yapısı: Profil Metodu-Terimler, Tarifler ve Yüzey Yapısı Parametreleri, TSE, Ankara.
- Tsurumoto M, Shimazaki T, Hyry J, Kawakubo Y, Yokoyama T, vd., 2025, Preliminary Quantitative Evaluation of the Optimal Colour System for the Assessment of Peripheral Circulation from Applied Pressure Using Machine Learning, *Sensors*, 25(14), 4441.
- Uddin M N, Hossain M T, Mahmud N, Alam S, Jobaer M, Mahedi S I, vd., 2024, Research and Applications of Nanoclays: A Review, *SPE Polymers*, 5(4), 507-535.
- Urbanek M, Gil-Díaz T, Lützenkirchen J, Castelvetro V, 2025, Nano-Zirconia as a Protective and Consolidant Material for Marble in Architectural Surfaces, *Buildings*, 15(3), 492.

- Vrochidou E, Sidiropoulos G K, Ouzounis A G, Lampoglou A, Tsimperidis I, Papakostas G A, vd., 2022, Towards Robotic Marble Resin Application: Crack Detection on Marble Using Deep Learning, *Electronics*, 11(20), 3289.
- Wang J, Dong S, Li Z, Şahmaran M, Ding S, vd., 2021, Understanding the Effect of Nano/micro-structures on Anti-İmpact of Nano-Boron Nitride Filled Cementitious Composites, *Construction and Building Materials*, 298, 123885.
- Wang T, Wang J, Zhang X, Cheng P, Xue F, vd., 2024, Experimental Investigation on the Macro-and Micromechanical Properties of Water-Cooled Granite at Different High Temperatures, *Scientific Reports*, 14(1), 17149.
- Wong L N Y, Cui X, Zhang Y, Wu Z, Guo T, 2022, Experimental Investigation of Thermal Strengthening in Sichuan Marble, *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 55(11), 6683-6702.
- Wyszecki G, Stiles W S, 2000, *Color Science: Concepts and Methods, Quantitative Data and Formulae*, John Wiley & Sons.
- Xie Z, Duan Z, Zhao Z, Li R, Zhou B, Yang D, vd., 2021, Nano-Materials Enhanced Protectants for Natural Stone Surfaces, *Heritage Science*, 9(1), 1-13.
- Xu H, Jing P, Feng G, Zhang Z, Jiang Q, vd., 2024, Effect of Mineral Composition and Particle Size on the Failure Characteristics and Mechanisms of Marble in the China Jinping Underground Laboratory, *Materials*, 17(10), 2290.
- Yan Y, Wang Y, 2024, A Review of Atmospheric Deterioration and Sustainable Conservation of Calcareous Stone in Historical Buildings and Monuments, *Sustainability*, 16(23), 10751.
- Yang Q, Yang Q, Peng X, Xia K, Xu B, 2025, A Review of the Effects of Nanomaterials on the Properties of Concrete. *Buildings*, 15(13), 2363.
- Yang X, Zhu H, Yang S, Tan Q, Wang Y, vd., 2024, Surface Modification of Nano- CaCO_3 and Its Enhancement on the Performance of SBS/Crumb Rubber Modified Asphalt, *Construction and Building Materials*, 456, 139150.
- Yavuz H, Özkahraman T, Demirdağ S, 2011, Polishing Experiments on Surface Quality of Building Stone Tiles, *Construction and Building Materials*, 25(4), 1707-1711.

- Yeo S H, Mo K H, Mahmud H B, 2023, Hybrid Nucleation Acceleration Method with Calcium Carbonate and Calcium Silicate Hydrate for Fast-track Construction, *Buildings*, 13(12), 2975.
- Yıldırım G, Erdoğan N, 2024, An Analysis of the Use of Natural Stone and Marble in Contemporary Architectural Designs, *DEPARCH Journal of Design Planning and Aesthetics Research*, 3(2), 241-263.
- Yu Y, Wang Y, Yi X, Chen Z, 2024, Mechanical Responses and Fracture Evolution of Marble Samples Containing Stepped Fissures Under Increasing-amplitude Cyclic Loading, *Applied Sciences*, 14(17), 7919.
- Yue W, Wang B, 2024, Ceramic-Added Lime and Cement Mortars: A Review of Applications in Building Products, *Science Progress*, 107(3).
- Yurdakul M, 2020, Natural Stone Waste Generation from the Perspective of Natural Stone Processing Plants: An Industrial-Scale Case Study in the Province of Bilecik, Turkey, *Journal of Cleaner Production*, 276, 123339.
- Zhang J N, Yang X, Chen B, Wang X, Hu G, Tao N, vd., 2023, Study of the Freeze–Thaw Weathering’s Influence on Thermal Properties of Stone Artifacts, *Atmosphere*, 14(4), 666.
- Zhang Z, Yin F, Huang H, Huang G, Cui C, 2024, An Industrial Robot-Based Sawing Method for Natural Stone Sculpture, *Journal of Computational Design and Engineering*, 11(6), 75-85.
- Zhao Q, Tu J, Han W, Wang X, Chen Y, 2020, Hydration Properties of Portland Cement Paste with Boron Gangue, *Advances in Materials Science and Engineering*, 2020(1), 7194654.
- Zulkarnain I, Mohamad Kassim N A, Syakir M I, Abdul Rahman A, Md Yusuff M S, vd., 2021, Sustainability-based Characteristics of Abrasives in Blasting Industry, *Sustainability*, 13(15), 8130.