



**T.C.
BATMAN ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
MALZEME VE İMALAT MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**HİDROLİK KİREÇ ESASLI RESTORASYON HARÇLARINDA
BAZI ENDÜSTRİYEL ATIK MALZEMELERİN PUZOLANİK
ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

Nazlı TARHAN

**Ağustos-2025
BATMAN**

**T.C.
BATMAN ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
MALZEME VE İMALAT MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**HİDROLİK KİREÇ ESASLI RESTORASYON HARÇLARINDA
BAZI ENDÜSTRİYEL ATIK MALZEMELERİN PUZOLANİK
ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

Nazlı TARHAN

**Danışman
Prof. Dr. Mustafa OKUMUŞ**

Diğer Jüri Yeleri

Prof. Dr. Salih YAZICIOĞLU

Doç. Dr. Serhat DEMİRHAN

**Ağustos-2025
BATMAN**

TEZ KABUL VE ONAYI

Nazlı TARHAN tarafından hazırlanan “Hidrolik Kireç Esaslı Restorasyon Harçlarında Bazı Endüstriyel Atık Malzemelerin Puzolanik Özelliklerinin İncelenmesi” adlı tez çalışması 28/08/2025 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Batman Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Malzeme ve İmalat Mühendisliği Ana Bilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

İmza

Başkan

Prof. Dr. Salih YAZICIOĞLU

.....

Danışman

Prof. Dr. Mustafa OKUMUŞ

.....

Üye

Doç. Dr. Serhat DEMİRHAN

.....

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Dr. Öğr. Üyesi Ömer Murat ÖTER
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü

ETİK BEYANI

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını beyan eder, aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sorumluluğu kabullendiğimi bildiririm.

ETHICAL DECLARATION

I declare that all the information in this thesis has been obtained within the framework of ethical behavior and academic rules, and that the source of any statements and information that do not belong to me in this study prepared in accordance with the thesis writing rules has been fully cited, and I declare that I accept all kinds of legal responsibility in case of any contrary situation.

Nazlı TARHAN
28.08.2025

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

HİDROLİK KİREÇ ESASLI RESTORASYON HARÇLARINDA BAZI ENDÜSTRİYEL ATIK MALZEMELERİN PUZOLANİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

Nazlı TARHAN

Batman Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Malzeme ve İmalat Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Mustafa OKUMUŞ

2025, 103 Sayfa

Doğal hidrolik kireç (NHL) esaslı harçlar; tarihi yapılarda yapının bütünlüğü ve miras değerinden ödün vermeden uzun vadeli dayanıklılığı destekleyebilme kabiliyetleri nedeniyle restorasyon çalışmalarında tercih edilmektedir.

Bu tezde, atık mermer tozu, seramik tozu ve taş yünü tozu (ağırlıkça %5, %10 ve %15 oranlarında) ilaveli NHL esaslı harçlar üretildi ve üretilen harçların performansları araştırıldı. Üretilen harçların performansını değerlendirmek için mekanik (basınç ve eğilme dayanımları), yayılma ve kapiler su emme testleri yapılmıştır. Harçların fiziksel özelliklerini incelemek için tane boyutu dağılımı ve yoğunluk analizleri yapılmıştır. Ayrıca, %15 katkı içeren NHL harçlarında XRD (X-ışını difraksiyonu) analizleri de gerçekleştirilmiştir. Mekanik testler, mermer tozu ve seramik tozu katkılı harçlarda basınç ve eğilme dayanımlarının referans numunelere göre daha düşük olduğunu göstermiştir. Ancak, taş yünü katkılı NHL esaslı harçlarda 7 ila 28 günlük numunelerde hem basınç hem de eğilme dayanımlarında önemli iyileştirmelerin olduğu görülmüştür. En yüksek basınç ve eğilme dayanımları sırasıyla 2,91 MPa ve 1,15 MPa olarak ağırlıkça %15 taş yünü tozu tozu içeren 28 günlük harçlarda elde edilmiştir. Mekanik test sonuçları XRD analiz sonuçları ile desteklenmiştir. Yayılma (akışkanlık) testleri, harçtaki katkı tozu oranının %5'den %15'e artmasıyla yayılma çapında önemli bir artış olduğunu göstermiştir. %15 ağırlıkça mermer ve seramik tozu katkılı harçlarda yayılma çapı sırasıyla 165 mm ve 170 mm iken, %15 ağırlıkça taş yünü tozu takviyeli numunede 200 mm'ye ulaşmıştır. Bu durum taş yünü tozu maddesinin gözenekli ve lifli yapısı nedeniyle akışkanlığın iyileştiğini gösterir. Su emilim testleri, üretilen tüm harçlar için kısa vadede daha yüksek emilim ortaya koyduğunu, ancak 24 saat sonra benzer doygunluk seviyelerine ulaştığını gösterdi. Taş yünü toz katkısının mermer ve seramik tozu katkısına göre erken su emilimini daha hızlandırdığını ancak uzun vadeli geçirgenliğin azalmasına da katkıda bulunduğunu göstermektedir. Sonuçlar NHL bazlı harca seramik ve taş yünü tozu eklemek, numunenin mekanik performansını, işlenebilirliğini ve uzun vadeli nem direncini genellikle artırarak restorasyon ve inşaat uygulamaları için kullanım potansiyelini artırdığını, mermer tozunun ise yapısal olmayan uygulamalarla sınırlandırılması gerektiğini göstermiştir.

Anahtar Kelimeler: Doğal hidrolik kireç, Mermer tozu, Seramik tozu, Taş yünü, Mekanik özellikler, İşlenebilirlik, Su emilimi.

ABSTRACT

MASTER THESIS

INVESTIGATION OF POZOLANIC PROPERTIES OF SOME INDUSTRIAL WASTE MATERIALS IN HYDRAULIC LIME-BASED RESTORATION MORTARS

Nazlı TARHAN

Batman University Graduate Education Institute

Department of Materials and Manufacturing Engineering

Advisor: Prof. Dr. Mustafa OKUMUŞ

2025, 103 Pages

Natural hydraulic lime (NHL)-based mortars are preferred in restoration projects due to their ability to support long-term durability in historic buildings without compromising the structural integrity and heritage value.

In this thesis, NHL-based mortars containing waste marble dust, ceramic dust, and stone wool dust (at 5wt%, 10wt%, and 15wt%) were produced, and their performance was investigated. Mechanical (compressive and flexural strength), flow, and capillary water absorption tests were conducted to evaluate the performance of the produced mortars. Grain size distribution and density analyses were conducted to examine the physical properties of the mortars. Additionally, XRD (X-ray diffraction) analyses were performed on NHL mortars containing 15% of the additive. Mechanical tests showed that the compressive and flexural strengths of the marble dust and ceramic dust-added mortars were lower than those of the reference samples. However, significant improvements were observed in both compressive and flexural strengths of the NHL-based mortars with stone wool additives, particularly under water-curing conditions, in samples aged 7 to 28 days. The highest compressive and flexural strengths of 2.91 MPa and 1.15 MPa, respectively, were obtained in 28-day water-cured mortars containing 15% by weight stone wool powder. The results of the conducted XRD analyses enabled the identification of the mineral phases present in the mortars, thereby providing consistent support for the observed mechanical strength outcomes. Mechanical test results were supported by XRD analysis results. Spreading (flow) tests showed that increasing the additive powder ratio in the mortar from 5% to 15% resulted in a significant increase in spreading diameter. While the spreading diameter in the mortars containing 15% by weight marble and ceramic dust was 165 mm and 170 mm, respectively, it reached 200 mm in the sample containing 15% by weight stone wool powder. This indicates that the fluidity is improved due to the porous and fibrous structure of the stone wool powder material. Water absorption tests showed that all mortars produced exhibited higher short-term absorption, but similar saturation levels were reached after 24 hours. The addition of stone wool powder accelerated early water absorption more than the addition of marble and ceramic powder, but also contributed to a reduction in long-term permeability. The results indicated that adding ceramic and stone wool powder to NHL-based mortar generally improved the sample's mechanical performance, workability, and long-term moisture resistance, increasing its potential for use in restoration and construction applications, while marble powder should be limited to non-structural applications.

Keywords: Natural hydraulic lime, Marble dust, Ceramic dust, Stone wool, Mechanical properties, Workability, Water absorption.

ÖN SÖZ

Bu çalışması sırasında yapıcı eleştirileri ile çalışmalarına yön veren, her konuda ilgi, destek ve hoşgörüsünü esirgemeyen, tecrübe ve bilgilerini paylaşan tez danışmanım Sayın Prof. Dr. Mustafa OKUMUŞ'a teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca tez çalışması sürecinde değerli katkı ve desteklerinden dolayı Prof. Dr. Salih Yazıcıoğlu'na ve Doç. Dr. Serhat Demirhan'a da teşekkür ederim.

Deneyisel çalışmalarım sırasında laboratuvar ve malzeme gereksinimlerimi karşılayan Allalçı San. Tic. A.Ş. firmasına, bu süreçteki yardımlarından ve özverilerinden ötürü Allalçı Ar-Ge Müdürümüz Şükrü TUNG'a ve laboratuvar çalışmalarımda yardımlarını esirgemeyen Rafineri ve Petro-Kimya teknikeri Yusuf KURAL'a teşekkür ederim.

Tüm eğitim, öğretim hayatım boyunca desteklerini esirgemeyen her zaman varlıklarını yanında hissettiğim Annem Ayser TARHAN'a, Babam Aydın TARHAN'a ve diğer tüm aile mensuplarıma teşekkürlerimi sunarım.

Nazlı TARHAN
BATMAN-2025

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
ÖN SÖZ	vi
ÇİZELGELER LİSTESİ.....	ix
ŞEKİLLER LİSTESİ	x
SİMGELER VE KISALTMALAR	xi
1. GİRİŞ	1
1.1.Tarihi Yığma Yapılara Genel Bakış.....	4
1.1.1. Tarihi yapıların onarımında malzemelerin önemi	5
1.1.2. Tarihi yapılarda kullanılan harçlar.....	5
1.1.3. Tarihi yapılarda yıpranmaya neden olan etkenler.....	8
1.1.4. Tarihi yapıların güçlendirme yöntemleri	11
1.2. Kireç	13
1.2.1. Kireçtaşı ve kirecin genel tanımı	13
1.2.2. Kireçtaşının fiziksel ve kimyasal özellikleri.....	14
1.2.3. Kirecin üretim yöntemi	16
1.2.4. Kirecin kullanım alanları	18
1.2.5. Kirecin sınıflandırılması	18
1.2.6. Hidrolik kireç harçları.....	23
1.3. Mermer	25
1.3.1. Mermerin tanımı	25
1.3.2. Mermerin kullanım alanları	27
1.3.3. Mermerlerin sınıflandırılması	27
1.3.4. Mermerlerin Ternomekanik özellikleri.....	29
1.3.5. Mermer atıklarının oluşumu	36
1.4. Seramik	38
1.4.1. Seramiğin tanımı.....	38
1.4.2. Seramiklerin özellikleri.....	40
1.4.3. Seramiğin kullanım alanları.....	41
1.4.4. Seramik atıkları.....	43
1.5. Taş Yünü (Mineral Yünü).....	45
1.5.1. Taş yünü tanımı	45
1.5.2. Taş yünü özellikleri	45
1.5.3. Taş yünü atığı.....	46
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI	48
3. MATERYAL VE YÖNTEM	54
3.1. Kullanılan Malzemeler.....	54
3.1.1. Doğal hidrolik kireç (NHL 3,5)	54
3.1.2. Atık mermer tozu	55

3.1.3. Atık seramik tozu.....	56
3.1.4. Atık taş yünü tozu	57
3.2. Analiz Yöntemleri.....	58
3.2.1. Eğilme dayanımı tayini	59
3.2.2. Basınç dayanımı tayini.....	62
3.2.3. Elek Analizi	63
3.2.4. Yığın yoğunluk tayini	66
3.2.5. Yayılma deneyi	67
3.2.6. X-Işını Kırınımı (XRD) Analizi	70
3.2.7. Kapiler su emme deneyi	71
4. BULGULAR.....	73
4.1. Eğilme ve Basınç Dayanımı Analiz Sonuçları.....	73
4.2. X-Işını Kırınımı (XRD) Analiz Sonuçları.....	81
4.3. Yayılma Analiz Sonuçları	84
4.4. Kapiler Su Emme Analiz Sonuçları	87
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	90
6. KAYNAKLAR	94

ÇİZELGELER LİSTESİ

Çizelge 1.1. Bağlayıcı malzeme alanındaki kronolojik gelişmeler	7
Çizelge 3.1. NHL 3,5 kireçlerin kimyasal özellikleri (değerler kütle %'si olarak verilmiştir).	54
Çizelge 3.2. Atık mermer tozunun kütlece kimyasal bileşimi (%).....	56
Çizelge 3.3. Seramik tozu kütlece kimyasal bileşimi (%).....	57
Çizelge 3.4. Atık taş yününün kütlece kimyasal bileşimi (%).....	58
Çizelge 3.5. Bağlayıcı, agrega ve katkı miktarının harç karışımına göre dağılımı	59
Çizelge 3.6. Numunelerin hazırlanma ve muhafaza (Kür) şartları	61
Çizelge 3.7. Deney makinası özellikleri	62
Çizelge 3.8. Farklı katkı malzemelerinin (MT, ST, TT, NHL) elek analizi sonuçları	65
Çizelge 3.9. Katkı malzemelerinin hacimsel yoğunluk değerleri	67
Çizelge 4.1. Atık türü ve oranına göre yayılma değerleri	85
Çizelge 4.2. Numunelere göre su alma miktarları ve kapiler su emme kapasitesi (10 dk., 90 dk., 24 saat)	87

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1. Yığma yapı örneği	4
Şekil 1.2. Tarihi yapı harçlarını oluşturan bileşenler	6
Şekil 1.3. Harçların sınıflandırılması	6
Şekil 1.4. Yığma duvar köşe detayı	10
Şekil 1.5. Uzun doğrultuda mesnetlenmemiş duvardaki hasar	11
Şekil 1.6. Kirecin oluşum döngüsü	16
Şekil 3.1. Doğal hidrolik kireç	55
Şekil 3.2. Öğütülmüş atık mermer tozu	55
Şekil 3.3. Öğütülmüş atık seramik tozu	56
Şekil 3.4. Öğütülmüş atık taş yünü tozu	57
Şekil 3.5. Hazırlanan harç numunesi	60
Şekil 3.6. Eğilme dayanım cihazı	61
Şekil 3.7. Basınç dayanım cihazı	63
Şekil 3.8. Vakumlu elek analiz cihazı	64
Şekil 3.9. Kullanılan 160 µm elek	64
Şekil 3.10. Yoğunluk kabı	66
Şekil 3.11. Yayılma tablası	69
Şekil 3.12. Silindirik kap	69
Şekil 3.13. Farklı atıklarla hazırlanmış harçların yayılımları	69
Şekil 3.14. PANalytical X'Pert PRO model bir X-ışını difraktometresi (XRD) cihazı	70
Şekil 3.15. Harç numunesi	71
Şekil 3.20. Su emme test düzeneği	72
Şekil 4.1. 7 günlük suda kürlenmiş numunelerin basınç dayanımları	74
Şekil 4.2. 7 günlük suda kürlenmiş numunelerin eğilme dayanımları	74
Şekil 4.3. 7 günlük ortam koşullarında kürlenmiş numunelerin basınç dayanımları	75
Şekil 4.4. 7 günlük ortam koşullarında kürlenmiş numunelerin eğilme dayanımları	76
Şekil 4.5. 28 günlük suda kürlenmiş numunelerin basınç dayanımları	77
Şekil 4.6. 28 günlük suda kürlenmiş numunelerin eğilme dayanımları	78
Şekil 4.7. 28 günlük ortam koşullarında kürlenmiş numunelerin basınç dayanımları	79
Şekil 4.8. 28 günlük ortam koşullarında kürlenmiş numunelerin eğilme dayanımları	79
Şekil 4.9. Referans harç numunesi XRD grafiği	82
Şekil 4.10. %15 Atık mermer tozu ilaveli harç numunesi XRD grafiği	82
Şekil 4.11. %15 Atık seramik tozu ilaveli harç numunesi XRD grafiği	83
Şekil 4.12. %15 Atık taş yünü tozu ilaveli harç numunesi XRD grafiği	83
Şekil 4.13. Atık kullanım oranlarına göre yayılma	87

SİMGELER VE KISALTMALAR

Δ_m : Örneğin 50 cm² yüzeyinde meydana gelen aşınma oranı, g/cm²
 Δ_v : Örneğin 50 cm² lik yüzeyindeki hacim kaybı,
 $\Delta_{\sigma cd}$: Don tesiri ile basınç değişiminde meydana gelen azalma, (%)
 μ_m : Mikrometre
 $\text{\AA}$: Angström
A: Numune yüzey alanı, cm²
AHL: Yapay Hidrolik Kireçler
b: Deney numunesinin genişliği, cm
C: Su emme katsayısı
Ca(OH)₂: Sönmüş kireç
CaCO₃: Kireçtaşı
CaO: Sönmemiş kireç
CO₂: Karbondioksit
D_h: Mermerin birim hacim ağırlığı, g/cm³
D_k: Don kaybı, (%)
DL: Dolomitic Lime (Dolomitik kireç – CaMg(CO₃)₂ içeren kireç)
do: Mermerin ortalama özgül ağırlığı, g/cm³
Do: Özgül ağırlık, g/cm³
Fc: Numune yenilme yük değeri, kg
FL: Formüle Edilmiş Kireç
G_{dh}: Doygun deney numunesinin havadaki ağırlığı, g
G_{ds}: Doygun deney numunesinin su içindeki ağırlığı, g
G_k: Kurutulmuş deney numunesi ağırlığı, g
G_o: Numunenin deney öncesi kütlesi, g
G_p: Piknometre ağırlığı, g
G_{pn}: (Piknometre + Deney numunesi ağırlığı), g
G_{pns}: (Piknometre + Deney numunesi + Su), g
G_{ps}: Su ile dolu piknometre ağırlığı, gr
h: Deney numunesi kalınlığı, cm
H₂O: Su
HL: Hidrolik Kireç
K: dh/do (Doluluk oranı) %
L: Deney numunesinin mesnetler arası mesafesi, cm
M₀: Kuru ağırlık
M₁: 10 dakikada su almış hali
M₂: 90 dakikada su almış hali
M₃: 24 saatte su almış hali
M_i: Örneğin aşınma öncesi ağırlığı, g
mm: Milimetre
MPa: Megapascal
M_s: Örneğin aşınma sonrası ağırlığı, g
MT: Mermer Tozu
N: Newton (Kuvvet birimi)
NHL 2: Düşük dayanımlı doğal hidrolik kireç (28 günde 2–7 MPa)
NHL 3,5: Orta dayanımlı doğal hidrolik kireç (28 günde 3.5–10 MPa)
NHL 5: Yüksek dayanımlı doğal hidrolik kireç (28 günde 5–15 MPa)
NHL: Doğal Hidrolik Kireçler

P: Kırılmaya neden olan en büyük yük,
P: Mermerin porozitesi, (%)
 S_h : Mermerin hacimce su emme oranı, (%)
 $SiO_2Al_2O_3$: Silisyum Dioksit ve Alüminyum Oksit bileşimi (genellikle puzolanik katkılar için kullanılır)
 S_k : Mermerin ağırlıkça su emme oranı, (%)
 SO_3 : Kükürt Trioksit (Sülfat bileşiği)
ST: Seramik Tozu
 TiO_2 :Titanyum Dioksit (Beyaz pigment ve katkı malzemesi)
TS EN: Türk Standardı
TT: Taşyünü Tozu
 $W/m \cdot K$: Isı iletkenlik katsayısı birimi (Watt/metre·Kelvin)
XRD: X-Ray Diffraction (X-ışını kırınımı – mineral faz analizi yöntemi)
 λ : Dalga boyu
 σ_c : Don deneyi uygulanmış mermerin tek eksenli basınç dayanımı
 σ_{cd} : Don sonrası deneyi, mermerin tek eksenli basınç dayanımı
 σ_{EG} : Mermerin eğilme dayanımı

1.GİRİŞ

Tarihi bir yapının uzun yıllar varlığını koruması evrensel bir konudur. Özgün mimari özelliklere sahip yapılar zaman içerisinde çevresel koşullar, kullanım koşulları gibi nedenlerden dolayı bileşen malzemelerinde ve elemanlarında bozulmalar ve hasarlar görülmektedir. Bozulma ve hasarların bakım-onarım ve güçlendirme çalışmalarında uygulanacak teknikler belirlenirken, her yapının özgün mimarisi, malzeme özellikleri ve taşıyıcı elemanların davranışı ve özellikleri bir bütün içerisinde değerlendirilmelidir (Akyurt Takır, 2022). Bu yapıların tarihsel ve kültürel önemini korumak için, yapıların özgün özelliklerinin bozulmaması gerekir. Korumanın yetersiz kaldığı durumlarda bu eserlerin yapılarına uygun bir şekilde restore edilmeleri gerekmektedir. Bu nedenle yapının onarımı için kullanılacak ürünün, yapının özgün malzemesine zarar vermemesine ve uyumlu olmasına özen gösterilir. Harç, sıva, derz, dolgu vb. kompozit yapı malzemeleri tarihi eserlerin önemli elemanlarıdır. Bu harçlar yapının bulunduğu çevre şartları ve dönemin özelliklerine bağlı olarak farklı kompozisyonlarda üretilmişlerdir. Tarihi yapıların restorasyon harçları üretilirken yapıdaki özgün harçlarla kimyasal, fiziksel ve mekanik özellikler bakımından uyumlu olmasına dikkat etmek gerekmektedir (Şimşek, 2021).

Tarihi yapıların onarım çalışmalarında ilk önce yüzyıllar boyunca kullanılan kireç harçları gelmektedir. Kireç içeren harçlar, eski dönemlerden çimentonun bulunmasına kadar geçen sürede yapıların inşasında yaygın olarak kullanılmıştır (Böke vd., 2004; Dariz & Schmid, 2017; Seabra ve vd., 2009). Kireç, tarihi yapıların özgün kâgir duvar harçlarında kullanılan en eski bağlayıcı türlerinden biridir (Gür, 2019). Bu harçlar, taş ve tuğla gibi yapı malzemelerini bir arada tutan ve yapıların yapısal davranışlarını etkileyen önemli malzemelerdir. Kireç harçlarının ham madde özellikleri ve üretim teknolojileri, yapıların yapısal elemanlarına göre farklılık gösterebilir. Bundan dolayı bu harçlar, tarihi yapıların yapısal özelliklerinin değerlendirilmesinde oldukça önemlidir (Çizer vd., 2004). Kireç harçları, uzun hazırlık periyodu gerektirmeleri, suya dayanıksız olmaları ve mekanik açıdan yetersiz olmaları nedeniyle tarihi yapılarda dönüşü olmayan tahribatlara neden olabilmektedir. Kireç, zaman içerisinde bozularak eserin yapısal bütünlüğünü bozmakta ve onarımı gerektirmektedir. Bu nedenle, özgün harç özelliğini bozmadan daha dayanıklı olan hidrolik kireç kullanılması restorasyon harçları için uygun görülmüştür.

Hidrolik kireç harçları, hidrolik olmayanlardan daha yüksek mekanik özelliklere ve dayanıklılığa sahiptirler (Çizer vd., 2004).

20. yüzyılın başlarına kadar yaygın olarak kullanılan bağlayıcılardan biri olan doğal hidrolik kireç tek bir kayacın kalsinasyonu ile elde edilmektedir. Bu amaçla killi kireçtaşı, marn gibi kalsiyum karbonat (CaCO_3) ve kili bir arada barındıran ham maddelerin kalsinasyonu tercih edilmektedir. Bu kireçlere hidrolik özelliği, kilden gelen silisyum dioksit (SiO_2) başta olmak üzere alüminyum oksit (Al_2O_3) ve demir oksidin (Fe_2O_3) ham madde içerisindeki kalsiyum ile oluşturduğu kalsiyum silikat ve kalsiyum alüminat fazları kazandırmaktadır. Doğal hidrolik kireçte olması beklenen hidrolik özellikteki ana bileşen ise dikalsiyum silikat (C_2S) olup bunun yanında daha az miktarda trikalsiyum silikat (C_3S) da üretim safhasında ortaya çıkabilmektedir (Oktay vd., 2020). Ham maddenin ısı etkisi ile bozunmasıyla hidrolik özellikteki bu yeni fazların oluşturulması amacıyla uygulanan kalsinasyon işlemi endotermik bir reaksiyondur (Stanmore & Gilot, 2005). Hidrolik kireç killi-kumlu kireç taşının yakılması (kalsinasyon) ve söndürülüp (hidratasyon) öğütülmesiyle hem havada hem de suda sertleşebilen içeriğinde kalsiyum silikat, kalsiyum alüminat ve kalsiyum hidroksit barındıran kireçlerdir. Su altında katılaşma ve sertleşme özelliğine sahip olduğundan su kireci olarak da tanımlanır. Atmosferik karbondioksit, sertleşme işlemine katkıda bulunmaktadır. En az kütlece %3 serbest kireç ihtiva ederler. Hidrolik kireç; doğal hidrolik kireç (NHL, Natural Hydraulic Lime) ve yapay hidrolik kireç (AHL) olmak üzere ikiye ayrılır.

Doğal hidrolik kireç kil ve/veya silis içeren kireçtaşlarının hiçbir katkı olmaksızın hidrolik özellik gösteren kireç türüdür (Akyurt Takır, 2022). Doğal hidrolik kireçlerin sınıflandırılmasının temel parametresini kontrollü bir şekilde yapılan deneylerle 28 günün sonunda kazandıkları dayanımlar oluşturmaktadır. NHL (3,5) tipindeki doğal hidrolik kireç 7 günde sahip olduğu bir dayanım olmazken, 28 günün sonunda 3-10MPa dayanıma ulaşmaktadır. NHL (5) tipindeki doğal hidrolik kireç 7 günde minimum 2 MPa 28 günde 5-15 MPa ulaşmaktadır (TS EN 459-1, 2015). NHL (2) tipindeki doğal hidrolik kireç 7 günde herhangi bir dayanım sınırı istenmemekte, 28 günde ulaştığı dayanım 2-7 MPa olduğu görülmektedir (Bostancı, 2020).

Doğal hidrolik kireç harçlarının bünyesinde bulundurduğu yüksek kalsiyum hidroksit miktarı sayesinde puzolan katkılarıyla daha yüksek performans gösterebildiği yapılan deneysel çalışmalar kapsamında kanıtlanmıştır. Nitekim doğal ve yapay puzolan kaynakları bakımından oldukça zengin olan ülkemizde mevcut olan bu tip malzemelerin

kullanımıyla özgün harç özelliklerine uygun onarım harçlarının elde edilmesinin hem çevresel olumlu etkileri hem de restorasyon ve madencilik sektörleri için ekonomik getirileri olacaktır (Gür,2019). Doğal kaynakların daha az tüketilmesi, çevre kirliliğinin daha aza indirgenmesi ve enerji maliyetlerinin azaltılması amacıyla endüstriyel atık kullanımı gün geçtikçe daha fazla ilgi çeken bir konu olmaktadır. Atıklar çevre sorununun yanı sıra birçok durumda depolanma zorunluluğundan dolayı ilave maliyet getirmektedir. Bu nedenle, birçok atık içeriğine bakılmaksızın ortadan kaldırılmaya çalışılmaktadır. Ancak, atık malzemelerin de bir değeri vardır ve atıklar katma değeri yüksek ürünlerin elde edilmesinde kullanılabilir (Yıldız vd., 2017).

Mermer, eski zamanlardan beri kullanılan en yaygın yapı malzemelerinden biridir (Hürriyet, 2019). Mermer, inşaatta ve dekorasyon amaçlı işlerde kullanılır. Desenleri ve mineralojik bileşenleri bulundukları bölgeye bağlı olarak değişir. Mermer, taş ocaklarında veya işleme tesislerinde büyük miktarda atık üreten farklı uygulamalarla işlenir. İşleme sırasında, mermerin yaklaşık %30'u, düzensiz ya da daha küçük boyutlu olması nedeniyle atık olur. Yarı işlenmiş bloklarda atık miktarı %2-5'tir (Güler ve Polat, 2018). Mermer fabrikalarından üretim atığı olarak ortaya çıkan tozların kullanılabilirliği endüstriyel açıdan kazanç olduğu kadar çevresel açıdan da bir sorunun giderilmesi anlamını taşımaktadır. Bu nedenle mermer atıklarının değerlendirilmesi konusunda bulunabilecek alternatifler, mermer fabrika işletmecilerine ve ülke ekonomisine kaynak sağlayacağı gibi bu fabrikaların çevre kirleticisi özelliğini de tamamen ortadan kaldıracaktır (Ceylan ve Mança, 2013). Mermer tozunun bir kaynak olarak kullanılması, mermer kullanımının çevresel etkilerini azaltmakla kalmayacak, aynı zamanda sürdürülebilir kalkınmaya yol açan diğer doğal kaynakların kullanımında da azalmaya yol açacaktır (Marras vd., 2010). Böylece, maden sektörünün çevre kirliliği açısından önemli bir problemi olan atık mermer tozunun kullanımı bu tez çalışması için öngörülmüştür. Atık mermer tozunun, üretilen harç ve beton elemanlarında belirli oranlarda puzolan malzeme olarak kullanılması, çevresel kirliliği önlemeye ve doğal kaynakları daha az tüketmeye yardımcı olacaktır. Bunun yanı sıra harcın işlenebilirlik üzerindeki etkileri ile basınç ve eğilme dayanımlarının iyileştirilmesi hedeflenmiştir (Eren, 2019). Atık mermer tozu ve hidrolik kireçten oluşan harçlar, tarihi yapıların yapısal bütünlüğünü koruyarak onarılmasını mümkün kılacaktır. Bu tez çalışması; endüstrideki atıkların kullanımını yaygınlaştırarak tarihi yapıların güçlendirilerek onarılmasına katkı sağlayacaktır.

1.1. Tarihi Yığma Yapılara Genel Bakış

Yığma yapı, duvarların yapının taşıyıcılığını üstlendiği yapı sistemidir. Bu duvarlar, taş, tuğla, kerpiç vb. malzemelerden yapılır ve harçla birbirine bağlanır. Yığma yapıya kâgir yapı da denmektedir. Bu kelime Farsça ‘da taş, tuğla, kerpiç malzeme ile yapılan yapı manasına gelmektedir (Tetik, 2015). Şekil 1.1.’de yığma yapı örneği verilmiştir.

Yığma yapılarda duvarların hem mimari hem de taşıyıcı işlevi vardır. Duvarlar hem hacimleri oluşturur, yapıyı dış etkenlerden korudukları gibi yapının işlevi gereği oluşturulan iç bölmelerini de ayırırlar. Duvarların bu birden çok işlevi kullanım ve yapım açısından yığma yapıların önemli üstünlüğüdür (Bayülke, 2001a).

Yığma yapı sisteminin malzeme özelliklerinden kaynaklı yapıya etki eden gerilmeler karşısında basınç mukavemetleri yüksek iken çekme mukavemetlerine karşı düşüktür. Yığma yapılarda taşıyıcı sistem geometrisi göre sınıflandırılabilir. Bu sınıflandırma çizgisel (kemer), düzlemsel (yük taşıyan yığma duvar), hacimsel (tonoz, kubbe) şeklindedir. Ayrıca yapım tekniğine göre ise donatısız, donatılı, kuşatılmış olarak da sınıflandırılabilir ama genelde tarihi yığma yapılar donatısız olarak yani taş, tuğla vb. malzemelerin harç ile örülmesiyle yapılan yapılardır (Tetik, 2015).



Şekil 1.1. Yığma yapı örneği

1.1.1. Tarihi yapıların onarımında malzemelerin önemi

Tarihi yapılar, üretim teknolojisi, bölge koşulları ve bakım gibi faktörlerin etkisiyle çeşitli sorunlarla karşılaşabilmektedir. Onarımda kullanılan malzemelerin orijinal malzeme özelliklerine uygun olması ve iyi parçalanmalara karşı dayanıklı olması, yapıların korunmasında önemli bir etkidir. Restorasyon çalışmaları, yapının mimari ve estetik yönlerinin doğru bir şekilde ortaya çıkarılması için detaylı araştırmalar gerektirir. Bu araştırmalar, yapının malzeme özellikleri ve üretim teknikleri hakkında da bilgi vermelidir. Tarihi yapıların sağlamlaştırılması ve onarılmasında kullanılan taşın kalitesi, taşın boyutu, harçların özgün harç ile uyumu, onarım harcının özgün taş ile uyumu çok önemlidir. Yeterli mukavemet değerlerine sahip olmayan harçlar zamanla dış etkenlerin etkisiyle bozulmalara ve dağılmalara yol açar.

Çimentolu onarım harçları birçok önemli tarihi yapılarda kullanılmış olsa da restore edilecek kagir harçları için uygun görülmeyen bağlayıcıdır. Çimento, su ile etkileşime girdiğinde içerisinde bulunan suda çözünür tuzlar ortaya çıkar. Bu tuzlar, yapıların yüzeyinde çiçeklenmelere neden olur. Çiçeklenmeler, yapıların görünümünü bozmanın yanı sıra, yapının malzemelerinde de bozulmalara yol açabilir. Çimento harcı, gözeneksiz ve yoğun yapısı nedeniyle tarihi yapıların nefes almasını engeller. Bu da yapıda nem birikmesine ve özgün malzemelerinde bozulmalara neden olur. Bahsedilen sebeplerle çimento tarihi yapıların onarımında kesinlikle tercih edilmemelidir.

Kireç onarım çalışmalarının en başında gelmektedir. Çimento bulunana kadar geçen süreçte yapıların inşasında yüzyıllar boyunca kireç kullanılmıştır. Kireç harçları, uzun hazırlık periyodu gerektirmesi ve mekanik açıdan yetersiz olması nedeniyle yapılarda tahribatlara neden olur ve onarım gerektirmektedir. Bu nedenle, özgün yapı özelliğini bozmadan mekanik açıdan daha dayanıklı olan puzolan katkılı hava kireci veya doğal hidrolik kireç harçları tercih edilebilmektedir.

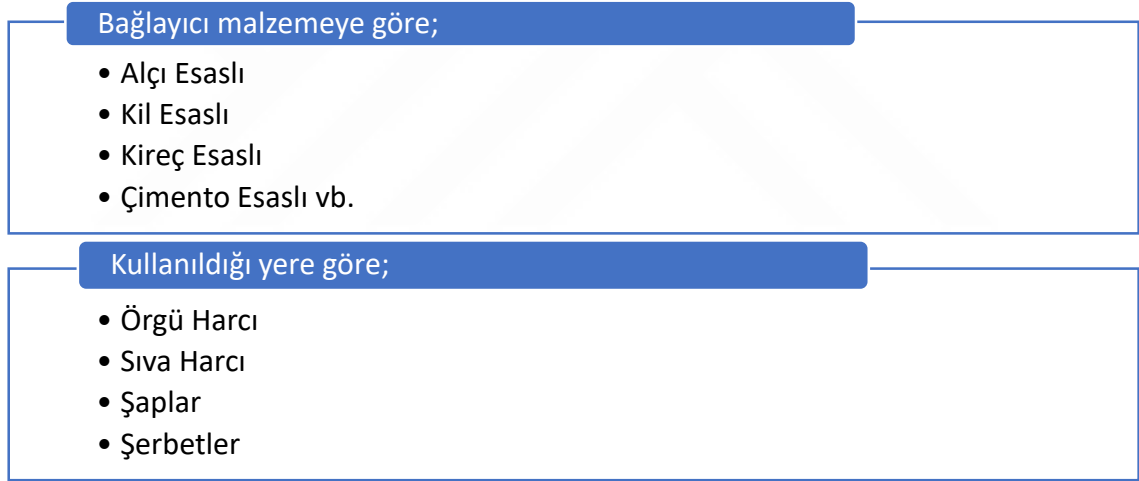
1.1.2. Tarihi yapılarda kullanılan harçlar

Bağlayıcı malzeme; dolgu malzemesi ve suyun belirli oranlarda karıştırılmasıyla elde edilen, şekil verilebilen, yapışma ve katılaşma özelliği olan malzemeye harç denir (Şimşek, 2001). Harçlar, kagir yapıların derzlerinde kullanılan, bağlayıcı ve kumun yeterli miktarda su ile yoğurulmasıyla elde edilen, az veya çok plastik özellik gösteren bir hamurdur (Debes, 1949).



Şekil 1.2.Tarihi yapı harçlarını oluşturan bileşenler

Şekil 1.2’de tarihi yapı harçlarını oluşturan bileşenler gösterilmektedir. Harçları inceleyebilmek için öncelikle bünyesinde bulunan malzeme gruplarını tanımak gerekir. Harçlar, iki farklı şekilde sınıflandırılabilir: bünyesine giren bağlayıcı malzemelere göre ve kullanım yerine göre. Şekil 1.3’te ise harçların sınıflandırılması yer almaktadır.



Şekil 1.3. Harçların sınıflandırılması

Ana bağlayıcı çeşidine göre harçlar; kil esaslı harçlar, alçı esaslı harçlar, kireç esaslı harçlar ve çimento esaslı harçlar olmak üzere incelenebilir. Harçlar yapıda kullanılma şekli ve yerine göre sıva harçları, örgü harçları, şaplar ve şerbetler olmak üzere sınıflandırılabilirler. Sıva harçları duvar ve tavan yüzeylerini estetik açıdan düzeltmek ve teknik açıdan dış etkilere karşı korumak amacıyla doğrudan duvar yüzeyine sürekli bir katman oluşturacak biçimde uygulanmaktadır (Mavi, 2000). Çizelge 1.1’de bağlayıcı malzeme alanındaki kronolojik gelişmeler gösterilmektedir.

Çizelge 1.1. Bağlayıcı malzeme alanındaki kronolojik gelişmeler (S. T. Erdoğan ve T. Y. Erdoğan, 2007)

Dönem	Bağlayıcı Alanında Gelişmeler
M.Ö. 8000 Öncesi	Killi toprakların bağlayıcılık potansiyelinin keşfi
M.Ö.8000- M.Ö.4500	Alçı ve kirecin bilinçli olarak üretimi
M.Ö.4500- M.Ö.300	Kireç, alçı ve killi topraklardan üretilen harçların kullanımı
M.Ö.300- M.S.1453	Roma’da puzolan karışımlı harçların hidrolik bağlayıcılığının keşfi
1453- 1690	Osmanlıda horasan harcının üretilme ve yaygın kullanımı
1690-1790	Eddystone deniz fenerinin yapımı
1790-1800	İngiltere’de doğal çimento üretimi ve kullanımı
1800-1824	Hidrolik kireç bağlayıcının üretimi ve gelişimi
1824-1850	Portland çimentosunun üretimi
1850-1865	Betonarme malzemenin kullanılmaya başlanması
1865-1900	Bağlayıcı malzemeler ve beton için temel deney yöntemlerinin standardizasyonu
1900-1910	Hazır beton üretimi
1910-1920	Türkiye’de ilk çimento fabrikasının kurulması
1920-1930	Öngerilmeli beton üretimi
1930-1950	Betonun poMPa gücü kullanılarak taşınması ve vibrasyon uygulaması
1950-1970	Kimyasal ve mineral katkı malzemelerinin geliştirilmesi
1970-1980	Lifli beton kullanımı

Duvar örgü harçları ise; kagir elemanları birleştirmek ve yatay yükleri almak amacıyla farklı bağlayıcılarla hazırlanan harçlardır (Eriç, 2010). Şaplar, yapıların kaba döşemelerinde düzgün bir yüzey elde etmek ve su geçirimsizliği sağlamak için kullanılan yüksek dozajlı çimento bağlayıcılı harçlardır. Yüksek dozajlı olması sebebiyle meydana gelebilecek rötreği engellemek için büyük şap yüzeyler parçalı olarak dökülmeli ve nemli ortamda kürlenmelidir. Şaplar aynı zamanda ses izolasyonu sağlamak amacıyla yüzer şap uygulamasında da kullanılırlar. Şerbetler, yapıdaki çeşitli onarım işlerinde, gevşek

zeminlerin takviyesinde ve geçirimsizlik sağlamak amacıyla çatlakların doldurulmasında kullanılan harç türüdür (Eriç, 2010).

Harç, yapı bileşenlerini birbirine bağlayan ve bir bütün olarak davranmalarını sağlayan bir malzemedir. Harç, bileşenlere gelen basınç yüklerini dağıtarak yapının dayanıklılığını arttırır. Harcın dayanımı; fiziksel ve kimyasal özelliklerinin yanı sıra yapının plan şekli, tasarımı, malzemelerinin birbiri ile uyumuna, uygulama şekline, geçirmiş olduğu onarımlar ve oluşan bozulmalar gibi birçok etkene bağlıdır (Akbulut, 2006).

Yığma yapıyı oluşturan malzemelerin basınç mukavemetleri yüksek, çekme mukavemetleri düşük mekanik özelliğine sahip olan malzemelerdir. Bu nedenle yapı elemanın kayma dayanımı ve çekme dayanımı açısından harç dayanımının rolü büyüktür. Harçlar, yapı elemanlarının dayanıklılığını ve bütünlüğünü sağlamak için kullanılan malzemelerdir. Bu nedenle, yüksek mukavemet, aderans dayanımı ve dış etkilere karşı dayanıklılık gibi özelliklere sahip olmaları gerekir. Harçlar, ayrıca birlikte kullanıldıkları taş veya tuğlanın fiziksel ve kimyasal özellikleri ile uyumlu olmalıdır. Bununla birlikte, harcın yapı elemanının en zayıf kısmı olması istenir. Bu sayede, yapı elemanına gelen gerilmeler harç tarafından emilir ve taş veya tuğlanın kırılması önlenir (Akyurt Takır, 2022).

1.1.3. Tarihi yapılarda yıpranmaya neden olan etkenler

Yapıldığı tarihten itibaren bütün tarihi yapılar doğal ve beşerî etkenler altında bozulmaya uğramaktadır. Bu süreçte yapılarda oluşan büyük hasarlar yapıların yıpranmasına ve kültürel değerinin kaybetmesine hatta yıkılmasına yol açmaktadır (Dal ve Öcal, 2017). Yaşanan savaşlar, doğa olayları, ülkelerin içinde gerçekleşen siyasal değişimler, maddi yatırımlar gibi çeşitli faktörler, uluslararası önemdeki kültürel mirasın korunması ve aktarılmasını olumsuz yönde etkilemektedir. Bunlara ek olarak insanların kültürel miras konusunda bilinçsiz olmaları ciddi bir tehdit unsurudur (Eyckmans, 2016). Kültürel mirasımız, geçmişten günümüze uzanan ve gelecek nesillere aktarılması gereken önemli bir değerdir. Bu değerlerin korunması ve gelecek nesillere aktarılması için, oluşan hasarların onarılması gerekmektedir. Hasar onarımı yapılırken, mümkün olduğunca az müdahale yapılmasına özen gösterilmelidir. Bu, yapının özgünlüğünün korunması açısından önemlidir. Ayrıca, hasarların nedenlerini araştırarak, aynı hasarların oluşmasının önüne geçilmesi hedeflenmelidir. Bir yapıda hasar onarımı yapabilmek için

öncelikle hasarın tespit edilmesi ve nedenlerinin araştırılması gerekmektedir. Hasar, malzeme, yapı bileşeni veya yapı elemanının karakteristik performansını olumsuz yönde etkileyen etken veya etkenler grubudur. Hasarlara neden olan etkenler, atmosferik etkenler, eleman içindeki malzemelerin birbirine uymamasının neden olduğu etkenler, yapım ve kullanım kusurlarının neden olduğu etkenler gibi çeşitlilik gösterebilir (Aköz, 1989). Hasar nedenleri ve bozulma süreci belirlenmeden yapılan çalışmalar yanlış olabilir ya da tespitler doğru yapılmadığında yapılan çalışmalar amacına uygun olmayabilir. Bu nedenle, hasar onarımı yapılırken, bu hususlara dikkat edilmesi önemlidir (Ahunbay, 1999). Tarihi yapılarda kullanılan harç ve sıvalar, zaman içerisinde çeşitli faktörlere bağlı olarak bozulabilir. Bu nedenle, onarımlarda özgün malzemelere uygun yeni harç ve sıvaların üretilmesi gerekir. Bu harç ve sıvaların üretimi için, orijinal harç ve sıvaların üretiminde kullanılan malzemelerin, zaman içerisinde görmüş oldukları değişimlerin ve bozulma nedenlerinin bilinmesi gerekir.

Yığma yapıların ana taşıyıcı elemanı duvarlardır. Bu nedenle duvarlardaki hasarlar doğrudan doğruya taşıyıcı sistemi etkiler. Yığma duvarlı taşıyıcı sistemler genelde; deformasyon kabiliyeti eksik, süneklikleri zayıf ve gevrek kırılmaya yatkın olma gibi edilgen ve olumsuz niteliklere sahiptirler (Çamlıbel, 2000). Yığma yapılardaki duvarlar temel oturmalarına karşı çok duyarlıdır. Yığma duvarlar zemin oturmalarına karşı uyum sağlayamaz. Duvarlar elastik deformasyon yapamadıkları için çatlarlar. Ayrıca deprem gibi yatay yükler sonucu, duvarlarda çatlaklar oluşur, hatta sistemin aşırı yük taşıması sonucu göçmeler oluşur (Özsaraç, 2008; Bayülke, 2001b).

Yığma yapıların genellikle şu nedenlerden dolayı hasara uğrarlar;

- Yapının tasarımının yönetmeliklere göre yapılamaması,

- Deprem tasarımında, yapının periyodunun, oturduğu zeminin periyodu ile çakışmaması da önemlidir. Bu periyotların çakışması durumunda, yapıda rezonans olayı oluşur ve yapıya normal olarak gelmesi beklenen kuvvetten çok daha büyük bir yanıl kuvvet etki edebilir. Bu da yapıda ciddi hasara yol açabilir.

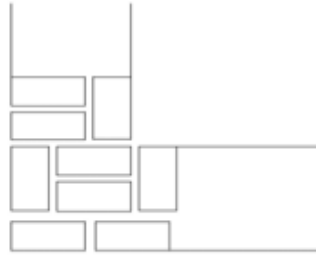
- Yığma yapılar, tuğla, taş, briket gibi kagir malzemelerden inşa edilen yapılardır. Bu yapılar, betonarme yapılara göre daha ağırdır. Ağırlık, yatay yüklere karşı dayanıklılığı azaltır. Bu nedenle, yığma yapılarda deprem gibi yatay yükler daha fazla hasara neden olabilir.

- Taşıyıcı elemanların gevrek yapısı ve taşıyıcı duvar elemanlarının birbirine bağlanmasında kullanılan harcın yeterli çekme mukavemetine sahip olmaması, deprem gibi yatay yükler altında yapının hasar görmesine veya yıkılmasına neden olabilir.

- Yapının basit planlı, simetrik yapılmaması,

- Yatay yük taşıyan duvarların alt katlarda devam etmemesi durumunda, bu kuvvetin bir kısmı yapının üst katlarına aktarılır. Bu da yapının üst katlarında daha fazla hasara veya yıkıma yol açabilir.

- Yapılarda birleşim detaylarının doğru şekilde çözülememesi, çatının ve döşemenin duvara uygun biçimde mesnetlenmemesi ile duvar birleşimlerinin ve köşelerin yeterince düzenlenmemesi, deprem gibi yatay yükler altında yapıda hasar ya da yıkıma neden olabilir. Dik doğrultuda birleşen iki duvarın köşe noktasında, Şekil 1.4'te gösterildiği gibi, düzgün kesilmiş taşlarla geçme yapılması; duvarların birbirine daha sağlam bağlanmasını ve yapının daha yüksek rijitlik kazanmasını sağlar. Bu durum da yapının deprem gibi yatay yükler altında daha dayanıklı olmasına katkı sunar (Karaesmen, 1996).



Şekil 1.4. Yığma duvar köşe detayı (Karaesmen, 1996).

- Kırsal bölgelerde yapılan toprak damlar, aşırı ağırlığı nedeniyle deprem gibi yatay yükler altında yapıda hasara veya yıkıma neden olabilir.

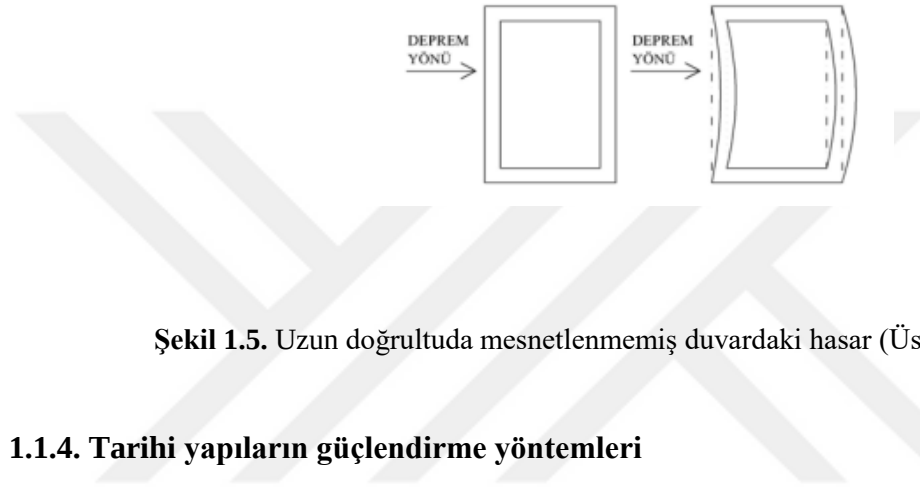
- Yapı elemanının (taş, tuğla vb.) yeterli mukavemete sahip olmaması,

- Duvarlarda kullanılan harcın, yapı elemanlarını birbirine bağlamak ve yapıya rijitlik sağlamak için kullanılır. Harcın yapı elemanları arasındaki boşlukları tam olarak

doldurmaması durumunda, yapıda zayıf noktalar oluşur. Bu zayıf noktalar, deprem gibi yatay yükler altında yapıda hasara veya yıkıma yol açabilir.

- Yapım kalitesinin yetersiz olması, malzeme ve işçiliğin kötü olması, kontrolün olmayışı (Batur, 1999),

- Deprem doğrultusuna dik konumlanan uzun ve mesnetlenmemiş duvarlarda görülen büyük duvar deplasmanları, Şekil 1.5’te gösterilmektedir (Üstündağ, 2000).



Şekil 1.5. Uzun doğrultuda mesnetlenmemiş duvardaki hasar (Üstündağ, 2000).

1.1.4. Tarihi yapıların güçlendirme yöntemleri

Güçlendirme, hasar görmüş veya görmemiş yapıların taşıyıcı sistemlerine yeni malzemeler, elemanlar veya bağlantılar eklenerek veya mevcut elemanların güçlendirilmesi yoluyla yapılır. Bu işlemler, yapının deprem gibi yatay yükler altında daha fazla kesme, burulma ve eğilme gerilmesine dayanmasını sağlar. Yapıların güçlendirilmesi, uzman firmalar ve kişiler tarafından yapılması gereken önemli bir işlemdir. Bu işlem, yapının deprem gibi yatay yükler altında daha dayanıklı olmasını sağlar. Yığma yapılarda, taşıyıcı sistemin malzemesinin düşey yüklere karşı yetersizliği, yanlış inşaat uygulamaları ve kullanıcıdan kaynaklanan hatalar, yapıların güçlendirilmesini gerekli kılar.

Deprem yönetmeliğinin değişmesi, yapıların yeni standartlara uyum sağlaması için güçlendirme yapılmasını gerektirir. Kültürel miras, bir toplumun geçmişini ve kimliğini yansıtan önemli bir değerdir. Bu değerın korunması, gelecek nesiller için aktarılması açısından büyük önem taşır. Kültürel mirasın korunması için farklı yöntemler uygulanabilir. Bu yöntemler, farklı kaynaklarda farklı şekillerde sıralansa da bakım, onarım/sağlamlaştırma, yenileme, restorasyon, yeniden yapma (rekonstrüksiyon),

yeniden kullanım, çağdaş ek, taşıma ve bütünleme gibi yöntemler ortak olarak yer almaktadır.

Tarihi eserlerin korunması için bakım, en önemli ve temel işlemdir. Bakım, eserin yıpranmasını önler ve oluşabilecek hasar veya bozulmaların erkenden tespit edilmesini sağlar. Bu da eserin daha uzun süre korunmasını sağlar. Sürekli bakım ile bir yapı veya yapı grubunun özgünlüğü korunacak ve yapı uzun süre yaşatılacaktır (Zakar, 2018).

Onarım/sağlamlaştırma, eskimiş ve bozulmuş dolgu elemanlarının onarılması strüktürün desteklenmesiyle yapının bütünlüğünün korunmasıdır (Ersen, 2012). Sağlamlaştırma yapılırken malzemenin sağlamlaştırılması, taşıyıcının sağlamlaştırılması ve zeminin sağlamlaştırılması olarak üç başlık altında incelenebilir (Ahunbay, 1999). Sağlamlaştırmada amaç, yeni eklemeler yapmak ya da yapıyı değiştirmek değil var olanı güçlendirmek ve onarmaktır.

Yenileme, bir yapı bileşeninin, elemanının veya sisteminin, kısmen veya tamamen değiştirilmesi veya yenilenmesi işlemidir. Yenileme, malzeme dayanımının düşük olduğu durumlarda veya özgün yapı bileşenlerinin veya elemanlarının sağlamlaştırılarak kullanılması mümkün olmadığında yapılır. Örneğin, bir tarihi binanın duvarlarında kullanılan tuğlaların dayanımının düşük olduğu tespit edilmişse, bu duvarlar yenileme yoluyla tuğla ile yeniden inşa edilebilir. Aynı şekilde, bir tarihi binanın ahşap çatısının çürümüş olması durumunda, bu çatı yenileme yoluyla ahşap veya çelik ile yeniden inşa edilebilir (Zakar, 2018).

Restorasyon, koruma altına alınmış bir tarihi yapının, özgün haline olabildiğince yakın ve sağlam bir şekilde korunmasını sağlayan bir süreçtir. Bu süreç, yapının tarihi, mimarisi, malzemesi ve teknik özellikleri gibi unsurların incelenmesini ve bu unsurlara uygun bir koruma yönteminin geliştirilmesini içerir. Onarma, sağlamlaştırma, rekonstrüksiyon gibi başlıkları kapsamaktadır (Resuloğlu, 2005).

Yeniden yapma, tamamen yok olmuş veya büyük ölçüde zarar görmüş anıtların veya sit alanlarının, özgün haline olabildiğince yakın bir şekilde yeniden inşa edilmesidir. Ancak, bu şekilde inşa edilen yapı, özgün anıtın işçiliği ve tarihi dokusunu tam olarak yansıtamaz. Yeniden yapılacak yapıların şehirde önemli bir imge olması ya da tarihi kompozisyonun parçası olması gerekir. Yeniden yapım için yeterli belgelerin bulunması gerekir (Ahunbay, 1999). Anıtların yeniden yapılması, geçmişi gelecek nesillere aktarmanın önemli bir yoludur. Ancak, anıtların yeniden yapılması için yeterli bilgi ve belge bulunmaması durumunda, rekonstrüksiyon yapmak yerine, anıtın kalıntılarını korumak daha doğru bir seçim olabilir.

Taşıma, anıtların bulunduğu konumda korunmasının güç olduğu şartlarda gerçekleşir. Anıtların bulunduğu konumda korunması artık mümkün olmadığında, anıtlar başka bir yere taşınabilir. Bu taşıma işlemi, anıtın özgünlüğünü ve tarihsel değerini korumak için gereklidir. Farklı teknikler var olsa da en kolayı, tüm parçaların numaralandırılarak sökülmesi ardından taşındığı konumda bir araya getirilmesidir (Ahunbay, 1999).

Yeni kullanım (yeni işlev), anıtın eski işlevini yitirmesi, kullanıcının ihtiyacını karşılamaması sonucunda farklı işlev verilerek veya güncelleştirilerek yeniden kullanılması sağlanır. Yapıların korunmasında en etkili yol, onları kullanmaya devam etmektir. Âtıl kalan, kullanılmayan yapılar, bakımsız olarak varlığını sürdürmekte zorlanır ve zamanla yok olmaya mahkumdur. Bu yapıların yeni fonksiyonla hayata kazandırılması sürdürülebilirliğini sağlamaktadır (Kincaid, 2002).

Çağdaş ek, anıtlarda yeni kullanımlarda yeni eklere ihtiyaç duyulması durumunda uygulanır. Çağdaş yaşamın gereklilikleri için projeler bu eklerle birlikte düşünüldüğü takdirde başarılı olur (Ahunbay, 1999). Tarihi yapıda çağdaş ekler yapıya en az müdahale gerektirecek ve çevre bağlantısına zarar vermeyecek şekilde dönemini malzeme, teknik ve üslup olarak yansıtan nitelikte olmalı (Zeren, 2010).

1.2. Kireç

1.2.1. Kireçtaşı ve kirecin genel tanımı

Kireç taşının (CaCO_3 - $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$) çeşitli derecelerde ($850-1400\text{ C}^\circ$) pişirilmesi sonucu elde edilen su ile karıştırıldığında tipine göre hava veya suda katılma özelliği gösteren beyaz renkli inorganik esaslı bir bağlayıcı türüdür (Eriç, 1994).

Kireçtaşının elverişli sıcaklıklarda kireç ocaklarında yakılması ve içeriğindeki karbondioksit gazının uçurulması işlemi ile elde edilen parçalara kireç (CaO) denilmektedir (Şimşek, 2001).

Bu olaya aynı zamanda kalsinasyon denir;



Sönmemiş kireç ise suyla reaksiyona girdiğinde, ortama ısı vererek toz halindeki sönmüş kirece ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) dönüşür (hidratasyon veya söndürme):



Sönmemiş kireç (CaO), suyla reaksiyona girerek sönmüş kireç (Ca(OH)₂) haline gelir. Her iki madde de farklı amaçlar için kullanılabilir. Sönmemiş kireç, yapı malzemesi olarak, sönmüş kireç ise kimyasal madde olarak yaygın olarak kullanılır.

1.2.2. Kireçtaşının fiziksel ve kimyasal özellikleri

1.2.2.1. Fiziksel özellikleri

Kireçtaşı, kimyasal bileşimi ve fiziksel özellikleri bakımından farklılıklar gösteren doğal bir mineraldir. Moleküler ağırlığı, içerdiği karbonat türüne bağlı olarak değişir; CaCO₃ için yaklaşık 100,09 g/mol, MgCO₃ için ise 84,32 g/mol olarak belirlenmiştir. Kireçtaşının rengi, saflık ve safsızlık içeriklerinin bir göstergesi olarak değerlendirilmektedir. Saf kireçtaşları genellikle beyaz renkte olup, gri tonlar karbon kaynaklı safsızlık veya demir sülfat varlığını işaret eder. Kahverengi, yeşil, açık sarı ve kırmızı renkler demir ve mangan minerallerinin, pembe tonlar ise dolomitik yapının varlığını göstermektedir. Kristal yapıya sahip olan kireçtaşlarında kristallerin boyutu, homojenliği ve düzeni farklılık gösterebilir; bu da yoğunluk ve sertlik değerlerini etkileyen temel faktörlerdendir. Porozite oranı %0,1-3 arasında değişen kireçtaşlarının su emme kapasitesi, gözenek ve organik madde miktarına bağlı olarak yoğunluğu yüksek türlerde yaklaşık %0,4 olarak belirlenmiştir. Özgül ağırlığı 2,5-2,7 g/cm³ arasında değişen kireçtaşlarının görünür yoğunluğu, gözenek oranı ve içlerindeki su miktarına bağlı olarak değişkenlik gösterir ve 110 °C’de kurutulmuş örneklerde 1,5-2,3 g/cm³ arasında ölçülmektedir. Öğütülüp elenmiş kireçtaşının birim hacimdeki ağırlığını ifade eden yığın yoğunluğu ise görünür yoğunluk, tanecik boyutu dağılımı, şekil ve nem oranına bağlıdır; örneğin, görünür yoğunluğu 2,7 g/cm³ ve ebat oranı 1,2 olan bir kireçtaşının yığın yoğunluğu yaklaşık 1,40-1,45 g/cm³’dür. Kireçtaşının sertlik değeri Mohs skalasında genellikle 2-4 arasında değişirken, ısı iletkenliği gözeneklilik ve yapı özelliklerine bağlı olarak sıcaklık arttıkça azalmaktadır; 130 °C’de yapılan ölçümlerde 0,0039 cal·cm/cm²·s·°C olarak bulunmuştur. Isıl genleşme katsayısı 100-150 °C aralığında 0,00001 ile 0,000035 1/°C arasında değişmektedir. Yüksek sıcaklıklarda kireçtaşları

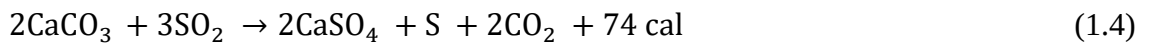
erimeye başlamadan önce oksitlerine dönüşür; CaO'nun erime noktası yaklaşık 2800 °C, MgO'nun erime noktası ise 2570 °C'dir.

1.2.2.2. Kimyasal özellikler

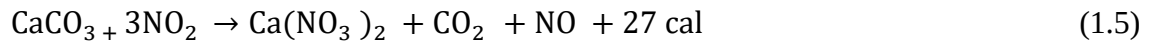
Kalsitik ve dolomitik kireçtaşları, kimyasal açıdan oldukça kararlı yapılar olarak bilinir ve yaklaşık 600 °C'ye kadar ayrışmadan kalabilirler; ayrıca karbondioksit içermeyen sulardan etkilenmezler. Ancak sıcaklık daha da yükseldiğinde kalsiyum okside dönüşme eğilimi gösterirler. Kireçtaşının çözünürlüğü, karbondioksit içeren sularda belirgin şekilde artar; bu durumda kireçtaşı, dönüşümlü bir reaksiyonla kalsiyum bikarbonata dönüşür. Su içindeki pH değerleri ise kireçtaşının türüne bağlıdır; kalsitik kireçtaşlarının pH'ı 8-9 arasında iken, dolomitik kireçtaşının pH değeri 9-9,2 civarındadır. Ayrıca kireçtaşı kuvvetli asitlerle reaksiyona girerek karbondioksit gazı ve tuz oluşumuna yol açar; bu özellik, asitlerin zararlı etkilerini nötralize etmek amacıyla kullanılabilmesini sağlar.



Kalsitik kireçtaşı, seyreltik hidroklorik ve nitrik asitlerle oda sıcaklığında kolayca reaksiyona girer. Ancak, kükürtlü asitlerle reaksiyona girmesi için 95 °C'nin üzerinde bir sıcaklık gerekir. Bu reaksiyon, baca gazı desülfürizasyon prosesinin temelini oluşturur.



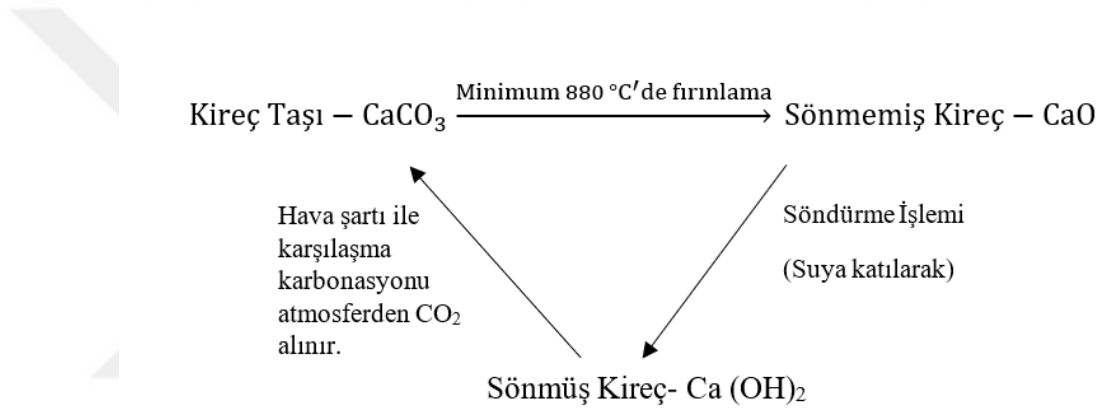
Kireçtaşı, azotdioksit içeren gazlarla da kireç kadar hızlı reaksiyona girer.



Azotmonoksit, bir baz değildir. Bu nedenle, kireçtaşı ile asit-baz reaksiyonu oluşturmaz. Kalsinasyon, kireçtaşının yüksek sıcaklıklarda karbondioksit gazı vererek kalsiyum okside dönüşmesidir.

1.2.3. Kirecin üretim yöntemi

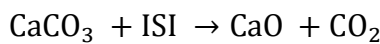
Kirecin oluşum döngüsü, termal dekompozisyon süreci ile gerçekleşir ve kireçtaşının en temel özelliği kalsinasyon ile ilişkilidir. Bu döngü üç ana aşamadan oluşur: Öncelikle kireçtaşının yakılması işlemi olan kalsinasyon gerçekleştirilir; ardından açığa çıkan kalsiyum oksit, su ile reaksiyona sokularak kirecin söndürülmesi işlemi yani hidrasyon yapılır. Son aşamada ise, ortaya çıkan sönmüş kireç, karbondioksit ile reaksiyona girerek tekrar kireçtaşına dönüşür; bu süreç karbonatlaşma veya karbonizasyon olarak adlandırılır. Şekil 1.6'da kirecin bu oluşum döngüsü şematik olarak gösterilmektedir.



Şekil 1.6. Kirecin oluşum döngüsü

Kireç, kireçtaşlarının kalsinasyonu ile elde edilir. Kireçtaşı, kalsiyum karbonat (CaCO_3) mineralinden oluşur. Kireçtaşı, $900\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'de kalsine edildiğinde, kalsiyum karbonat, kalsiyum oksit (CaO) ve karbondioksit (CO_2) gazına ayrışır. Bu işleme kireç taşlarının yakılması denir. Kalsiyum oksit, sönmüş kireç olarak bilinir. Sönmüş kireç, suya eklendiğinde, kalsiyum hidroksit (Ca(OH)_2) haline gelir. Kalsiyum hidroksit, bir bağlayıcı maddedir ve yapı malzemelerinde kullanılır.

Sönmüş kireç, sönmemiş kirecin suyla reaksiyona girmesi sonucunda oluşan kalsiyum hidroksit (Ca(OH)_2)'dir. Sönmüş kireç, havadaki nem ile de sönebilir. Havadaki nem oranı %15'in üzerindeyse, sönmemiş kireç kendiliğinden sönebilir (Boynton, 1980).

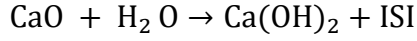


Yakma İşlemi (1.6)

CaO: Sönmemiş kireç

CaCO₃: Kireçtaşı

CO₂: Karbondioksit



Söndürme İşlemi (1.7)

CaO: Sönmemiş kireç

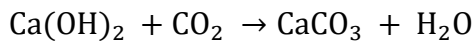
H₂O: Su

Ca(OH)₂: Sönmüş kireç

Söndürme işleminde kullanılan suyun saflığı, su/kireç oranı ve karıştırma şekli, kirecin özelliklerini belirlemektedir (Böke vd., 2004). Saf su, kirecin daha hızlı ve daha iyi sönmesini sağlar. Su/kireç oranı, kirecin sertliğini ve mukavemetini etkiler. Karıştırma işlemi, kirecin homojen bir şekilde sönmesini sağlar.

Kireçtaşlarının cinsi, kirecin kimyasal bileşimini ve fiziksel özelliklerini etkiler. Saf kireçtaşları, daha kaliteli kireç üretirler. Kireçtaşlarının büyüklüğü, söndürme işleminin süresini ve kirecin sertliğini etkiler. Gözenekli kireçtaşları, daha hızlı ve daha iyi söner. Kalsiyum karbonat kristallerinin büyüklüğü, kirecin sertliğini ve mukavemetini etkiler (McClellan & Eades, 1970).

Sönmemiş kirecin gözenekliliği ve katıksızlığı, söndürme işlemini hızlandırır. Sönmemiş kirecin ezilmesi de söndürme işlemini hızlandıran bir faktördür. Söndürme işleminde kullanılan suyun saflığı da önemlidir. Sülfat ve sülfat iyonları içeren su, söndürme işlemini geciktirirken, klorür iyonları ise hızlandırmaktadır. Ancak klorür iyonları, kirecin tuzlanmasına neden olabilir. Söndürme hızını arttırarak yüksek oranlarda sönmüş kireç elde edilmesi söndürme sırasında yapılan karıştırma işlemi sonucudur (Boynton, 1980).



Karbonatlaşma İşlemi (1.8)

Ca(OH)₂ : Sönmüş kireç

CO₂: Havadaki karbondioksit

CaCO₃: Kireç taşı

H₂O: Buharlaştıran su

Sönmüş kireç, sönmemiş kirecin kalsiyum hidroksit oluşturmak için kafi miktarda su ile karıştırılarak kimyasal işlem görmesiyle elde edilen kireç türüdür (Morehead, 1986). Kirecin karbonatlaşma işleminde, karbondioksit gazının konsantrasyonu, suyun miktarı ve kirecin geçirimsizliği çok önemlidir (Uğurlu, 2005).

Kireçler, su ile reaksiyona girme özelliklerine göre hidrolik ve hidrolik olmayan olmak üzere ikiye ayrılır. Hidrolik kireçler, kalsiyum alüminat ve kalsiyum silikatlar gibi hidrolik katkı maddeleri içerirler. Bu katkı maddeleri, kirecin su ile reaksiyona girmesini ve sertleşmesini sağlar. Hidrolik olmayan kireçler ise bu katkı maddelerini içermezler. Hidrolik olmayan kireçlerde sertleşme, kirecin içerisindeki CaO ile atmosferde bulunan CO₂ arasındaki tepkimesiyle gerçekleşmektedir (Pavia & Treacy, 2006).

1.2.4. Kirecin kullanım alanları

Hemen hemen her endüstriyel ürüne katkı sağlayan kirecin sayılmayacak kadar kullanım alanları bulunmaktadır. Başlıca kullanım alanları;

İnşaat sektörü; harç ve sıva yapımı, beton ve çimento üretiminde kireç taşı hammaddesi olarak ve zemin iyileştirmelerinde.

Tarım sektörü; toprak düzenleyici ve gübre katkısı olarak kullanılır.

Sanayi; kağıt sanayisinde, cam sanayisinde, metal sanayisinde ve kimya sanayisinde kullanılır.

Çevre rehabilitasyonunun sağlanması amacıyla kullanılır. Özellikle su ve atık su arıtma sistemlerinde kullanılır.

Yol yapımında kullanılan asfaltın dayanımını arttırmada kullanılır.

Yapı malzemeleri üretiminde, malzemenin mukavemetini, esnekliğini ve bağlayıcılığı gibi özelliklerini geliştirmesinde ayrıca yalıtım malzemelerinin yapımında kullanılır (Bostancı, 2020; DPT, 2001a).

1.2.5. Kirecin sınıflandırılması

Kireçler, çevre şartlarına bağlı olarak katılaşma veya karbonatlaşma özellikleri gösterirler. Hava ortamında katılaşma yeteneği olan kireçlere "hava kireci" (hidrolik olmayan kireç) denirken, su ortamında katılaşma özelliği gösteren kireçlere ise "su kireci" (hidrolik kireç) adı verilir.

Hava kireçleri, bünyesindeki kalsiyum oksit (CaO) oranına göre dolomitik ve kalsiyum kireçleri olarak adlandırılır. Dolomitik kireçler, bünyesinde %40'tan fazla magnezyum oksit (MgO) içeren kireçlerdir. Kalsiyum kireçleri ise bünyesinde %40'tan az magnezyum oksit içeren kireçlerdir.

Su kireçleri ise hidrolik özellik gösterme durumuna göre doğal ve yapay hidrolik kireçler olarak ikiye ayrılır. Doğal hidrolik kireçler, bünyesindeki kalsiyum silikat, kalsiyum aluminat ve kalsiyum aluminosilikatlar gibi hidrolik reaksiyona giren mineraller sayesinde suda katılaşıırken, yapay hidrolik kireçler doğal hidrolik kireçlere çeşitli katkı maddeleri eklenerek elde edilmektedir. Kireçlerin bu şekilde sınıflandırılması Şekil 1.7'de gösterilmektedir.



Şekil 1.7. Kirecin sınıflandırılması(TS EN 459-1, 2015).

1.2.5.1. Hidrolik olmayan kireçler (Hava Kireci)

Kireçtaşı doğada nadir saf halde bulunan kalkerli bir kayadır. Saf kireç, kütlece %56 kalsiyum oksit (CaO) ve %44 karbondioksit (CO₂) içermektedir. Yapısında genellikle kabul edilebilir miktarda MgCO₃ (magnezyum karbonat) ile birlikte az

miktarda (en fazla %6) silikat, aluminat, demir oksit ve alkali gibi empüriteler barındırır (Debes, 1949; Erdoğan, 2009).

Hava kireçleri, kimyasal içeriklerine göre kalsiyum kireci ve dolomitik kireç olmak üzere iki sınıfa ayrılır. Kalsiyum kireçleri, bünyesinde %90'dan fazla kalsiyum oksit (CaO) içeren kireçlerdir. Bu kireçler, büyük oranda kalsiyum oksit veya kalsiyum hidroksitten meydana gelir. Dolomitik kireçler ise bünyesinde %40'tan fazla magnezyum oksit (MgO) içeren kireçlerdir. Kalsiyum magnezyum oksit veya kalsiyum-magnezyum hidroksitten oluşan bu kireçler, bünyelerinde bulunan toplam CaO ve MgO miktarının kütlece oranına göre sınıflandırılmaktadır. Hava kireçlerinin kimyasal bileşim esas alınarak yapılan bu sınıflandırması Çizelge 1.2'de verilmektedir (TS EN 459-1, 2015).

Çizelge 1.2. Kalsiyum kireci ve dolomitik kirecin kimyasal içeriğine göre sınıflandırılması (TS EN 459-1).

Sınıf	CaO+MgO (En az %)	MgO (En çok %)	CaO (En çok %)	Serbest Kireç (En çok %)
CL90	90	5	4	80
CL80	80	5	7	65
CL70	70	5	12	55
DL90-30	90	30	6	2
DL90-5	90	5	6	2
DL85-30	85	30	9	2
DL80-5	80	5	9	2

1.2.5.2. Hidrolik kireçler (Su Kireci)

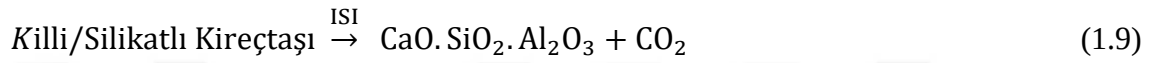
Hidrolik kireç, bileşiminde %10'dan fazla kil içeren kireçtaşlarının, yüksek sıcaklıklarda (1200-1400 °C) pişirilmesiyle elde edilir. Öğütüldükten sonra su ile karıştırılan hidrolik kireç belirli bir süre içerisinde su veya havaya ihtiyaç duymadan priz almaktadır (Akbulut, 2006; Hedin, 1963).

Hidrolik kireç, su altında da sertleşme özelliğine sahip bir kireç türüdür. Saf kireçten farklı olarak, karbondioksit olmaksızın da sertleşmeyi sürdürebilir. Hidrolik

kireç, saf kireçten farklı olarak, daha yüksek mukavemetli harçlar üretmek için kullanılabilir. Bu, hidrolik kirecin, kalsiyum ve magnezyum karbonatla birlikte reaktif silika, alüminyum oksit ve/veya kil içeriğine sahip kireçtaşlarından üretilmesinden kaynaklanmaktadır (Ashurst, 2003).

Hidrolik kireç, saf kireç gibi karbonasyona uğrayarak sertleşebilir. Ancak, hidrolik kireçte bulunan reaktif silika ve alüminyum oksit, kalsiyum silikat hidratlar ve kalsiyum alüminyum hidratların oluşumuna yol açarak, sertleşme sürecini hızlandırır ve daha güçlü bir harç veya sıva elde edilmesini sağlar (Griffin, 2005).

Hidrolik kireç oluşumunda üç farklı reaksiyon gerçekleşmektedir;



Killi veya silikatlı kireçtaşlarının yüksek ısıda (950-1250°C arası) pişirilerek karbondioksitin uzaklaştırılması,



Hidrolik kirecin suyla karıştırıldığında bünyesindeki serbest kalsiyum oksit (CaO) suyla tepkimeye girerek kalsiyum hidroksite (Ca(OH)₂) dönüşmesi,



Silikat ve alüminatlar ise yine suyla tepkimeye girerek kalsiyum-silikat-hidrat (C-S-H) denilen ve portland çimentosunda da görülen jel yapıyı oluştururlar,



Hidrolik kireç suyla karıştırıldığında, sönmüş kireç içindeki serbest kalsiyum oksit suyla tepkimeye girerek kalsiyum hidroksite (Ca(OH)₂) dönüşür. Bu reaksiyona hidroliz denir. Oluşmuş kalsiyum hidroksit, havadaki karbondioksit ile su ortamında tepkimeye girerek kalsiyum karbonatı (CaCO₃) oluşturur. Bu reaksiyona kalsifikasyon denir. Hidroliz ve kalsifikasyon reaksiyonları, tek yönlü ve doğrusal reaksiyonlardır. Bu, reaksiyonun geri döndürülemez olduğu anlamına gelir. Hava kireci, kireç taşının aşınmasıyla oluşan kalsiyum karbonat tozudur. Havadaki karbondioksit, hava kirecini

kalsiyum hidroksite dönüştürür. Bu kalsiyum hidroksit, kireç suyunda tekrar kalsiyum karbonata dönüşür. Reaksiyon 1.12’de bu döngü sürekli olarak devam eder.

1.2.5.2.1. Yapay hidrolik kireçler (AHL)

Yapay hidrolik kireç, hava kirecine çeşitli puzolanik veya hidrolik katkıların eklenmesi ile elde edilen bir kireç türüdür. Puzolanik katkılar, volkanik kül, silisli kil ve bazı mineraller gibi malzemelerdir. Hidrolik katkılar ise, kalsiyum silikat ve kalsiyum aluminat gibi kalsiyum bileşikleridir. Yapay hidrolik kireçler, kalsiyum hidroksit içeriğine ve hidrolik özelliklerine göre iki sınıfa ayrılır. Formüle edilmiş kireç ve yapay hidrolik kirecin sahip olması gereken kimyasal ve mekanik özellikler Çizelge 1.3’te sunulmuştur.

Çizelge 1.3. Formüle edilmiş kireç ve yapay hidrolik kirecin sahip olması gereken kimyasal ve mekanik özellikler (TS EN 459-1: Çizelge 20-21-24-25).

Sınıf	Ca (OH) ₂ (%)	SO ₃ (En çok %)	7 gün (MPa)	28 gün (MPa)
FL A	40-80	2	-	2-7
FL B	25-50	2	-	3,5-10
FL C	15-40	2	Min.2	5-15
HL (2)	>10	3 ^a	-	2-7
HL (3,5)	>8	3 ^a	-	3,5-10
HL (5)	>4	3 ^a	Min.2	5-15

(a TS EN 459-2:2010’da verilen suda kütleme uygulandığı takdirde %7’ye kadar izin verilir.)

Formüle edilmiş kireç (Formulated Lime - FL), yüksek miktarda kalsiyum hidroksit içeren ve puzolanik ya da hidrolik katkılarla zenginleştirilmiş yapay hidrolik kireç türüdür. Hidrolik kireç (Hydraulic Lime - HL) ise çimento, yüksek fırın cürufu, uçucu kül gibi katkıların ilavesiyle hidrolik özellik kazandırılmış, kalsiyum hidroksit oranı görece düşük olan yapay hidrolik kireçleri ifade etmektedir (TS EN 459-1, 2015).

1.2.5.2.2. Doğal Hidrolik Kireçler (NHL)

Doğal hidrolik kireç, killi-silisli kireçtaşlarının ısıtılması ve öğütülmesi ile elde edilen bir kireç türüdür. Bu kireçler, herhangi bir ek katkı olmaksızın hidrolik özellik gösterir. Bu, doğal hidrolik kireçlerin havadaki karbondioksit ile reaksiyona girerek sertleşebildiği anlamına gelir. Doğal hidrolik kireç, tarihi yapılarda uzun yıllar boyunca kullanılan geleneksel bir bağlayıcıdır ve bu nedenle tarihi dokunun ve yapıların bütünlüğünü koruma konusunda önemli bir rol oynar. Doğal hidrolik kireç, çevresel ve tarihi uyumluluğu nedeniyle tarihi binaların restorasyonunda ve onarımında önemli rol oynamaktadır.

Doğal hidrolik kireç, sertleşme özelliğine sahip olması ve aynı zamanda nefes alabilir bir yapı oluşturması nedeniyle tercih edilir. Bu özellikler, neme duyarlı olan tarihi yapıların zarar görmesini önlemeye yardımcı olur. Doğal hidrolik kireçler, 28 günlük basınç dayanımı ve eğilme dayanımı değerlerine göre sınıflandırılır. Doğal hidrolik kireçlerin basınç dayanımına göre sınıflandırılması Çizelge 1.4'te sunulmaktadır. Bu sınıflandırma, doğal hidrolik kireçlerin sertliğini, dayanıklılığını, esnekliğini ve kullanım alanlarını belirlemede önemli bir rol oynar.

Çizelge 1.4. Doğal hidrolik kireçlerin basınç dayanımına göre sınıflandırılması (TS EN 459-1).

Yapı Kireci Tipi	Basınç dayanımı (fc) N/mm ²	
	7 günlük	28 günlük
HL (2)	-	2-5
HL (3,5)	≥ 1,5	3,5-10
HL (5)	≥ 2,0	5-15 ¹⁾
1)Yığın yoğunluğu 0,90 kg/dm ³ 'den az olan HL 5'in 20 N/mm ² 'ye kadar dayanıma sahip olmasına müsaade edilir.		

1.2.6. Hidrolik kireç harçları

Harç, bağlayıcı malzeme, dolgu malzemesi ve suyun belirli oranlarda karışımı ile elde edilen, yapıda tuğla ve taş gibi blok biçimli elemanların birbirine bağlanmasını sağlamak amacıyla kullanılan, katılaşma özelliğine sahip yapı hamurlarına verilen isimdir. Sıva harcı ise, kagir yüzeyleri biçimlendirmek ve korumak için duvar ve tavan

yüzeylerinin kaplanması amacıyla kullanılan harca verilen isimdir. Harç ve sıvalar, çeşitli bağlayıcı malzemeler ve katkı maddeleri kullanılarak üretilebilir. Harç ve sıvaların özellikleri, kullanılan bağlayıcı malzeme ve katkı maddelerinin niteliğine göre değişebilir (Çimento harç ve sıvaları, kireç harç ve sıvaları, alçı harç ve sıvaları vb.) (Hasol, 1988).

Milattan önce 4. yüzyılda, Grekler, sönmüş kireçle bazı volkanik orijinli toprakları karıştırarak su geçirmez harçlar geliştirdiler. Bu harçlar, güçlü nem koşullarında bile sertleşebildiğinden, tuğla ve taş gibi yapı elemanlarının birbirine bağlanmasında ve duvar ve tavan yüzeylerinin kaplamasında kullanıldı. Grekler, bu harçları geliştirmek için, volkanik orijinli topraklarda bulunan silikat ve aluminat bileşiklerinin özelliklerini kullandılar. Bu bileşikler, su ile reaksiyona girerek sertleşen hidrolik bileşikler oluşturur. Sönmüş kireç, bu bileşiklerin sertleşmesini hızlandırmaya yardımcı olur. Grekler tarafından geliştirilen su geçirmez harçlar, antik dünyanın en önemli yapısal gelişmelerinden biri olarak kabul edilir. Bu harçlar, Roma İmparatorluğu ve daha sonraki medeniyetlerin yapılarında yaygın olarak kullanıldı.

Romalılar, harç geliştirmede önemli bir rol oynadılar. Milattan önce 2. yüzyılda, Romalılar, Pouzzoles yakınlarındaki Napoli tüflerini buldular. Bu tüfler, çok etkili bir hidrolik reaksiyona neden oluyordu. Romalılar, bu tüfleri sönmüş kireçle karıştırarak, pouzzolone adı verilen bir harç geliştirdiler. Pouzzolone harcı, su geçirmez ve dayanıklıydı. Bu harç, Roma İmparatorluğu'nda yaygın olarak kullanıldı. Romalılar, ayrıca öğütülmüş pişmiş toprak ve kirecin bir karışımını kullanarak başka bir hidrolik harç keşfettiler. Bu harç, pouzzolone harcı kadar dayanıklı olmasa da daha kolay ve ucuz bir şekilde üretilebiliyordu. Romalılar, bu harcı, su kemerleri, köprüler ve diğer yapılarda kullandılar.

Romalılar, yapı inşasında önemli bir rol oynayan bir harç geliştirdiler. Bu harç, öğütülmüş pişmiş toprak ve kirecin bir karışımından oluşuyordu. Bu harç, günümüzde "Cocciopesto" adı altında biliniyor. Cocciopesto harcının geliştirilmesi, Romalılara, imparatorluklarının her yerinde bu malzemeyi üretme olanağı sağladı. Bu harç, su geçirmez ve dayanıklıydı. Bu nedenle, Romalılar bu harcı, su kemerleri, köprüler ve diğer yapılarda kullandılar. Cocciopesto harcı, Romalıların yeni bir inşaat tekniği ortaya koymasına da yardımcı oldu. Bu teknik, "opus signinum" olarak adlandırılıyordu. Opus signinum tekniğinde, Cocciopesto harcı, çakıl taşları ve diğer malzemelerle karıştırılarak kullanılıyordu. Bu teknik, su geçirmez ve dayanıklı zemin kaplamaları üretmek için kullanılıyordu. Romalılar, yapı inşasında önemli bir rol oynayan iki malzeme geliştirdiler:

hidrolik harç ve hafif beton. Elde edilen bu hidrolik harçla ponza taşı da kullanarak birim ağırlığı düşük beton (hafif beton) ürettiler (Kurugöl, 2006).

Kireç harç ve sıvaları, eski Yunan, Roma ve onu izleyen dönemlerde yapı inşasında yaygın olarak kullanılmıştır. Bu harç ve sıvalar, çimentonun bulunmasına kadar geçen sürede yapıların inşasında temel malzeme olarak kullanılmıştır (Böke vd., 2004). Çimento su ile etkileşime girdiğinde suda çözünür tuzlar oluşturur. Bu tuzlar tarihi yapıda bozulmalara yol açar. Bu nedenle çimento tarihi yapıların onarımı için uygun görülmemiştir.

Hidrolik kireç harçları, su ile temas halindeyken bile sertleştiklerinden, ıslak mekânlarda kullanım için idealdir. Islak mekanlar su ile doğrudan veya nemin duvarlarda yoğunlaşması sonucunda sürekli temas halindedir. Bu nedenle, sıvaların su geçirmez ve dayanıklı olması gerekir. Hidrolik kireç harçları, su geçirmezdir. Bu, sıvaların su ile temas halindeyken bile bozulmasını önler. Ayrıca, hidrolik kireç harçları, dayanıklı bir yapıya sahiptir. Bu, sıvaların uzun yıllar boyunca kullanılabilmesini sağlar. Su yapılarında kullanılan sıvalar, zamanla bozularak tabakalara ayrılabilir. Ancak, hidrolik kireç harçlarında bulunan kalsiyum karbonat, sıvanın yapısını tutarak, sıvanın parçalanmasını önler. Bu nedenle, hidrolik kireç harçları, ıslak mekânlar için kullanılabilecek en uygun malzemelerden biridir.

1.3. Mermer

1.3.1. Mermerin tanımı

Mermer, yeryüzünde doğal olarak bulunan, kalsiyum karbonat (CaCO_3) esaslı bir kayaç türüdür. Mermer, tortul kayaçlardan oluşan kalkerlerin yüksek sıcaklık ve basınç altında yeniden kristalleşmesi sonucu oluşur. Bu süreç, mermerleşme olarak adlandırılır. Mermerleşme, genellikle yer kabuğundaki büyük tektonik hareketler sonucu meydana gelir. Mermer bloklarının örnekleri Şekil 1.8'de gösterilmektedir. Mermerlerin tanımı genelde dört farklı şekilde yapılmaktadır.



Şekil 1.8. Mermer blokları

Bilimsel Tanımı: Bünyesinde %90-98 oranında kalsiyum karbonat içerir. Düşük oranda magnezyum karbonat ($MgCO_3$) ve farklı metal oksitler bulundurulur. Metamorfizma olayı ile başkalaşma sonucundan oluşan yeryüzünde bulunan bir nevi maden türüdür. Yer kabuğu, sürekli olarak hareket halindedir. Bu hareketler, yer kabuğunun katmanlarının yer değiştirmesine ve kıtaların oluşumuna neden olur. Yer kabuğunun hareketi sırasında, kayaçlar da hareket eder. Bu hareketler sırasında, kayaçlar birbirine sürtünerek kırılabilir. Bu kırıklar, derzler olarak adlandırılır. Derzler, zamanla kalsitle dolar. Bu kalsit, yeraltı sularında çözünen kalsiyum karbonat minerallerinden oluşur. Kalsiyum karbonat mineralleri, derzlerin içinde kristalleşir ve mermer damarlarını oluşturur (Kisman ve Kan, 2011).

Jeolojik Tanımı: Mermerler, kalsiyum karbonat ($CaCO_3$) ve dolomitik kireçtaşının metamorfizma olayı sonucu oluşan bir çeşit kayaç türüdür. Metamorfizma, kayaçlarda meydana gelen fiziksel ve kimyasal değişimler sürecidir. Mermerlerin oluşumunda, kalkerlerin yüksek sıcaklık ve basınç altında yeniden kristalleşmesi söz konusudur (Türkiye III. Mermer Sempozyumu, 2001). Mermerler, doğada kayaç olarak farklı türlerde bulunurlar. Bu türlerin oluşum süreçleri ve mineral bileşimleri farklıdır (Kun, 2013).

Ticari Tanımı: Mermer, ticarete metamorfik, magmatik ve tortul olarak tanımlanan, 3213 sayılı Maden Kanunu'na göre, bulunduğu kaynaklardan farklı yöntemler ile farklı boyutlarda, blok şeklinde, soğuma derzlerine göre ve kullanım amacına göre kesilerek elde edilen kayaçlardır (DPT, 2001b). Mermer, yüksek sıcaklık ve basınç altında yeniden kristalleşen kalkerlerdir. Bu nedenle, kesilerek istenilen şekil

verilebilme özelliğine sahip, olup aynı zamanda parlatılarak cilalanabilen ve dayanımı yüksek olan kayalarlardır (Görgülü, 1994).

Petrografik Tanımı: Mermer, diğer metamorfik kayalar gibi, yüksek sıcaklık ve basınç altında yeniden kristalleşen kalsiyum karbonat minerallerinden oluşur. Ancak, mermer diğer metamorfik kayalardan farklı olarak, genellikle aynı boyutlarda kalsit kristallerinden oluşur. Bu, mermere parlak ve pürüzsüz bir yüzey verir. Mermer, yapısında boşluk bulundurmadağı için de dayanıklı bir kayaç türüdür (Yeşilkaya, 1995).

1.3.2. Mermerin kullanım alanları

Tarihten günümüze kadar mermer farklı alanlarda ve farklı amaçlar için kullanılmaktadır. Son 1.000 yıl içerisinde Orta Doğu'da, Romalılar, Bizanslar, Selçuklular ve Osmanlılar döneminde inşa edilen saray, cami, kilise, hamam ve heykel, süslemelerinde oldukça yoğun bir şekilde mermer kullanılmıştır (Kun, 2013; Kulaksız vd., 2001). Günümüzde yaygınlaşan dekoratif malzemelerin artmasıyla mermere olan talepte de paralel bir artış göstermektedir. Dekoratif eşyalarda, yapıların iç dış cephelerinde, parke taşı olarak kaldırımlarda, mutfak tezgâhlarında, seramik, plastik, cam, kâğıt, yol yapımı, beton karışımında vb. alanlarda mermer kullanılmaktadır (Millî Eğitim Bakanlığı, 2008; Beycioğlu, Basyiğit ve Subası, 2008; Bilgin, 2010; Demir, 2009).

1.3.3. Mermerlerin sınıflandırılması

Doğal taşlar ve mermerler, oluşum süreçleri, içerdikleri mineraller ve diğer özellikler gibi kriterlere göre değişik şekillerde sınıflandırılabilirler (Kulaksız, 2007).

1.3.3.1. Mermerin kristal tane boyutuna göre sınıflandırılması

Doğal taşlar, tane boyutlarına göre üç grupta sınıflandırılmaktadır. İnce taneli doğal taşlar, tane boyutu 1 mm'den küçük olan mermerleri ifade eder. Orta taneli doğal taşlar, tane boyutu 1 mm ile 5 mm arasında bulunan mermerlerdir. İri taneli doğal taşlar ise tane boyutu 5 mm'den büyük olan mermerleri kapsar (Köktürk, 2002).

1.3.3.2. Mermerlerin yapısına göre sınıflandırılması

Saf ve katkısız mermerler (Masif); doğal mermerin blok halinde kesilmesiyle elde edilen bir malzemedir. Masif mermerler, genellikle büyük boyutlarda üretilir ve ağırlıkları birkaç tona ulaşabilir. Masif mermerler, doğal mermerin tüm özelliklerini taşır ve dayanıklı, uzun ömürlü bir malzemedir.

Laminal mermer; doğal mermerin ince levhalara bölünmesiyle elde edilen bir malzemedir. Bu levhalar, daha sonra bir destek malzemesine yapıştırılarak laminat mermer paneller oluşturulur. Laminar mermer paneller, doğal mermerin görünümünü ve özelliklerini sunar ancak daha hafif ve daha az maliyetlidir.

Breşik mermer; genellikle kırık ve parçalanmış bir görünüme sahiptir. Bu, breşik mermerlerin oluşum sürecinde, kayaların kırılma ve parçalanma sürecine maruz kalmasından kaynaklanır. Breşik mermerler, genellikle beyaz, gri veya siyah renktedir. Sert ve dayanıklı kayalardır.

Şisti mermer; genellikle yapraklanma özelliğine sahiptir. Bu, şistlere kolayca işlenebilme ve şekillendirilebilme özelliği verir. Şistler, içerdikleri minerallere göre çeşitli türlere ayrılır (Köktürk, 2002).

1.3.3.3. Mermerlerin bileşim oranlarına göre sınıflandırılması

Mermer, yaklaşık %95 oranında kalsiyum karbonat (CaCO_3) içeren, masif yapılı ve taneli dokulu bir kayadır. Kalsit, kimyasal formülü CaCO_3 olan kristalleşmiş kalsiyum karbonattır ve şisti yapıda, yönlü bir dokuya sahiptir. Spolen, yaklaşık %80 kalsit içeren, masif mermer bloklardan kesilerek silindirik veya kare şeklinde elde edilen bir mermer türüdür. Diopsit, gröna, flonapit ve tremotil ise mermerlerde bulunabilen mineraller arasında yer alır. Mermer-skarn ise %80–90 oranında kalsit içermekle birlikte epidot, diopsit, gröna, olivin ve plajioklas gibi çeşitli mineralleri de bünyesinde barındırabilmektedir (Uyanık, 2001).

1.3.3.4. Mermerlerin oluşturduğu minerallere göre sınıflandırılması

Magmatik mermerler, gerçek mermerlerden farklı olarak karbonatlı minerallerden oluşmaz. Bu nedenle, gerçek mermerler kadar sert değildirler; ancak estetik görünimleri

sayesinde mermer gibi işlenerek kullanılabilirler ve plutonik, volkanik ya da damar kökenli olabilirler. Metamorfik (başkalaşım) mermerler ise tortul kayaçların başkalaşmasıyla meydana gelir. Tortul kayaçlar, deniz ve göl gibi su ortamlarında yaşayan organizmaların kabuk ve iskeletlerinin birikmesiyle oluşur. Sedimanter (tortul) mermerler ise yeryüzündeki kayaçların dış kuvvetlerle parçalanıp aşınması, taşınarak tortullaşması ve genellikle deniz, göl ya da akarsu tabanlarında birikmesi sonucu meydana gelir (Sentürk vd., 1996; Erkek ve Özdemir, 2011; Öztürk, 2006).

1.3.3.5. Kristal/Matriks konumuna göre sınıflandırılması

Homojen ve izotrop malzemeler, her noktada aynı özellikleri gösteren ve tüm yönlerde fiziksel davranışları birbirine eş olan yapılardır. Buna karşılık, homojen olup anizotrop özellik sergileyen malzemeler, her noktada aynı bileşime sahip olmakla birlikte, farklı yönlerde değişen özellikler gösterebilirler. Diğer taraftan, homojen olmayan fakat izotrop yapılar, bileşim bakımından farklılıklar içerseler de yön bağımsız olarak aynı davranışı sergilerler. Son olarak, hem homojen olmayan hem de anizotrop olan malzemeler, gerek bileşimsel gerekse yönsel farklılıkları nedeniyle oldukça karmaşık ve değişken özellikler ortaya koyarlar (Saraç & Yiğit, 2010).

1.3.4. Mermerlerin Ternomekanik özellikleri

1.3.4.1. Fiziksel özellikleri

Mermerlerin fiziksel özelliklerinin tespiti için deneyler TS 699 standartlarına uygun olarak yapılmaktadır.

Sertlik; Kayaçların sertliği, onların işlenmesi ve kullanımı açısından önemli bir özelliktir. Sertlik, bir mineralin dıştan gelen bir mekanik etkiye karşı gösterdiği dirençtir. Bu nedenle, kayaçların sertliği, blok üretiminden, mamul ürün haline getirilinceye kadar uygulanan yöntem ve malzemelerin seçimini etkiler. Mermer, bir veya birkaç mineralden oluşan bir kayadır. Bu kayacın sertliği, içinde bulunan minerallerin sertliğine bağlıdır. Mineral bileşimi, tane boyutu, dokusu kayacın sertliğini belirleyen özelliklerdir.

Birim Hacim Ağırlığı; Kayaçların türlerine göre değişiklik gösteren birim hacim ağırlığı, kayacın 1 cm³ ünün gıcinsinden ifadesidir. Kayaçların birim hacim ağırlığı,

kayacın toplam hacmindeki minerallerin ağırlığına eşittir. Gözenek ve boşluklar, kayacın toplam hacminde yer alsa da minerallerin ağırlığına dahil edilmezler. Kayaçların birim hacim ağırlığı, dokusal ve mineralojik bileşimine bağlıdır. Dokusal özellikler, kayacın tane boyutu, tane şekli ve tane dağılımı gibi faktörleri içerir. Mineralojik bileşim, kayacın içerdiği minerallerin miktarı ve türü gibi faktörleri içerir. Mermerlerde bu oran min. 2.5 g/cm³ olarak kabul edilir.

Mermerlerin birim hacim ağırlıklarının tayini için, hazırlanan küp numuneler, önce yıkanıp etüve yerleştirilerek 105° C' de kurutulur ve ayrı ayrı 0.01 g hassasiyetindeki tartılan numuneler, bir kaba konularak numunelerin 1/4'ü su içinde kalacak şekilde su ilavesi yapılır. İki saat ara ile numunelerin 1/ 4'ünü kaplayacak oranda su ilave edilir. Bu numuneler, tamamen üzerlerini örtecek miktarda su ilave yapıldıktan sonra iki gün su içerisinde bekletilirler Doygun hale gelen numuneler terazi ile tartılarak, 0.01g hassasiyetinde ölçüm yapılır. Daha sonra deney numunesi üzerindeki su damlaları ıslak bir bezle alınır ve beklemeksizin havada 0.01 g hassasiyetinde tartılır.

Bulunan sonuçlar, Formül 1.13'teki eşitlikte yerine konularak her bir numune için ayrı ayrı birim hacim ağırlığı belirlenir.

$$D_h = \frac{G_k}{G_{dh} - G_{ds}} \quad (1.13)$$

D_h : Mermerin birim hacim ağırlığı, g/cm³

G_k : Kurutulmuş deney numunesi ağırlığı, g

G_{dh} : Doygun deney numunesinin havadaki ağırlığı, g

G_{ds} : Doygun deney numunesinin su içindeki ağırlığı, g

Özgül Ağırlığı; Bir maddenin birim hacminin ağırlığıdır. Yoğunluğu ile yerçekimi ivmesinin çarpımına eşittir. g ile gösterilir. Birimi N/m³tür. Mermer parçasının özgül ağırlığı ise 2,7'dir. Bu, mermer parçasının ağırlığının, aynı hacimli suyun ağırlığının 2,7 katı olduğu anlamına gelir.

Özgül ağırlık tayini için, mermer sahasının değişik yerlerinden alınan temsili 2 kg'lık numuneler 0.2 mm açıklığı olan eleklerden geçecek şekilde öğütülür ve sabit ağırlığa gelene kadar 105°C sıcaklıkta etüve kurutularak, oda sıcaklığına kadar desikatör içerisinde soğutulur. Piknometre ile 0.01 g hassasiyetinde tartılıp ağırlığı G_p olarak

kaydedilir. Piknometre oda sıcaklığında su ile doldurularak kapağı kapatılır ve üzerindeki su zerrecikleri kurutma kâğıdı ile kurutularak kapaktaki kılcal borudaki su seviyesi tespit edilerek 0.1 g hassasiyetle tartılarak ağırlığı G_p olarak kaydedilir. Kurutulup soğutulmuş olan öğütülmüş numuneden 250 g kadar alınarak piknometreye konur ve 0.01 g hassasiyetle tartılarak G_{pn} olarak kayıt edilir. İçinde örnek bulunan piknometreye örnek seviyesini geçecek şekilde, hacminin 1/4'üne kadar su doldurulur ve 10-15 dakika kaynatılıp, su banyosunda oda sıcaklığına soğutularak su ilavesi ile kapak kapatılır. Piknometre kurularak 0.01 g hassasiyetinde tartılır ve bu değer de G_{pns} olarak kaydedilir.

$$D_o = \frac{G_{pn} - G_p}{(G_{pn} - G_p) - (G_{pns} - G_{ps})} \quad (1.14)$$

D_o : Özgül ağırlık, g /cm³

G_p : Piknometre ağırlığı, g

G_{pn} : (Piknometre + Deney numunesi ağırlığı), g

G_{ps} : Su ile dolu piknometre ağırlığı, g

G_{pns} : (Piknometre + Deney numunesi + Su), g

Doluluk Oranı; Doluluk oranı, 105 °C’de sabit kütleye kadar kurutulmuş kayacın boşluklar hariç hacminin (dolu hacim), boşluklar dahil toplam hacmine (bütün hacim) oranı olarak tanımlanır. Hesaplama, Formül 1.15’te gösterildiği şekilde yapılır. Doluluk oranının belirlenebilmesi için öncelikle kayacın birim hacim ağırlığı ve özgül ağırlığının hesaplanması gerekir.

$$k = \frac{D_h}{D_o} \times 100 \quad (1.15)$$

k: Doluluk oranı

D_h : Birim hacim ağırlığı

D_o : Özgül ağırlık

Ağırlıkça ve Hacimce Su Emme Oranı; Kayaçları karakterize etmekte kullanılan bu özellik, basınç altında olmaksızın kayacın ne oranda su alabildiğini gösterir. Bir kap içerisine konan su miktarı ölçülür, daha sonra kabın içine konan kayaç 24 saat bekletilip

çıkartıldığında, kapta eksilen su miktarı, kabın içine konmuş olan kayacın, gözenekleri tarafından emilen su miktarı olarak bulunur.

$$S_k = \frac{G_{dh}-G_k}{G_k} \times 100 \quad (1.16)$$

S_k : Mermerin ağırlıkça su emme oranı, (%)

S_h : Mermerin hacimce su emme oranı, (%)

G_{dh} : Doygun deney numunesinin havadaki ağırlığı, g

G_{ds} : Doygun deney numunesinin su içindeki ağırlığı, g

$$S_h = \frac{G_{dh}-G_k}{G_{dh}-G_{ds}} \times 100 \quad (1.17)$$

Porozite; Kayaçların gözenekliliğini tanımlayan porozite, kayacın boşluk hacminin toplam hacme oranına eşittir. Bu oran, yüzde olarak ifade edilir. Gözeneklilik, kayaların önemli bir özelliğidir. Gözeneklilik, kayaların geçirimliliğini, su tutma kapasitesini ve dayanıklılığını etkiler. Kayaçların gözenekliliği, çeşitli faktörlere bağlı olarak değişebilir. Bu faktörler; kayaç oluşum süreci, kayaçtaki minerallerin türü ve boyutu ile kayacın deformasyon geçmiştir (Kun, 2000).

Mermerin porozite Formül 1.18’de yer aldığı gibi hesaplanır;

$$P = (1 - k) \times 100 \quad (1.18)$$

P: Mermerin porozitesi, (%)

1.3.4.2. Kimyasal özellikleri

Kimyasal Bileşimi; Kayaçların kimyasal bileşimi, kayacın içindeki elementlerin oksit formlarının yüzdesel oranına eşittir. Kimyasal bileşim, kayaların fiziksel ve kimyasal özelliklerini önemli ölçüde etkiler. Kayaçların kimyasal bileşimi; Kimyasal analiz, X-ışını spektroskopisi ve İnfrared spektroskopisi yöntemleri kullanılarak belirlenir.

Kimyasal bileşim, kayaçların fiziksel özellikleri üzerinde önemli etkiler oluşturmaktadır. Silika oranının artması kayaçların sertliğini ve dayanıklılığını artırırken, MgO oranının yükselmesi kayaçların daha kırılgan hale gelmesine neden olmaktadır. Ayrıca, Fe_2O_3 oranındaki artış, kayaçların renginin koyulaşmasına yol açmaktadır. Bu nedenle, kayaçların fiziksel özellikleri doğrudan kimyasal bileşimleriyle ilişkilidir.

Kimyasal analizlerde kayacın içindeki bileşenlerin yüzde oranları tespit edilir. Bu oranların toplamının %100'e yaklaşması analizin doğruluğunu gösterir. Karbonatlı kayaçlarda (kireçtaşı, gerçek mermer, traverten, oniks vb.) bulunan CaO miktarı, 1/0.56 katsayısı ile çarpılarak CaCO_3 'e, MgO miktarı ise 1/0.48 katsayısı ile çarpılarak MgCO_3 'e dönüştürülebilir. Temel oksitlerin dışında iz element analizleri de bazen kayaçlarda istenen analizlerdendir. Özellikle renkli mermerlere renk veren elementlerin bulunması için bu analizler yapılmaktadır.

Çözülme Kabiliyeti; Mermerlerin çözülmesi, özellikle inşaatların dış kısımlarında kullanılanları için önemli bir özelliktir. Mermer, karbonatlı bir kayadır ve içindeki kalsiyum karbonat (CaCO_3) maddesi, havadaki karbondioksit (CO_2) ile birleşerek karbonik asit (HCO_3^-) oluşturur. Bu asit, mermerin çözülmesine neden olur. Çünkü bütün taşlar, hava ile temas ettikleri zaman yavaş da olsa kimyasal ve fiziksel etkiler altında kalarak değişime uğrarlar. Bütün taşlar, havadaki nem, karbondioksit ve diğer gazlar ile etkileşime girer. Bu etkileşimler, taşın kimyasal bileşimini, fiziksel özelliklerini ve yapısını değiştirebilir. Havadaki CO_2 ile yağmur sularının birleşmesi sonucu oluşan karbonik asit (HCO_3) özellikle mermere etki eder. Karbondioksit, havadaki miktarı %0,04 olan bir gazdır. Yağmur suyu, havadaki karbondioksiti çözerek karbonik asit oluşturur. Karbonik asit, suyun pH'ını düşürür ve bu da mermerin çözülmesini hızlandırır. Bu nedenle karbonatlı kayaçların kullanıldığı eski yapılarda, zaman içinde bozulmalar, renk değişimleri, ayrışmadan kaynaklanan ufalanma ve boşluklu yapı oluşumları sık görülür. Karbonik asit, mermerin yüzeyini aşındırır ve rengini değiştirir. Ayrıca, mermerin içinde boşluklar ve çatlaklar oluşturur. Bu boşluklar ve çatlaklar, mermerin daha fazla çözülmesine ve zarar görmesine neden olur. Çözülmenin şiddeti her mermer de aynı değildir. Mermerin çözülmesi, mermerin kimyasal bileşimine, fiziksel özelliklerine, bünyesine ve su absorbe etme kabiliyetine bağlıdır.

Asite Dayanıklılık; Karbonatlı kayaçlar, çok sık rastlanan ve seyretilik olan asitlerden kolaylıkla etkilenir. Karbonatlı mermerlerden olan kireç taşları veya gerçek mermerler, limon asidi (sitrik asit), sirke asidi (asetik asit), tuz ruhu (HCl) ve karbonik asit (H_2CO_3) gibi günlük hayatta çok kullanılan asitlerden kolaylıkla etkilenirler. Fakat

SiO₂ (silisyum dioksit), kayaçlarda yaygın olarak bulunan bir mineraldir. SiO₂ oranı fazla olan sert mermerler, asitlere karşı daha dayanıklıdır.

Pas Tehlikesi Tayini; Mermerlerin hava ve su ile teması sonucunda mineral bozuşmaları meydana gelebilir. Bu bozulmalar, mermerin içinde bulunan pirit, markazit, pirotin, magnetit, biyotit ve bazı demir oksitli ve karbonatlı minerallerin, ortamdan etkilenmesi sonucu oluşur. Bu mineraller, paslı renk bozuklukları oluşturabilir ve ayrıca havadaki nem etkisiyle ortaya çıkabilecek sülfürik asit, kayaçtaki diğer mineralleri etkileyebilir. Markazitin bulunduğu kayaçlarda paslanma riski daha yüksektir. Markazit, havadaki oksijen ile reaksiyona girerek demir oksit oluşturur. Bu demir oksit, mermerin yüzeyinde paslı renk bozuklukları oluşturur. Ayrıca markazit, biyotit, feldspat veya kolay ayrışabilir mineraller ile örtülmüş ise, bu mineraller de paslanmaya neden olabilir. Bu nedenle, paslanma riskinin yüksek olduğu kayaçlarda petrografik tayinler dikkatli yapılmalıdır. Petrografik tayinler, kayacın minerallerini ve yapısını belirlemeye yardımcı olur. Paslanma riskinin yüksek olduğu kayaçlarda, petrografik tayinler ile paslanma potansiyeli belirlenebilir. Deney için en az beş çift el örneği hazırlanır. Bu örnekler aynı blok kayaçtan çiftler çiftler alınır. Bir örnek deney için kullanılırken, diğeri kıyaslama için bekletilir. Deneyde, örnekler 50 °C' lik bir suya daldırılır ve 7 gün boyunca bekletilir. Bu süre sonunda, örnekler incelenir. Eğer örnekte paslanma belirtileri varsa, bu durum, mermerin hava ve su ile teması sonucunda mineral bozuşmalarına uğradığını gösterir (Kun, 2000).

1.3.4.2.1. Mekanik özellikler

Mermerlerin mekanik özelliklerini belirlemek amacıyla yapılan deneyler arasında tek eksenli basınç dayanımı, eğilme dayanımı, don sonrası basınç dayanımı ve aşınma dayanımı yer almaktadır. Tek eksenli basınç dayanımı, mermerin tek eksenle uygulanan gerilmelere karşı gösterdiği direnç olup, TS 699 standardına uygun olarak tabakalaşma doğrultusuna dik ve paralel yönlerde en az beşer numune ile gerçekleştirilir. Numuneler belirli koşullarda kurutulup kondisyonlandıktan sonra pres makinesinde kırılana kadar yüklenir; bulunan sonuçlar Formül 1.19'daki eşitlikte yerine konularak her bir numune için ayrı ayrı birim hacim ağırlığı belirlenir.

$$\sigma_c = \frac{F_c}{A} \quad (1.19)$$

Burada;

σ_c : Tek eksenli basınç dayanımı, kg/cm²

F_c : Numune yenilme yük değeri, kg

A : Numune yüzey alanı, cm²

Eğilme dayanımı, plaka mermerlerin yapısal dayanıklılığını belirler ve belirli boyutlardaki numunelerle yapılır; destekler arası mesafe dikkate alınarak yük ortadan uygulanır.

$$\sigma_{E\check{G}} = \frac{3PL}{2bh^2} \quad (1.20)$$

$\sigma_{E\check{G}}$: Mermerin eğilme dayanımı, kg/cm²

P : Kırılmaya neden olan en büyük yük, kg

L : Deney numunesinin mesnetler arası mesafesi, cm

b : Deney numunesinin genişliği, cm

h : Deney numunesi kalınlığı, cm

Don sonrası basınç dayanımı belirlenirken numuneler suya doymun hale getirilir ve -20 °C’de dondurulup 20 °C’de çözülerek 25 döngü uygulanır. Donma, çözülme işlemleri sonunda deney örnekleri 110 °C ± 5° C sıcaklıkta etüvde sabit tartıma gelinceye kadar kurutulup 0.1 g hassasiyetle tartılır. Don tesirine dayanım deneylerinde koparak ayrılan kısımların neden olduğu kütle azalması (don kaybı) şu eşitlik ile hesaplanır.

$$D_k = \frac{G_o - G_k}{G_o} \times 100 \quad (1.21)$$

Burada;

D_k : Don kaybı, %

G_o : Numunenin deney öncesi kütlesi, gr

G_k : Numunenin deney sonrası kütlesi, gr

Don testi sonucunda basınç dayanımında meydana gelen bu azalma ise aşağıdaki formül 10 ile hesaplanmaktadır.

$$\Delta_{\sigma cd} = \frac{\sigma_c - \sigma_{cd}}{\sigma_c} \quad (1.22)$$

Burada;

$\Delta_{\sigma cd}$: Don tesiri ile basınç değişiminde meydana gelen azalma, %

σ_c : Don deneyi uygulanmış mermerin tek eksenli basınç dayanımı, kg/cm²

σ_{cd} : Don sonrası deneyi, mermerin tek eksenli basınç dayanımı, kg/cm²

Aşınma dayanımı, mermerin yüzeyine uygulanan aşındırıcı etkilere karşı gösterdiği dirençtir ve mineral bileşimi, sertlik, doku gibi faktörlere bağlıdır. Sert ve ince taneli mermerler, daha yüksek aşınma dayanımına sahiptir. Karbonatlı mermerler ise magmatik mermerlere kıyasla daha düşük dayanım gösterir. Aşınma dayanımı, mermerin uzun ömürlü kullanımı açısından kritik öneme sahiptir. TS 699 standardına göre, 71 mm boyutlarında hazırlanan küp numuneler 105 °C’de kurutularak tartılır ve ardından standart test cihazında yüzey aşındırma deneyine tabi tutulur.

Deneydeki ağırlık kaybından hareketle (Δ_m), hacim azalması(Δ_v) sırasıyla aşağıdaki Formül 1.23 ve 1.24 ile hesaplanır (Kun, 2000).

$$\Delta_m = M_i - M_s \quad (1.23)$$

$$\Delta_m = \frac{\Delta_v}{dh} \quad (1.24)$$

Δ_m : Örneğin 50 cm² yüzeyinde meydana gelen aşınma oranı, gr/cm³

M_i : Örneğin aşınma öncesi ağırlığı, gr

M_s : Örneğin aşınma sonrası ağırlığı, gr

dh : Örneğin birim hacim ağırlığı, gr/ cm³

Δ_v : Örneğin 50 cm² lik yüzeyindeki hacim kaybı, cm³ / 50 cm²

1.3.5. Mermer atıklarının oluşumu

Genel olarak, mermer atıklarının oluşumuna iki faktör neden olur: mermer taşlarının bulunduğu yer ve boyutları. Mermer taşları, ocaklardan çıkarıldığında farklı

şekillerde ve boyutlarda olabilir. Bu taşları kullanım amacına göre istenilen şekilde kesilir ve işlenir. Mermerin kesim aşamaları, Şekil 1.9'da gösterilmektedir (Başpınar vd., 2008).



Şekil 1.9. Mermerin kesim aşaması

Mermer Atıklarının Parça (Moloz) Halindeki Oluşumu; Mermer, ocaklardan çıkarılır ve bloklar haline getirilir. Bu bloklar, mermer sektöründe kesilir ve işlenerek kullanıma hazır hale gelir. Ancak, bu işlem sırasında bazı atık parçalar oluşur. Bu atık parçalar, ticari anlamda ekonomiye katkı sağlamadığı için çevreye bırakılır (TÜMMER, 2013).



Şekil 1.10. Mermer atığının moloz halde oluşumu

Mermer Atıklarının Toz Halindeki Oluşumu; Mermer tozu, mermer taşlarının kesilmesi sırasında veya mermer bloklarının taşınması esnasında ezilerek oluşmakta olup, oluşmasına rağmen mermer sektörü tarafından değerlendirilmeyip çevrede açık alanlara bırakılmaktadır (Kun, 2013; Bilgin ve Koç,2013). Mermer atıklarının moloz hâlde oluşumu Şekil 1.10'da gösterilmektedir.

Mermer Atığının Çamur Halindeki Oluşumu: Mermer atıkları, kesici makinelerin uçlarının aşırı ısınmasını önlemek ve mermer tozunun etrafa yayılmasını engellemek amacıyla, kesim sırasında soğutucu su kullanılarak işlenir. Bu işlem sonucunda, mermer tozu ile suyun karışımı olan bir çamur oluşur; bu çamura mermer çamuru denir ve Şekil 1.11'de gösterilmektedir. Oluşan çamur, genellikle arazideki kuyularda toplanır ve atık mermer çamuru olarak adlandırılır. (Başpınar vd., 2008). Türkiye'de mermer sektörü, yıllık 1.750.000 ton mermer işleme kapasitesine sahiptir (İMMİB, 2023). Türkiye'de yıllık olarak işlenen mermerin yaklaşık %30'u, üretim sırasında atık olarak çevrede bulunan açık alanlarda bırakılmaktadır. Bu atık mermer, çevre kirliliğine neden olarak doğada olumsuz etkiler yaratmaktadır (DPT, 2001b).



Şekil 1.11. Mermer çamuru

1.4. Seramik

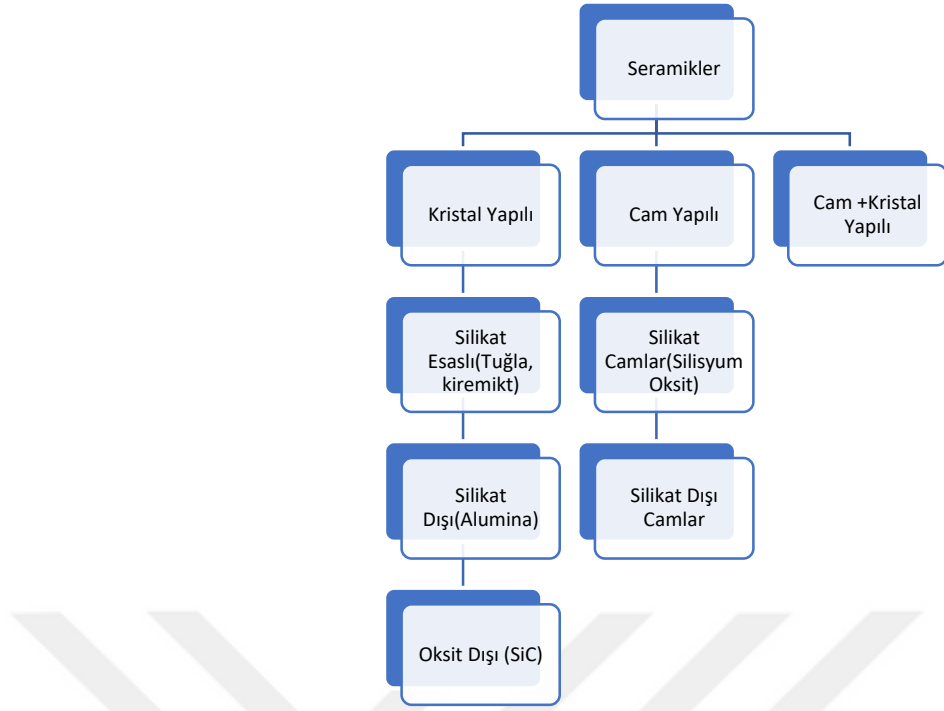
1.4.1. Seramiğin tanımı

Seramikler, kil gibi inorganik ve metalik olmayan malzemelerin yüksek sıcaklıkta şekillendirilip pişirilmesiyle elde edilen; sert, kırılğan, ısıya ve korozyona karşı dayanıklı malzemelerdir (Loh, 2011).

Seramik, en basit haliyle çömlekçilik sanatı olarak tanımlanabilir. Ana hammaddesi su geçirmez özellik taşıyan killi toprak, balçık veya çamurdur. Bu her yerde bulunabilen ve kolayca şekillendirilebilen malzeme, insanlık tarihinin ilk dönemlerinde yaygın olarak kullanılan en önemli şekillendirilebilir malzemelerden biridir. Seramik üretimi, yüzyıllar boyunca medeniyetlerin gelişimine katkı sağlamış; içinde bulunduğu toplumun ekonomik, siyasi ve kültürel yapısını yansıtan, insanlık tarihinin en eski ve kalıcı üretim faaliyetlerinden biri olarak kabul edilmektedir (Erman, 2012).

Geleneksel seramikler üç gruba ayrılır: earthenware, stoneware ve porselen. En eski tür olan earthenware, düşük sıcaklıklarda (1000–1150 °C) pişirilir; gözenekli yapısı nedeniyle genellikle sırlanarak tekrar pişirilir ve çanak çömlek, sofrta takımı gibi ürünlerde kullanılır. Stoneware ise yaklaşık 1200 °C’de pişirilerek daha dayanıklı ve gözeneksiz hale getirilir; sırlama işlemi çoğunlukla dekoratif amaçlıdır. Mutfak eşyalarında yaygındır. Porselen, kaolin kili ile cam, granit ve feldspat karışımından üretilir; yüksek sıcaklıklarda (1200–1450 °C) pişirilerek sert, beyaz ve yarı saydam bir yapı kazanır (Science Learning Hub, 2010).

Seramikler yapısal olarak kristal, amorf (cam yapılı) ve camsı kristal olmak üzere üçe ayrılırlar (Şekil 1.12). Kristal yapılı seramikler; silikat esaslı oksitler, silikat dışı oksitler ve oksit içermeyen seramiklerden oluşur ve geleneksel seramiklerin çoğu bu gruba dahildir. Cam yapılı seramikler (amorf yapılı) yüksek mekanik dayanım ve şekillendirilebilirlik özellikleriyle gelişmiş seramik tipleri arasında yer alırlar (Kalinçimen vd., 2015).



Şekil 1.12. Seramiklerin gruplandırılması (Kalinçimen vd., 2015).

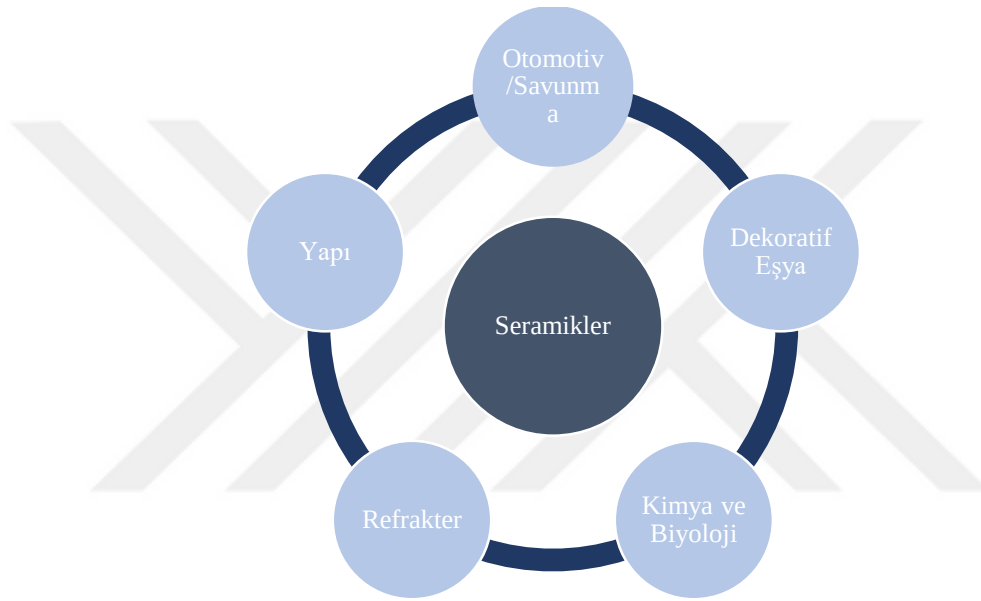
1.4.2. Seramiklerin özellikleri

Seramik malzemelerin fiziksel ve kimyasal özellikleri, onları oluşturan atomların türü, bu atomlar arasındaki bağların karakteri ve atomların kristal yapı içerisindeki düzenlenme biçimiyle doğrudan ilişkilidir. Seramiklerde temel olarak iyonik ve kovalent bağlar bulunur; ancak özellikle oksit seramiklerde iyonik bağ yapısı baskındır. Bu tür güçlü ve yönlü bağlar, seramiklerin sertlik, yüksek erime noktası ve kimyasal direnç gibi olumlu özellikler göstermesini sağlar. Ancak aynı bağ yapısı, atomların yer değiştirmesini engelleyerek plastik deformasyon kabiliyetini sınırlar ve malzemelerin gevrek davranmasına, yani düşük tokluk göstermesine neden olur.

Ayrıca seramikler üretim süreçlerinden kaynaklı olarak genellikle gözenekli yapıya sahiptir. Bu gözenekler ve diğer mikroyapısal kusurlar, çatlak oluşumunu ve ilerlemesini kolaylaştırarak çekme mukavemeti ve darbe dayanımını olumsuz yönde etkiler. Bununla birlikte seramik malzemeler; yüksek sertlik, düşük yoğunluk, düşük elektriksel ve ısı iletkenlik, düşük termal genleşme katsayısı ve yüksek oksidasyon-korozyon direnci gibi çok sayıda üstün fiziksel ve kimyasal özelliğe sahiptir. Bu özellikler, onları yüksek sıcaklık uygulamaları, kimyasal olarak agresif ortamlar ve yalıtıcılık gerektiren alanlar için ideal hâle getirir (American Ceramic Society, 2025).

1.4.3. Seramiğin kullanım alanları

Seramik malzemeler günümüzde işlevsel, sanatsal ve dekoratif kullanımın yanı sıra; inşaat (tuğla, kiremit, karo, vitrifiye), sofr ve mutfak eşyaları, sağılık (protez, ilaç), temizlik ürünleri, elektronik ve teknolojik bileşenler, zırh sistemleri, refrakterler ve uzay teknolojileri gibi pek çok alanda yaygın olarak kullanılmaktadır (Yıldırım,2021). Seramiklerin bu kullanım alanları Şekil 1.13'te gösterilmektedir.



Şekil 1.13. Seramiklerin kullanım alanları

1.4.3.1. Dinsel/inançsal/törens el seramikler

Seramik, tarih öncesi ve ilk çağ kültürlerinde özellikle dini bağlamda önemli bir kültürel nesne olarak öne çıkmıştır. Kolay şekillendirilebilmesi, düşük maliyetli ve hızlı üretilebilir olması sayesinde; tapınma, ayin, adak sunma ve cenaze törenleri gibi dini ritüellerin gereksinimlerini büyük ölçüde karşılamıştır (Çakı, 1999).

1.4.3.2.Sanatsal/dekoratif seramikler

Sanatsal seramikler, estetik kaygı ve tasarım amaçlı, iki ya da üç boyutlu seramik, porselen, cam, çini gibi malzemelerden üretilen eserleri kapsar. Günümüzde tüm şekillendirme, dekorasyon ve pişirme teknikleri ile çeşitli çamur, astar, cam malzemeleri ve sırlar yaygın olarak kullanılmakta, bu da sanatçıların ifade özgürlüğünü artırmaktadır. Sanatsal seramikler, iç ve dış mekânlarda, kamusal ve özel alanlarda kullanılmak üzere figüratif veya soyut formlarda tasarlanmakta ve pek çok disiplinin ifade aracı olmaktadır (Yıldırım, 2021).

1.4.3.3. Mimari/yapı/inşaat seramikleri

Binaların inşasında temel yapı malzemeleri arasında yer alan beton, çimento, tuğla ve kiremit gibi geleneksel malzemelerin yanı sıra, mimari ve yapısal seramikler de önemli bir rol oynamaktadır. Bu kapsamda, pencere camları, iç mekânlarda kullanılan dekoratif ve fonksiyonel cam paneller ile hem iç hem de dış mekânlarda yaygın olarak tercih edilen duvar ve yer karoları, modern yapıların estetik ve dayanıklılık gereksinimlerini karşılayan seramik ürünler olarak öne çıkar. Mimari seramikler, yapıların işlevselliğini artırmanın yanı sıra, estetik değer katmak ve uzun ömürlü yüzeyler oluşturmak amacıyla geliştirilmekte ve kullanılmaktadır (Yıldırım, 2021).

1.4.3.4. Seramik tıbbi gereçleri

Seramik sağlık ürünleri, diş ve kemik protezleri, tıbbi cihazlar ile kil minerallerinden elde edilen ilaçlar ve seramik bazlı temizlik ürünlerini kapsamaktadır. Bu ürünler çoğunlukla porselen ve cam malzemelerden üretilir. Seramikler, biyouyumlulukları, kemiğe yüksek bağlanma yetenekleri ve düşük komplikasyon riskleri nedeniyle ortopedik ve dental uygulamalarda tercih edilmektedir. Vücutta sert dokuların restorasyonu ve rekonstrüksiyonu amacıyla, kemik, diş kökü, eklem ve diğer iskelet yapılarında yaygın olarak kullanılmaktadırlar. Ayrıca, el, kol, ayak gibi harici protezlerde ve çeşitli tıbbi ekipmanlarda seramik malzemeler önemli bir rol oynamaktadır (Akın ve Göller, 2012).

1.4.3.5. Seramik teknolojisi ve mühendislik ürünleri

Seramik malzemeler, elektrik-elektronik ekipmanlardan taşıt teknolojilerine kadar geniş bir mühendislik uygulama alanına sahiptir. Elektrik direkleri, trafolar ve pano bileşenlerinde seramik parçalar yaygın olarak kullanılmaktadır. Ayrıca bilgisayar, akıllı telefon, beyaz eşya ve optik cihazlarda cam ve seramik bileşenler kritik işlevler üstlenir. Otomotiv sektöründe ise fren diskleri, motor parçaları ve cam yüzeyler seramik malzemelerden imal edilmektedir. Nano teknolojilerle geliştirilen seramik kaplamalar, metal yüzeylere dayanıklılık ve aşınma direnci kazandırmaktadır. Sivil ve askeri kara, deniz ve hava taşıtlarında ise zırh ve kurşun geçirmez camlar gibi ileri teknoloji seramik ürünler kullanılmaktadır (Yıldırım, 2021).

Askeri ve kolluk kuvvetlerine yönelik koruyucu yelekler, zırhlı araçlar ile helikopter pilot kabinleri, seramik malzemeler sayesinde kurşungeçirmez özellik kazanmıştır. Günümüzde seramik bazlı teknolojilerle kumaş üretimi de mümkün hale gelmiştir (Okumuş, 2008).

Ultra yüksek sıcaklık seramikleri, yüksek sertlik ve aşınma direncinin yanı sıra aşırı sıcaklıklara dayanıklılıkları nedeniyle özellikle uzay ve havacılık uygulamalarında önemli bir malzeme grubudur. 4215°C erime noktasına sahip Tantalyum Hafniyum Karbür seramikleri, yüksek sıcaklık stabilitesi ve üstün mekanik performansları ile refrakter seramikler arasında öne çıkmaktadır (Altuncu ve Esen, 2014).

1.4.4. Seramik atıkları

Seramik atıklarının bileşimi, üretim süreci ve kullanılan seramik türüne göre farklılık gösterir. Örneğin, çanak-çömlek, taş eşya, porselen veya vitrifiye karo gibi çeşitler, kendine özgü kimyasal ve mineral içeriklere sahiptir. Bu atıklar genellikle kil mineralleri (kaolinit, montmorillonit, illit), silika bazlı bileşenler (kuvars, kristobalit) ve feldispat türleri (ortoklaz, albit, plajiyoklaz) içerir. Ayrıca, metal oksitler olarak titanyum dioksit (TiO_2) ve demir oksit (Fe_2O_3) gibi maddeler bulunabilir. Fe_2O_3 ve kobalt oksit (CoO) gibi bileşenler ise, seramiklerin renk, doku ve diğer özelliklerini sağlamak amacıyla kullanılan pigment ve katkı maddelerinin kalıntılarıdır (Bhavsar & Panchal, 2022; García-Ten ve vd., 2016; Lasseuguette ve vd., 2019; El-Dieb ve vd., 2018).

Bu bileşenlerin bir araya gelmesiyle oluşan seramik malzemeler, çeşitli şekillendirme yöntemleriyle form kazandıktan sonra sırlanarak ya da sırlanmadan, sertleşip dayanım kazanmasına kadar geçen pişirilme sürecinden geçer. Pişirme süreci, seramik formun belirli sıcaklıklarda kimyasal ve fiziksel dönüşümler geçirerek nihai

özelliklerine ulaşmasını sağlar. Özellikle tuğla, kiremit ve yer karosu gibi yapı malzemelerinde yüksek sıcaklıkta pişirme işlemi, ürünün kullanılabilir hale gelmesi için zorunludur. Bazı uygulamalarda ise, estetik görünüm veya yüzey özelliklerini iyileştirmek amacıyla ürün yalnızca tek pişirimle sınırlı kalmaz; üzerine sırlama işlemi uygulanarak ikinci kez fırınlama gerekebilir (Kalinçimen vd., 2015).

Sırlı seramik atıkları, seramik endüstrisinde üretim hataları sonucu ortaya çıkan ve tekrar kullanımı mümkün olmayan malzemelerdir. Bu tür atıklar, özellikleri gereği yapay puzolanlar sınıfında değerlendirilmektedir. Puzolanların yapısında kolloidal formda yoğun miktarda silis (SiO_2) ve alümin (Al_2O_3) yer almaktadır. Bu iki bileşen, malzemeye puzolanik özellik kazandıran temel unsurlar arasında yer alır. Alümin ve silis, puzolanın kimyasal reaktivitesini sağlayan bileşenler olup genellikle amorf, camsı ya da zeolitik yapıdadır (Jambor, 1963).

Tüketici taleplerini karşılamak amacıyla doğal kaynakların sınırsız şekilde kullanılması, küresel ölçekte en ciddi çevresel sorunlardan biri olan endüstriyel atık miktarının sürekli artmasına yol açmaktadır. Bu bağlamda, sürdürülebilir yapılaşmanın sağlanabilmesi için endüstriyel ve tarımsal kökenli atıkların azaltılması ve geri dönüşüm yoluyla değerlendirilmesi büyük önem taşımaktadır (Kathirvel et al., 2013).

Seramik sektörü, yüksek katma değeriyle Türkiye ekonomisine önemli katkı sağlayan köklü ve hızla gelişen sanayi alanlarından biridir. Seramik sağlık gereçleri, kaplama malzemeleri, sofa ve mutfak eşyaları ile refrakter ürünler gibi alt dallarıyla özellikle inşaat sektöründe öne çıkmaktadır. Sektör, ürün çeşitliliğini ve teknolojik gelişimini her geçen gün artırmaktadır (Sanayi Genel Müdürlüğü, 2023). Günlük seramik üretiminde, inşaat sektöründe duvar ve zemin kaplamalarında kullanılan seramikler, toplam üretimin yaklaşık %30'unu oluşturmaktadır (Subaşı vd., 2017). Öte yandan, küresel ölçekte seramik üretimi sırasında ortaya çıkan atıklar, tesislerin atık depolama sahalarında biriktirilmektedir. Bu durum, zamanla depolama alanlarının dolmasına ve yetersiz kalmasına yol açmaktadır. Aynı zamanda, inşaat sektörü beton, çimento ve agrega üretiminde doğal kaynaklara yoğun şekilde başvurarak ek çevresel baskılar yaratmaktadır (Penteado vd., 2016). Seramik atıkları, yalnızca beton, çimento ve agrega üretiminde değil, aynı zamanda harç ve sıva yapımında da değerlendirilebilmektedir (El-Dieb et al., 2018). Bu atıklar, uygun şekilde yönetilmediğinde çevresel zararlar yaratmakta ve ekosistemler için ciddi riskler doğurmaktadır (Pacheco-Torgal & Jalali, 2011). Bu nedenle, dünya genelinde hem toplumlar hem de bilim insanları, sürdürülebilirlik ve kalkınma stratejilerine odaklanmış; çevre koruma kapsamında

atıkların azaltılması, yeniden kullanımı ve geri dönüşümü gibi yaklaşımlar öncelik kazanmıştır (Bilal, 2019).

1.5. Taş Yünü (Mineral Yünü)

1.5.1. Taş yünü tanımı

Taşıyünü, bazalt, kireçtaşı, diyabaz ve dolomit gibi doğal minerallerin işlenmesiyle elde edilen bir malzemedir. Binalarda mantolama uygulamalarında en sık kullanılan malzemelerden biridir. Isı ve ses yalıtımı gereken alanlarda yaygın olarak tercih edilir. Taşıyünü, standartlara göre 'A' sınıfı, yani 'yanmaz' malzemeler grubunda yer almakta olup, çok yüksek sıcaklıklarda dahi yalıtım özelliğini koruyarak uygulandığı alanlarda etkin yangın güvenliği sağlamaktadır. Ayrıca, diğer izolasyon malzemelerinde olduğu gibi, kullanım amacı ve uygulama alanına bağlı olarak farklı boyut ve şekillerde üretilmektedir (Gören, 2022).

1.5.2. Taş yünü özellikleri

Taşıyünü, -50°C ile $+800^{\circ}\text{C}$ arasında güvenle kullanılabilen, uluslararası standartlara göre "A" sınıfı yani yanmaz malzeme kategorisinde yer alan üstün nitelikli bir yalıtım malzemesidir. $30\text{--}200\text{ kg/m}^3$ yoğunluk aralığında farklı üretim seçenekleri bulunan taşıyününün ısı iletkenlik değeri yaklaşık $0,040\text{ W/m}\cdot\text{K}$ olup yüksek yalıtım performansı sağlar. Yüksek sıcaklık ve ani sıcaklık değişimlerine karşı dayanıklı olan bu malzeme, boyutlarında herhangi bir genleşme veya büzülme göstermemekte, 1000°C 'nin üzerindeki erime noktası sayesinde yüksek sıcaklıklarda dahi formunu korumaktadır. Ayrıca haşere barındırmaz, küflenme veya çürüme gibi biyolojik bozulmalara karşı dirençlidir; yoğun ve sıkı yapısı sayesinde higroskopik özellik göstermez, kapiler etkiden etkilenmez. Su buharı difüzyon direncinin düşük olması ($\mu\approx 1$) sayesinde nefes alabilen bir yapıya sahip olan taşıyünü, kırılğan olmamasıyla taşıma ve montaj süreçlerini güvenli hale getirirken, esnek yapısıyla kolayca şekillendirilerek işçilik sürecinde pratik ve zahmetsiz bir kullanım sunar (Eren, 2019).

1.5.3. Taş yünü atığı

Taş yünü üretim süreci, cam veya bazalt elyafının yüksek sıcaklıklarda eritilmesi ve elde edilen eriyik malzemenin özel soğutma teknikleriyle lif haline dönüştürülmesini içermektedir. Bu üretim aşamasında çeşitli yan ürünler ve atık materyaller ortaya çıkmakta olup, bunlar genellikle üretim kalıntıları, kesim ve şekillendirme işlemlerinden kaynaklanan artıklar ile proses artıklarından oluşmaktadır. Atıkların etkin ve doğru yönetimi, çevresel etkilerin azaltılması ve sürdürülebilir üretim uygulamalarının sağlanması açısından kritik önem taşımaktadır. Bu bağlamda, taş yünü geri dönüşüm sistemi, atıkların toplanması, ayrıştırılması, geri kazanılması ve yeniden kullanılması süreçlerini kapsayarak malzeme döngüsünün kapatılmasını hedeflemekte ve doğal kaynakların korunmasına önemli katkılar sunmaktadır. Özellikle cam ve bazalt elyafı gibi sınırlı doğal kaynaklardan elde edilen hammaddelerin verimli kullanımı, kaynak tükenme riskini azaltırken, atık miktarının minimize edilmesi çöplüklerde biriken atık hacmini azaltmakta ve atık yönetiminde yaşanan sorunları hafifletmektedir. Ayrıca, geri dönüşüm süreci enerji verimliliği sağlaması ve karbon ayak izinin düşürülmesi açısından da çevresel faydalar sunmakta; geri kazanılan malzemelerin kullanımı yeni taş yünü üretimi için gereken enerji ihtiyacını azaltarak sera gazı emisyonlarının önemli ölçüde azalmasına katkıda bulunmaktadır.

Taş yünü geri dönüşüm süreci genel olarak aşağıdaki aşamalardan oluşmaktadır:

- Atıkların Toplanması ve Ayrıştırılması: Üretim sürecinden kaynaklanan taş yünü atıklarının sistematik olarak toplanması ve türlerine göre ayrıştırılması gerekmektedir. Bu aşama, geri dönüşümün etkinliği için temel teşkil etmektedir.

- Geri Kazanım ve Yeniden İşleme: Toplanan atıklar, uygun yöntemlerle temizlenerek yeniden işlenir. Bu işlemler, atıkların hammadde olarak tekrar kullanılabilir hale getirilmesini sağlar.

- Yeniden Kullanım veya Yeniden Üretim: İşlenen malzemeler ya yeni taş yünü üretiminde ya da alternatif ürünlerde hammadde olarak değerlendirilir. Böylece atıkların çevresel etkisi azaltılırken ekonomik değer yaratılmaktadır.

Sonuç olarak, taş yünü geri dönüşüm sistemi, çevresel sürdürülebilirlik açısından kritik bir bileşen olarak ön plana çıkmaktadır. Bu sistem, doğal kaynakların korunmasına, atıkların azaltılmasına ve enerji tasarrufuna önemli katkılar sağlamaktadır. Ayrıca, inşaat sektörü ve ilgili endüstriyel uygulamalarda taş yünü kullanımının çevresel etkilerini minimize ederek, daha sürdürülebilir üretim ve tüketim modellerine geçişi

desteklemektedir. Taş yünü geri dönüşümü, çevre dostu bir yaklaşım olmasının yanı sıra ekonomik açıdan da avantajlar sunmakta ve bu nedenle üretim ile kullanım süreçlerinde geri dönüşüm uygulamalarına öncelik verilmesi, sürdürülebilirlik hedeflerinin gerçekleştirilmesinde önemli bir adımdır (Zeng Makina & Mühendislik, 2016).



2.KAYNAK ARAŞTIRMASI

Bu bölümde, tez kapsamında değerlendirilen atık malzemelerin kullanılabilirliğine ilişkin daha önce yapılmış akademik çalışmalar incelenmiş ve ilgili literatür kısaca özetlenmiştir.

Şenol ve Karakurt (2023) çalışmalarında, çimento yerine %0, %5, %10 ve %15 oranlarında atık mermer tozu ikame edilen dört serilik harç karışımları hazırlamışlardır. Üretilen taze harç serileri üzerinde işlenebilirlik deneyi, 7 ve 28 günlük sertleşmiş harç numuneleri üzerinde ise eğilme ve basınç dayanımı deneyleri uygulanmıştır. Deney sonuçları; çalışmada kullanılan atık mermer tozunun, çimento yerine en fazla %10'a kadar kullanımı ile kabul edilebilir dayanım kayıpları elde edildiğini göstermiştir.

Gülan ve vd. (2016) çalışmalarında, ağırlıkça 0.25, 0.50, 0.75 ve 1 kg/m³ oranlarında cam lif içeren beton numunelerine hacimce %25, %50, %75 ve %100 oranlarında filler malzemesi ile yer değiştirecek şekilde mermer tozu ilave edilerek farklı beton serisi hazırlamışlardır. Elde edilen numuneler üzerinde porozite, kılcal su emme, ultrases geçiş hızı, basınç dayanımı ve yarmada çekme dayanımı deneyleri yapılarak, karbonatlaşma deneyi sonrası meydana gelen değişimler belirlenmiştir. Yapılan çalışma neticesinde, karbonatlaşma deneyi sonrası numunelerin, porozite, kapilarite, basınç ve yarmada çekme dayanımı değerlerinde azalma, ultrases geçiş hızı değerinde ise artış olduğu tespit edilmiştir.

Abbas ve Muntean (2025) çalışmalarında, farklı literatürlerden beton karışımlarında %5 – %20 oranlarında mermer tozu katkılarının etkilerini incelemişlerdir. Yaklaşık %10-15 oranındaki kullanımlar; dayanımı ortalama %5 ila %20 arasında artırmış, su geçirgenliği ve poroziteyi azaltarak dayanıklılığı da geliştirmiştir. Ancak %15'in üzerindeki oranlarda mekanik performans düşmüştür.

Basaran ve vd. (2022) çalışmalarında, mermer atığının üç formu toz, ince agrega ve kaba agrega betonun basınç dayanımı üzerindeki etkilerini farklı karışımlar üzerinden incelenmişlerdir. Mermer tozunun, ince partikülleriyle betonun gözeneklerini doldurarak erken yaş dayanımını artırırken, su emme oranını ve poroziteyi azaltarak dayanıklılığı iyileştirdiğini bildirmişler. İnce mermer agreganın, betonun işlenebilirliğini etkileyip, mekanik performansa olumlu katkılar sağladığını, kaba mermer agrega kullanımı ise daha çok betonun dayanımını ve rijitliğini desteklediğini ancak yüksek oranlarda işlenebilirliği zorlaştırdığını rapor etmişlerdir.

Demir ve Alyamaç (2022) yapmış oldukları çalışmada, yüksek dayanımlı beton üretiminde atık mermer tozunun kullanımını araştırmışlardır. Mermer tozu, beton karışımında ince agrega ve kısmen çimento ikamesi olarak %8, %16 ve %24 oranlarında kullanılmıştır. Ayrıca, bazı karışımlarda %10 silika dumanı da katkı olarak eklenmiştir. 7, 28 ve 90 günlük kür sürelerinde yapılan basınç dayanımı testleri ile malzemenin performansı değerlendirilmiştir. Sonuçlar, mermer tozunun özellikle düşük ve orta oranlarda kullanıldığında betonun basınç dayanımını artırdığı, mikro yapıyı iyileştirdiği ve çevresel sürdürülebilirliğe katkı sağladığı yönündedir. Ancak mermer tozunun yüksek oranlarda kullanılması durumunda mekanik performansta azalma gözlemlenmiştir.

El-Mandouh ve vd. (2022), yüksek dayanımlı betonlarda çimento yerine %2,5 – %5 – %7,5 oranlarında mermer tozu etkisini incelemişlerdir. Sonuçlara göre, basınç dayanımı sırasıyla yaklaşık %11, %15 ve %17 artmış; çekme dayanımı da benzer oranlarda iyileşmiştir. Ancak mermer tozu, %10 oranında olan karışımlarda bu iyileşme tersine dönerek basınç dayanımının azaldığını gözlemlemişlerdir.

Abadou ve vd. (2020) çalışmada, mermer ve seramik atıklarının hava kireci bazlı harçlara %0'dan başlayarak farklı oranlarda (%5, %10, %15, %20) eklenmesiyle performanslarını incelenmişlerdir. En iyi dayanım ve dayanıklılık, %10–15 arası katkı oranlarında elde edilirken, %15'in üzerindeki oranlarda mekanik özellikler ve işlenebilirlik azalmıştır. Bu nedenle, optimum katkı oranı %10–15 olarak belirlenmiş ve bu aralığın hem verim hem de sürdürülebilirlik açısından ideal olduğunu vurgulamışlardır.

Marvila ve vd. (2019) çalışmalarında, blok ve duvar örme harçlarında süs amaçlı Brezilya kayalarından elde edilen mermer atıklarının hidratlı kirecin tamamen veya en azından kısmen değiştirilmesi olasılığını kontrol etmek ve böylece inşaat sektöründe sürdürülebilirliğe katkıda bulunmayı amaçlamışlardır. Bu tür bir değiştirmenin doğrulanması, hidratlı kireç ve mermer tozunun karakterizasyonu ve hidratlı kirecin %0, %25, %50, %75 ve %100 oranlarında mermer atığı ile değiştirilmesiyle harç üretimi ile gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, atığın dahil edilmesinin analiz edilen parametrelerde herhangi bir hasara neden olup olmayacağını belirlemek için incelenen harçların temel özellikleri kontrol etmişler. Sonuçlar, hidratlı kirecin mermer atığı ile %50'ye kadar kısmen değiştirilmesinin mümkün olduğunu, ancak tamamen değiştirilmesinin mümkün olmadığını göstermişlerdir.

Chokkalingam ve vd. (2022), atık seramik tozu ve yüksek fırın cürufunun geopolimer betonun mekanik ve dayanıklılık özelliklerine etkisinin incelendiği

alışmalarında geopolimer betonda sadece atık seramik tozunun kullanılmasının beton özelliklerini bozduğunu belirtmişlerdir. Fakat hazırlanan 16 karışım sonuçları değerlendirildiğinde en iyi sonucun %60 atık seramik tozu ve %40 yüksek fırın cürufu ile hazırlanan karışım olduğu belirtilmiştir. Deneysel bulgular sonucunda geopolimerde atık seramik tozunun kullanılabilirliğini rapor etmişlerdir.

Tanyıldızı (2022) yaptığı çalışmada, %0, %10, %20 ve %30 olarak farklı oranlarda ikame edilen atık seramik tozunun betona kapilerite açısından etkilerini incelemiştir. Kapiler su absorpsiyonunun, referans beton numunesi sonucu incelendiğinde %10'a kadar atık seramik tozu ikamesi ile azaldığı, %20 ve %30 olan diğer atık seramik tozu ikame oranlarındaki numunelerde ise arttığı tespit edilmiştir. Böylelikle betonda bulunan kılcal gözeneklerin azaltılması, beton mikro yapı yoğunluğunun ve geçirimsizliğinin artırılması ve suyun beton içinde serbest hareketini kısıtlanması için ilgili karışımında atık seramik tozu ikamesinin %10 seviyesine kadar yer değiştirilmesinin daha uygun bir dolgu özelliği gösterebileceği belirtilmiştir.

Darfoun (2024) yaptığı çalışmasında, atık seramik tozu ve pirinç kabuğu külü katkılı numunelerde; seramik tozu miktarının artmasıyla kuru birim hacim ağırlığı, basınç dayanımı ve donma-özölme direnci artarken, su emme ve porozite azalmıştır. Isı iletim katsayısı tayini deneyinde, atık seramik tozunun ısı iletim katsayısı üzerinde olumsuz etki yarattığı görölmüştür.

Bilal (2019) yaptığı çalışmada, atık seramik tozu ve pirinç kabuğu külü katkılarının geopolimer beton üzerindeki etkilerini incelemiştir. Pirinç kabuğu külünün yayılma ve su emme oranlarını artırarak kıvam ve dayanımı olumsuz etkilediği, seramik tozunun ise özellikle yüksek molalite ile birlikte basınç dayanımı ve yüksek sıcaklık direncini artırdığını belirlenmiştir. Düşük gözeneklilik ve su emme değerlerine sahip karışımlarda, %2 pirinç kabuğu külü veya %15 seramik tozu ile 70 MPa üzerinde dayanım elde edilebilmiştir. Optimum dayanım ve yoğunluk değerlerine, düşük katkı oranları ve uygun molalite seviyelerinde ulaşılabilceği görölmüş; bu tür atıkların geopolimer beton üretiminde kullanılabilir olduğu ancak yüksek sıcaklık gibi özel koşullarda dikkatli tasarım gerektiği sonucuna varılmıştır.

Demiral ve vd. (2024) çalışmalarında, atık seramiklerin toz haline getirilerek çimento üretiminde belirli oranlarda (%10, %20, %30) ikame malzeme olarak kullanılmasını incelemiştir. Araştırma kapsamında, bu ikame oranlarının betonun fiziksel ve mekanik özelliklerine olan etkileri değerlendirilmiştir. Deneylerde elde edilen sonuçlara göre %10 atık seramik tozu ikame edilen karışımdan serisinin kontrol

numunesine göre kabul edilebilir mekanik performans elde edildiği belirlenmiştir. Aynı şekilde %10 atık seramik tozu ikamesinin daha yüksek ikame oranlarına göre daha iyi fiziksel özellik performansı gösterdiği tespit edilmiştir. Elde edilen bulgular, atık seramiklerin çimento üretiminde ikame malzeme olarak %10 oranında kullanımının hem sürdürülebilir inşaat uygulamaları hem de malzeme performansı açısından umut verici bir çözüm olduğunu göstermişlerdir.

Alotaibi ve vd. (2024) , beton karışımlarında %5, %15, %25 ve %45 oranlarında atık seramik tozu ikamesi ile yapılan çalışmada, özellikle %5 seviyesindeki seramik tozu katkılı betonların 14 günlük kür sonunda yaklaşık %25 oranında basınç dayanımı artışı gösterdiğini gözlemlemişlerdir. Ancak %15 ve üzerindeki ikame oranlarında dayanım düştüğü sonucunu elde edilmişlerdir. Bunun yanı sıra kür süresi uzadıkça (28 gün) dayanım artışı tüm karışımlarda gözlemlenmiş, ancak seramik tozu miktarı arttıkça bazı gruplarda düzensiz sonuçlar ortaya çıkmıştır.

Atkuri ve Rao (2021) çalışmalarında, 90 mikron altı ve 90–150 mikron boyut aralığındaki atık seramik tozlarıyla, çimentonun %10–50 oranlarında ikamesi ile hazırlanan beton örneklerinde, özellikle %10–30 arası seramik ikamesinde sıkıştırılmış betonlarda hem tane boyut etkisini hem de güç etkisini incelenmişlerdir. Sonuçlar; %10 ve %20 oranında seramik tozu kullanımında basınç, çekme ve eğilme dayanımlarının artış gösterdiğini, daha büyük oranlarda dayanım düşüşü olduğunu göstermişlerdir.

Alghamdi ve vd. (2024) çalışmalarında, kireç taşı-kalsine kil çimentosu ile yapılan yüksek hacimli genleştirilmiş vermikülit hafif harcına atık taş yünü eklenmesinin mekanik dayanım ve yangın direnci üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Kireç taşı-kalsine kil çimentosu esaslı harçta kumun yarısı vermikülit ile değiştirilmiş ve atık taş yünü, bağlayıcının farklı oranlarında karışıma dahil edilmiştir. 28 günlük kür sonrasında yapılan testlerde, atık taş yünü katkısının basınç ve eğilme dayanımlarını önemli ölçüde artırdığı, kuruma büzülmesini azalttığı ve yangına karşı direnci güçlendirdiği görülmüştür. Özellikle %3 atık taş yünü katkısı, dayanım değerlerinde belirgin iyileşmeler sağlamış ve yangın sonrası harcın önemli bir dayanımını korumasını mümkün kılmıştır. Ayrıca, atık taş yünü ilavesi mikro yapının daha kompakt ve sağlam olmasını sağlamış, ısı iletkenlikte ise önemli bir değişim yaratmamıştır. Sonuç olarak, atık taş yünü eklenmiş vermikülit karışımlı kireç taşı-kalsine kil çimentosu hafif harç hem mekanik hem de yangın performansı açısından gelişmiş özellikler göstererek sürdürülebilir ve dayanıklı bir yapı malzemesi alternatifi sunduğu rapor edilmiştir.

Cheng ve vd. (2011) çalışmada, farklı boyutlarda taş yünü atıklarının çimento esaslı kompozitlerde doğal agregaların yerine kullanımı ve etkilerini incelemiştir. Taş yünü atıkları hem yalıtım malzemesi olması hem de bileşim olarak diğer puzolan malzemelere benzemesi nedeniyle çimento kompozitlerde tamamlayıcı malzeme veya dolgu maddesi olarak değerlendirmişlerdir. Deney sonuçları, taş yünü atıklarının doğal agregaların bir kısmını ikame etmesiyle basınç dayanımı, çekme dayanımı, aşınma direnci, su emilimi, alkali reaksiyon direnci, özdirenç ve klorür iyon penetrasyonunda iyileşmeler sağlandığını göstermiştir. Bu iyileşmeler, taş yünü sayesinde oluşan daha yoğun ve sıkı yapının sonucudur. Tarama elektron mikroskobu ve puzolanik aktivite testleri de bu sonuçları desteklemiştir. Özellikle 75 µm altındaki taş yünü parçacıklarının çimento esaslı kompozitlerde kritik bir rol oynadığı belirlenmiştir.

Al-Jabri ve Shoukry (2024) çalışmalarında, kireç taşı-kalsine kil çimentosu ile yapılan normal ve hafif harçların mekanik dayanıma, termal özelliklere ve yangına dayanıklılığa, atık taş yünü katkısının etkisini incelemiştir. Kireç taşı-kalsine kil çimentosu, sıradan Portland çimentosunun %60'ının kireç taşı tozu ve metakaolin ile değiştirilmesiyle hazırlanmıştır. Atık taş yünü, doğal kum ve genleştirilmiş polistiren ile yapılan harçlara bağlayıcı ağırlığının %1 ila %5'i oranında eklenmiştir. 28 günlük kür sonrasında yapılan testlerde, atık taş yünü ilavesinin hem normal hem de hafif harçlarda basınç dayanımını artırdığı, taneciklerin daha sık yerleşmesini sağlanmasıyla ısı iletkenliğinin düşük seviyede olduğu görülmüştür. Özellikle, normal harçlarda yaklaşık %24, hafif harçlarda ise %110'a varan basınç dayanımı artışı elde edilmiştir. Ayrıca, bir saatlik yüksek sıcaklıkta yangın maruziyetinden sonra, atık taş yünü içeren harçların sırasıyla %59 ve %83 oranında dayanımını koruduğu belirlenmiştir. Bu sonuçlar, atık taş yününün kireç taşı-kalsine kil çimentosu esaslı harçların performansını iyileştirerek sürdürülebilir ve dayanıklı yapı malzemeleri geliştirilmesine katkı sağladığını göstermiştir.

Medeiros ve vd.(2021) çalışmalarında, taş yünü atığının Portland çimento matrikslerine katılmasıyla daha temiz ve çevre dostu malzeme üretimini gerçekleştirmişlerdir. Taş yünü atığının çimento karışımlarına dahil edilmesi, atıkların geri kazanımını sağlarken, aynı zamanda çimento bazlı malzemelerin çevresel etkisini azaltarak sürdürülebilir üretime katkıda bulunmuştur. Deneysel sonuçlar, taş yünü atığı ilavesinin malzemenin performansını olumsuz etkilemeden çevresel açıdan daha temiz bir yapı malzemesi ortaya çıkardığını göstermiştir.

Lin ve vd.(2012) çalışmalarında, harçlarda Portland çimentosunun kısmi bir ikamesi olarak çeşitli taş yünü atık içeriklerini (%10, %20, %30 ve %40 ağırlıkça) kullanarak çimento esaslı kompozitlerin özelliklerini incelemişlerdir. Pozolanik dayanım aktivite testi, basınç dayanımı testi, kuru büzülme testi, emilim testi ve hızlı klorür penetrasyon testi yapılmış sonuçları ve karşılaştırılmıştır. Test sonuçları, taş yünü atıkları içeren kompozitlerin mekanik özellikleri artırabildiğini ve geçirgenliği azaltabildiğini göstermiştir. Bu iyileştirilmiş özellikler, pozolanik ürünün dolgu etkisi ile elde edilen yoğun yapının sonucu olduğu düşünülmüştür.

Kubiliute ve vd. (2018) çalışmalarında, mineral yün üretimi sırasında hava filtrelerinde biriken kupol tozunun Portland çimentosuna katkı maddesi olarak kullanılabilirliğini araştırmışlardır. Kimyasal ve mineralojik olarak kuvars, periklaz, albit, dolomit ve amorf fazlardan oluşan bu toz, öğütülerek mikro dolgu maddesi haline getirilmiş ve çimentoda %5, %10 ve %15 oranlarında kullanılmıştır. Sonuçlar, bu katkının çimentonun erken hidrasyonunu hızlandırdığı ancak priz süresini uzattığını göstermiştir. Yıkılarak klorür içeriği azaltılan toz, özellikle 28 ve 90 günlük kür sonunda çimento numunelerinin basınç dayanımını artırmıştır. %15'e kadar olan oranlarda kullanımda dayanım özelliklerini olumsuz etkilenmeden olumlu yönde değişmiştir. Katkı maddesi, çimento matrisinde stabil yapı oluşumunu desteklemiş, kalsiyum silikatların hidrasyonunu hızlandırmış zeolit türü oluşumlar gibi faydalı fazların oluşumunu teşvik etmiştir.

Ferrández ve vd. (2022) çalışmalarında, yapı ve yıkım atıklarından elde edilen ısı yalıtım malzemeleri—özellikle genleştirilmiş polistiren (EPS) ve taş yününün kireç harçlarında agrega yerine kullanılarak sürdürülebilir bir üretim modelini sunmuşlardır. Çalışma, bu atıkların kireç bazlı harçların fiziksel, mekanik ve dayanıklılık özellikleri üzerindeki etkilerini incelemiştir. Sonuçlara göre, mineral yün katkısı eğilme dayanımını artırmış, donma-çözülme ve tuz kristalleşmesi gibi çevresel etkilere karşı direnci iyileştirmiştir. EPS katkılı harçlar ise düşük yoğunluk ve termal yalıtım açısından avantaj sağlarken, mekanik dayanımda düşüş göstermiştir. Bu bulgular hem restorasyon hem de yeni yapı uygulamalarında atık bazlı katkı maddelerinin kireç harçlarında teknik olarak uygulanabilir olduğunu ve döngüsel ekonomi hedeflerine katkı sunduğunu göstermiştir.

3.MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. Kullanılan Malzemeler

3.1.1. Doğal hidrolik kireç (NHL 3,5)

Doğal hidrolik kireç (NHL 3,5), kil ve silis gibi mineral bileşenler içeren kireçtaşının yaklaşık 900–1200 °C’de pişirilmesiyle elde edilen ve hem havada hem de su altında priz alabilen bir bağlayıcıdır. Çizelge 3.1’de, NHL 3,5 kireçlerin kimyasal özellikleri verilmiştir.

Çizelge 3.1. NHL 3,5 kireçlerin kimyasal özellikleri (değerler kütle %’si olarak verilmiştir.) (TS EN 459-1, 2015).

Bileşen	Kütlece (%)
CaO+MgO	-
MgO	-
CO ₂	-
SO ₃	≤3 ²⁾
Aktif Kireç	≥ 6
2) 28günlük suda sertleştirmede hacim değişmezliği ıspatlanırsa,%3’dan fazla ve %7’ye kadar SO ₃ ’e müsaade edilir.	

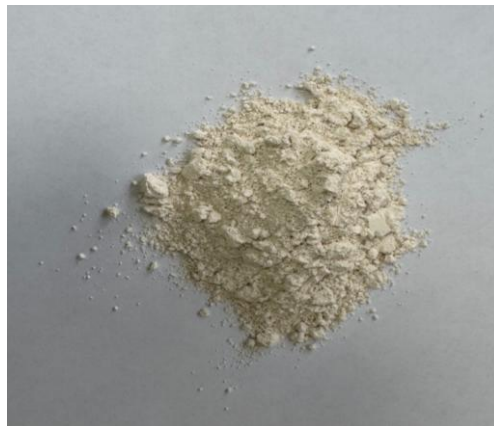
İçeriğinde yer alan hidrolik bileşenler sayesinde nemli ortamlarda da sertleşme ve dayanım kazanma özelliğine sahiptir. Nefes alabilir yapısı ve elastikiyeti nedeniyle özellikle tarihi yapıların restorasyon, koruma ve onarım çalışmalarında tercih edilmektedir; zira hem yapının özgün dokusuna zarar vermemekte hem de uzun ömürlü bir performans sağlamaktadır. Bu çalışmada kullanılan doğal hidrolik kireç NHL 3,5 olup DolphinFix firmasından temin edilmiştir. İlgili kirece ait görsel Şekil 3.1’de sunulmaktadır.



Şekil 3.1. Doğal hidrolik kireç

3.1.2. Atık mermer tozu

Atık mermer tozu, mermer bloklarının kesilmesi, cilalanması, delinmesi ve şekillendirilmesi sırasında ortaya çıkan ince taneli ve toz formunda bir yan üründür. Bu malzeme, mermerin ana bileşeni olan kalsiyum karbonat (CaCO_3) açısından oldukça zengindir ve genellikle beyaz, krem veya gri tonlarında görülür. Bu çalışmada kullanılan atık mermer tozu, Dalay Mermer ve Mad. Karo, Granit, Taah. San. ve Tic. Ltd. Şti.'den temin edilmiştir. Temin edilen malzemenin öğütme işlemi, Allalçı San. Tic. A.Ş. laboratuvarında gerçekleştirilmiş olup, öğütme sonrası elde edilen atık mermer tozunun görüntüsü Şekil 3.2’de gösterilmiştir. Çizelge 3.2’de ise atık mermer tozunun kütlece kimyasal bileşimi verilmiştir.



Şekil 3.2. Öğütülmüş atık mermer tozu

Çizelge 3.2. Atık mermer tozunun kütlece kimyasal bileşimi (%)

Bileşen	Kütlece (%)
CaO	85 – 98
MgO	0 – 5
SiO ₂	0 – 5
Al ₂ O ₃	0 – 1
Fe ₂ O ₃	0 – 0,5
SO ₃	0 – 0,1

3.1.3. Atık seramik tozu

Seramik malzemeler, bir veya birden fazla kil türü (örneğin kaolin) ile çeşitli mineral hammaddelerin karıştırılması, şekillendirilmesi ve yaklaşık 800–1600 °C sıcaklık aralığında pişirilmesiyle üretilir. Seramik üretimi sürecinde, malzemelerin şekillendirilmesi, kesilmesi, taşlanması veya kalite kontrol aşamalarında, ince taneli ve toz formunda bir yan ürün olan atık seramik tozu oluşur. Her ne kadar bu malzeme genellikle artık olarak değerlendirilse de, içerdiği kimyasal bileşenler sayesinde tekrar kullanılabilir niteliktedir.

Bu çalışmada kullanılan atık seramikler, Sunvit Seramik İnş. Taah. San. ve Dış Tic. Ltd. Şti.’den temin edilmiş ve Allalçı San. Tic. A.Ş. laboratuvarında öğütülerek toz haline getirilmiştir. Elde edilen atık seramik tozunun görseli Şekil 3.3’te gösterilmiştir. Çizelge 3.3’te ise seramik tozunun kütlece kimyasal bileşimi verilmiştir.



Şekil 3.3. Öğütülmüş atık seramik tozu

Çizelge 3.3. Seramik tozu kütlece kimyasal bileşimi (%)

Bileşen	Kütlece (%)
CaO	6,10
SiO ₂	47,77
Al ₂ O ₃	16,47
Fe ₂ O ₃	0,58
MgO	2,36
Na ₂ O	3,92
K ₂ O	0,95
SO ₃	0,29

3.1.4. Atık taş yünü tozu

Atık taş yünü tozu, taş yünü izolasyon malzemelerinin üretimi sırasında ortaya çıkan ince taneli, lifsi yapıya sahip bir yan üründür. Kimyasal bileşimi ağırlıklı olarak silika (SiO₂), alümina (Al₂O₃), kalsiyum oksit (CaO) ve demir oksit (Fe₂O₃) içermektedir. Çizelge 3.4’te ise taş yünü tozunun kütlece kimyasal bileşimi verilmiştir Bu malzeme, yanmaz, hafif ve kimyasal olarak kararlı bir yapıya sahiptir. Bu çalışmada kullanılan atık taş yünü, Aksaray’da bulunan taş yünü üretim tesisinden temin edilmiş olup, kurutma ve öğütme işlemleri Batman Allalçı San. Tic. A.Ş. laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Elde edilen atık taş yünü tozuna ait görsel Şekil 3.4’te sunulmuştur..



Şekil 3.4. Öğütülmüş atık taş yünü tozu

Çizelge 3.4.Atık taş yününün kütlece kimyasal bileşimi (%)

Bileşen	Kütlece (%)
CaO	20,12
SiO ₂	46,26
Al ₂ O ₃	17,63
Fe ₂ O ₃	6,89
MgO	5,21
TiO ₂	1,51
Na ₂ O	0,83
K ₂ O	0,49
SO ₃	0,30

3.2. Analiz Yöntemleri

Tez kapsamında hazırlanan dokuz farklı karışımın üretimi, deneysel çalışmaları ve gözlemleri Allalçı şirketine ait ARGE Laboratuvarı'nda gerçekleştirilmiştir. Karışımlarda kullanılan malzemelerin kimyasal ve fiziksel özellikleri, tez çalışmasının materyal bölümünde ayrıntılı olarak sunulmuştur. Karışımların içeriklerine ait oranlar ise Çizelge 3.5'te verilmiştir.

Hazırlanan karışımlarda, ideal harç kıvamının elde edilebilmesi amacıyla standart oranların dışına çıkılarak bazı farklılıklar uygulanmıştır. Bu tercih, kullanılan atık malzemelerin su emme kapasitelerindeki değişkenliğin dikkate alınması sonucunda yapılmıştır.

Üretilen harç karışımları, iç yüzeyleri yağlanmış 40 mm × 40 mm × 160 mm boyutlarındaki prizma kalıplara yerleştirilmiş, ardından TS EN 196-1 standardına uygun olarak sarsma cihazında sıkıştırılmış ve yüzeyleri spatula ile düzeltilmiştir. Numunelerin kalıplardan çıkarılması ve kürlenme koşulları ise TS EN 1015-11 standardı esas alınarak, Çizelge 3.6'da gösterilen uygun muhafaza koşulları sağlandıktan sonra gerçekleştirilmiştir.

Kalıplardan çıkarılan numuneler, hem 7 gün hem de 28 gün süreyle ortam koşullarında ve su banyosunda bekletilmiş; ardından eğilme ve basınç dayanımı deneyleri

için hazır hale getirilmiştir. Karşılaştırma amacıyla hazırlanan referans karışımında ise herhangi bir atık malzeme kullanılmamıştır.

Çizelge 3.5. Bağlayıcı, agrega ve katkı miktarının harç karışımına göre dağılımı

Karışım Kodu	NHL 3,5 (g)	Agrega (g)	Katkı Türü	Katkı Miktarı (g)	Su (g)
Referans	400	600	Yok	-	500
%5 MT	380	600	Mermer Tozu	20	500
%10 MT	360	600	Mermer Tozu	40	500
%15 MT	340	600	Mermer Tozu	60	500
%5 ST	380	600	Seramik Tozu	20	500
%10 ST	360	600	Seramik Tozu	40	500
%15 ST	340	600	Seramik Tozu	60	500
%5 TT	380	600	Taş Yünü Tozu	20	500
%10 TT	360	600	Taş Yünü Tozu	40	500
%15 TT	340	600	Taş Yünü Tozu	60	500

3.2.1. Eğilme dayanımı tayini

Eğilme dayanımı deneyi, prizma formundaki harç numuneleri bütün haldeyken gerçekleştirilir. Kalıp, yaklaşık eşit kalınlıkta iki tabaka halinde, her tabaka 25 defa tokmaklanıp sıkıştırılarak harçla doldurulur. Fazla harç, numune yüzeyi düz ve kalıp üst kenarı ile aynı seviyede olacak şekilde tesviye bıçağıyla sıyrılarak alınır. Daha sonra kalıp, standartlara uygun şekilde muhafaza edilir. Deney öncesinde, mesnet ve harç numunelerinin yüzeyleri, üzerlerinde bulunabilecek gevşek malzemelerin uzaklaştırılması amacıyla temiz bir bezle silinir. Numuneler, kalıbın çelik levha kısmına temas eden yüzeylerinden biri mesnete gelecek şekilde yerleştirilir. Deney makinası, Çizelge 3.5’de verilen şartları sağlamalıdır. Deney cihazı, altta $100 \pm 0,5$ mm aralıkla yerleştirilmiş iki mesnet silindiri ve bunların ortasına konumlandırılmış bir yükleme silindirinden oluşur; bu silindirler yükün düzgün dağılmasını sağlamak amacıyla hafifçe eğilebilir yapıdadır. Numuneye, 50 N/s sabit bir yükleme hızıyla, kırılma gerçekleşecek şekilde yük uygulanır. Hazırlanan harç numunesinin Şekil 3.5’te sunulmuştur.



Şekil 3.5. Hazırlanan harç numunesi

Numune kırıldığında, eğilmede çekme dayanımı formülüyle hesaplanır ve sonuçlar N/mm^2 cinsinden ifade edilir. Deney cihazının görseli Şekil 3.6’da sunulmuştur. Eğilmede çekme dayanımı, f , aşağıda verilen Formül 1.25’te yer alan eşitlik kullanılarak N/mm^2 olarak hesaplanır:

$$f = 1,5 FL / (bd^2) \quad (1.25)$$

F: Numuneye uygulanan en büyük yük (N),

L: Mesnet silindirlerinin eksenleri arasındaki mesafe (mm),

b: Numune genişliği (mm),

d: Numune yüksekliği (mm)dir.



Şekil 3.6. Eğilme dayanım cihazı

Çizelge 3.6. Numunelerin hazırlanma ve muhafaza (Kür) şartları

Harç Tipi	Hazırlama	%95 ± %5 veya polietilen torba içerisinde		%65 ± %5
		Kalıp İçerisinde	Kalıpsız	Kalıpsız
Hava kireci harçları	TS EN 1015-11	5	2	21
Çimento kütlesinin, toplam bağlayıcı kütlesine oranının %50'yi geçmediği hava kireci+çimento harçları	TS EN 1015-11	5	2	21
Çimento harçları ve hava kireci kütlesinin, toplam bağlayıcı kütlesine oranının %50'yi geçmediği hava kireci+çimento harçları	TS EN 1015-11	2	5	21
Diğer hidrolik bağlayıcı harçlar	TS EN 1015-11	2	5	21
Geciktiricili harçlar	TS EN 1015-11	2	5	21

Çizelge 3.7. Deney makinası özellikleri

Anma yüküne oranla izin verilen en büyük tekrarlanabilirlik (%)	Anma yüküne oranla izin verilen en büyük ortalama yük hatası (%)	En büyük yükleme sınırına oranla izin verilen sıfırlama hatası (%)
2,0	±2,0	±0,4

3.2.2. Basınç dayanımı tayini

Basınç dayanımı deneyi, önceden belirlenmiş standart boyutlarda hazırlanmış prizma numuneler üzerinde, TS standartlarına uygun bir pres makinesi kullanılarak gerçekleştirilir. Presin üst yükleme başlığı, numuneye temas edebilmesi için hareketli yapıda olmalı, ancak yükleme sırasında herhangi bir eğilme göstermemelidir.

Deneyde kullanılacak iki adet basınç başlığı, ya tungsten karbürden ya da en az 600 HV Vickers yüzey sertliğine sahip çelikten imal edilmiş olmalıdır. Bu başlıklar, 40,0 mm uzunluğunda, 40,0 mm $\pm$ 0,1 mm genişliğinde ve 10 mm kalınlığında olmalıdır. Genişlik toleransı, simetrik olarak alınan dört ölçümün ortalaması esas alınarak belirlenmeli; temas yüzeylerindeki düzlükten sapma ise en fazla 0,01 mm olmalıdır.

Basınç başlıklarının doğru ve sabit konumda yerleştirilmesini sağlamak amacıyla, yükleme parçasının alt plakası tavllanmış ve sertleştirilmiş çelikten yapılmalı; bu yüzeyin de düzlük sapması en fazla 0,01 mm olmalıdır. Alt plaka, presin alt başlığına, yardımcı merkezleme aparatı ile hizalanarak yerleştirilmelidir.

Numuneye, yükte ani bir sıçrama oluşmasına izin vermeden, 30 ila 90 saniye içerisinde kırılma gerçekleşecek şekilde, 240 N/s sabit yükleme hızı uygulanır. Yük, numune kırılıncaya kadar aynı hızda sürdürülür. Deney sırasında ulaşılan maksimum yük değeri Newton (N) cinsinden kaydedilir.

Basınç dayanımı, numunenin taşıyabildiği maksimum yükün, yük uygulanan kesit alanına bölünmesiyle hesaplanır. Her bir numunenin basınç dayanım değeri, en yakın 0,05 N/mm² hassasiyetle yuvarlatılarak kaydedilir. Elde edilen değerler kullanılarak ortalama basınç dayanımı ise 0,1 N/mm² hassasiyetle hesaplanır. Ayrıca, her numunenin deney sırasında ve kalıptan çıkarıldığı andaki yaşı ayrı ayrı kaydedilir (TS EN 1015-

11).Çalışmada kullanılan basınç dayanımı tayini cihazının görseli Şekil 3.7’de sunulmuştur.



Şekil 3.7. Basınç dayanım cihazı

3.2.3. Elek Analizi

Eleme, tanelerin belirli boyutlardaki delik ya da açıklıklardan geçip geçememesi esasına dayalı bir boyut sınıflandırma yöntemidir. Elek analizi (veya elek çözümlemesi), farklı boyutlardaki tanelerden oluşan kırılmış ya da öğütülmüş malzemelerin tane boyu dağılımını belirlemek amacıyla uygulanmaktadır. Tane boyu dağılımı, bir numunedeki tanelerin boyutları ile bu boyutlara karşılık gelen miktarları arasındaki ilişkiyi ifade eder (Gürkan, n.d.).

Bu çalışmada, numunenin tane boyu dağılımını belirlemek için Hosokawa marka vakumlu elek analiz cihazı (Şekil 3.8.) kullanılarak kuru eleme yöntemi uygulanmıştır. Deneyde, elekler küçükten büyüğe doğru artan göz açıklıklarına sahip olacak şekilde sıralanmıştır. Örnek olarak, kullanılan 160 μm açıklığa sahip elek Şekil 3.9’da verilmiştir. Analiz edilecek numune, en küçük açıklığa sahip elek üzerine dikkatlice yerleştirildikten sonra cihaz kapatılmış ve vakum sistemi devreye alınarak eleme işlemi başlatılmıştır. Vakumlu sistem, taneciklerin hava akımı etkisiyle eleklerden geçmesini sağlayarak hem

toz oluşumunu azaltmakta hem de ince fraksiyonların daha etkin ayrışmasını mümkün kılmaktadır.

Eleme işleminin tamamlanmasının ardından, her elek üzerinde kalan malzeme ayrı ayrı toplanmış ve $\pm 0,1$ gram hassasiyetindeki bir terazi ile tartılmıştır. Elde edilen kütle değerleri kullanılarak numunenin tane boyu dağılımı hesaplanmıştır (TS EN 1015-1).



Şekil 3.8. Vakumlu elek analiz cihazı



Şekil 3.9. Kullanılan 160 µm elek

Çizelge 3.8. Farklı katkı malzemelerinin (MT, ST, TT, NHL) elek analizi sonuçları

Elek Açıklığı (mm)	Elek Açıklığı (µm)	MT Elek Üzerin de Kalan (%)	MT Kümü l atı f Geçen (%)	ST Elek Üzerin de Kalan (%)	ST Kümü l atı f Geçen (%)	TT Elek Üzerin de Kalan (%)	TT Kümü l atı f Geçen (%)	NHL Elek Üzerin de Kalan (%)	NHL Kümü l atı f Geçen (%)
1,00	1000	0,00	100	0,00	100	0,00	100	0,00	100
0,800	800	0,00	100	0,00	100	0,00	100	0,00	100
0,600	600	0,12	99,88	0,00	100	0,23	99,77	0,00	100
0,400	400	1,13	98,75	0,00	100	1,47	98,30	0,00	100
0,200	200	2,76	95,99	0,00	100	7,80	90,50	0,07	99,93
0,160	160	5,52	90,47	0,34	99,66	10,59	79,91	0,37	99,56
0,090	90	8,22	82,25	1,46	98,20	14,08	65,83	2,01	97,55
0,045	45	11,32	70,93	12,25	85,95	16,77	49,06	6,96	90,59
<0,045 (Toz)	<45	70,93	-	85,95	-	49,06	-	90,59	-

Elek analizine göre, dört malzemenin tane boyutu dağılımı birbirinden belirgin şekilde farklılık göstermektedir. Doğal hidrolik kireç (NHL), ince ve homojen bir tane yapısına sahiptir; yaklaşık %90,59'u 45 mikronun altındaki tanelerden oluşmaktadır. Bu durum, NHL'nin bağlayıcı özelliklerini optimize eden ince partikül yapısına işaret eder ve özellikle harçlarda homojen ve sıkı bir yapı oluşturulmasına katkı sağlar. Mermer tozu da oldukça ince partiküllerden oluşmakla birlikte, %70,93'lük oranla NHL'ye kıyasla biraz daha kaba bir dağılım göstermektedir. Seramik tozu ise en ince tanelere sahip malzeme olup, yaklaşık %85,95'i 45 mikron altındadır. Taş yünü tozu %49,06 oranında <45 mikron fraksiyon içerirken, daha iri partiküllere de sahip olması nedeniyle daha heterojen ve kaba bir dağılım sunar. Bu farklı tane boyutu dağılımları, malzemelerin harç içindeki fiziksel dolgu kapasitesi, işlenebilirlik ve kimyasal reaksiyon yüzey alanlarını doğrudan etkiler. İnce tanelerin fazla olması, daha yüksek yüzey alanı sağlayarak hem mekanik dayanımı artırabilir hem de puzolanik reaksiyonların gerçekleşmesine olanak tanır. Kaba ve lifsi taneler ise yapı içinde boşlukları doldurarak hacim stabilitesi sağlayabilir ancak reaktif yüzey alanı daha düşüktür.

3.2.4. Yığın yoğunluk tayini

Yoğunluk, birim hacimde bulunan madde miktarını ifade etmektedir. Toz formundaki bir malzeme bir kaba yerleştirildiğinde kapladığı hacim; parçacıkların şekli, boyutu, dağılımı ve yerleşim biçimi gibi çeşitli faktörlerden etkilenmektedir. Bu hacim, hem taneciklerin katı hacmini hem de iç yapılarındaki kapalı gözeneklerin hacmini kapsamaktadır.

Yığın yoğunluk, toz malzemelerin sıkıştırılmamış ve gevşek halindeki yoğunluğunu tanımlar. Genellikle gram/santimetreküp (g/cm^3) birimiyle ifade edilen bu değer, belirli bir yükseklikten geniş ağızlı bir huni yardımıyla standart boyutlardaki silindirik bir kaba serbestçe dökülen tozun kapladığı hacim üzerinden hesaplanmaktadır. Bu yöntemde ölçülen görünür hacim, taneciklerin hacminin yanı sıra tanecikler arasındaki boşlukları da içermektedir. Çalışmada kullanılan yoğunluk kabı Şekil 3.10'da gösterilmektedir (Bursa Teknik Üniversitesi [BTÜ], n.d.).

Bu çalışmada, toz formdaki atıkların yoğunluklarının belirlenmesi amacıyla yığın yoğunluk analizi yapılmıştır. Deney sırasında herhangi bir sıkıştırma işlemi uygulanmamış; numuneler serbest düşme yöntemi ile standart boyutlardaki silindirik kaplara aktarılmıştır. Kapların üst yüzeyleri düzlenmiş, fazla malzeme uzaklaştırılmış ve böylece ölçüm hassasiyeti sağlanmıştır. Elde edilen toplam hacim, taneciklerin bireysel hacmi ile aralarındaki boşlukları birlikte içerdiğinden, numunelerin görünür yoğunlukları bu esaslara göre hesaplanmıştır. Kullanılan malzemelerin yığın yoğunluk değerleri Çizelge 3.9.'da verilmiştir.



Şekil 3.10. Yoğunluk kabı

Çizelge 3.9. Katkı malzemelerinin hacimsel yoğunluk değerleri

Malzeme	Yoğunluk (g/L)	Yoğunluk (g/cm ³)
NHL 3,5	682,0	0,682
Mermer Tozu	1007,0	1,007
Seramik Tozu	992,2	0,992
Taş Yünü Tozu	1536,8	1,537

Yapılan ölçümler sonucunda, doğal hidrolik kireç (NHL) malzemesinin kuru yığın yoğunluğu 0,682 g/cm³ iken, atık malzemelerden mermer tozu 1,007 g/cm³, seramik tozu 0,992 g/cm³ ve taş yünü tozu 1,537 g/cm³ gibi farklı yoğunluk değerleri göstermektedir. Bu önemli yoğunluk farkları, malzemelerin yalnızca tane boyutu dağılımına değil, aynı zamanda mineralojik yapısına, üretim süreçlerine ve içerdiği ağır oksit bileşimlerine bağlıdır. Elek analizleri incelendiğinde, seramik tozunun %86'sı, mermer tozunun %71'i 45 mikronun altında ince tanelerden oluşurken, taş yünü tozunun ise %49 oranında daha kaba bir dağılımı bulunmaktadır. Özellikle taş yünü tozunun, bazalt ve diyabaz gibi volkanik kökenli kayalardan elde edilmesi ve yüksek oranda silika (SiO₂), alümina (Al₂O₃), kalsiyum oksit (CaO) ve magnezyum oksit (MgO) gibi ağır oksitler içermesi, birim hacimde daha fazla kütle barındırarak yüksek kuru yoğunluk değerine ulaşmasını sağlamaktadır. Ayrıca, taş yünü tozunun lifsi yapısına rağmen toz formunda olması, karışımda daha kompakt bir yığılma oluşturmaya katkı verir. Mermer ve seramik tozları ise yoğunluk bakımından birbirine yakın olmakla birlikte, mineral bileşim ve tane boyutu dağılımlarındaki farklılıklar nedeniyle fiziksel özelliklerde çeşitlilik göstermektedir.

3.2.5. Yayılma deneyi

Mineral bağlayıcı ile normal veya hafif agregalar içeren harçların taze kıvamı, karıştırıldıktan hemen sonra yayılma değeri ölçülerek belirlenir. Bu deney, TS EN 1015-3 standardına uygun olarak gerçekleştirilmiş olup, yayılma tablası (Şekil 3.11) ve 50 mm çapındaki silindirik standart kalıp (Şekil 3.12) kullanılmıştır. Deney, kalıp içine

yerleştirilen taze harç numunesinin yayılma tablasının belirli bir yükseklikten serbest bırakılmasıyla düşürülmesi ve oluşan yayılma çapının ölçülmesi esasına dayanır.

Deneye başlamadan önce, silindirik kalıbın iç ve dış yüzeyleri ile kenarları temizlenip nemli bir bezle silinmekte ve kurulanmaktadır. Ardından, kalıp yüzeyi çok düşük viskoziteli, reinesiz madeni bir yağ ile hafifçe yağlanmaktadır. Eğer yayılma tablası 24 saatten uzun süredir kullanılmamışsa, deneyden önce 10 kez serbest bırakılarak çalışır durumda olduğu kontrol edilmektedir.

Kalıp, yayılma tablasının dairesel levhasının merkezine yerleştirilir. Taze harç, kalıp içerisine iki tabaka halinde doldurulur. Her tabaka, yüzeye eşit şekilde yayılması için tokmakla 15 kısa vuruş yapılarak sıkıştırılır. Bu işlem sırasında kalıp, diğer el yardımıyla yayılma tablasına bastırılarak sabitlenir. Kalıptan taşan fazla harç tesviye bıçağı ile sıyrılarak alınır ve dairesel levhanın boş kısımları temizlenip kurulanır. Özellikle kalıbın alt kenarı çevresinde su veya harç artığı kalmamasına zen gösterilir.

Yaklaşık 15 saniye beklendikten sonra, kalıp dikey doğrultuda yavaşça yukarı kaldırılır. Dairesel levha üzerinde kalan harç kütlesi, yayılma tablasının saniyede bir kez olacak şekilde sabit frekansta toplam 15 kez serbest bırakılmasıyla yayılır. Yayılan harç kütlesinin çapı, birbirine dik iki yönde cetvel yardımıyla ölçülür. lm sonuçları milimetre cinsinden alınır ve en yakın milimetreye yuvarlanarak kaydedilir. Harç numunesinin yayılma değeri, bu iki ölçümün aritmetik ortalaması olarak hesaplanır. Ölçümlerden herhangi biri ortalamadan %10'dan fazla sapma göstermediği sürece değer geçerli kabul edilir. Ancak sapma %10'u aştığında deney, yeni bir numune ile tekrarlanır. İkinci denemede de aynı sınır aşıldığı takdirde ölçüm geçersiz sayılır ve deney yeniden yapılır. şekil 3.13'te farklı atıklarla hazırlanmış harçların yayılma görünümleri verilmiştir.



Şekil 3.11. Yayılma tablası



Şekil 3.12. Silindirik kap



Şekil 3.13. Farklı atıklarla hazırlanmış harçların yayılımları

3.2.6. X-Işını Kırınımı (XRD) Analizi

X-ışını kırınımı (XRD) yöntemi, kristal yapıya sahip malzemelerin atomik düzlemleri tarafından X-ışınlarının belirli açılarla kırılması prensibine dayanmaktadır. Her kristal faz, kendine özgü atomik düzenlemesi nedeniyle karakteristik bir kırınım desenine sahiptir ve bu desenler fazların tanımlanmasında ayırt edici bir özellik taşımaktadır. Yöntem, numuneye zarar vermeden gerçekleştirilen yüksek hassasiyetli bir analiz tekniği olup, çok küçük miktarlardaki toz numunelerle dahi çalışmaya olanak sağlamaktadır. XRD analizleri yalnızca kristal yapıların ve faz bileşenlerinin belirlenmesine değil, aynı zamanda tane boyutu, mikroyerilim ve tercihli yönlenme gibi kristalografik özelliklerin de tespitine imkân vermektedir. Bu çalışmada, 0–200 µm boyut aralığında hazırlanan harç numunelerine, İstanbul Teknik Üniversitesi Partikül Malzemeleri Laboratuvarı'nda bulunan PANalytical X'Pert PRO model X-ışını difraktometresi (Şekil 3.14.) kullanılarak X-ışını kırınım analizi uygulanmıştır. Ölçümler $\text{CuK}\alpha$ ($\lambda = 2 \text{ \AA}$) X-ışını kaynağı ile, 2θ aralığı 10° – 90° olacak şekilde, 0.02° 2θ adım aralığında ve yaklaşık 1 cm²'lik ölçüm alanı üzerinden gerçekleştirilmiştir.

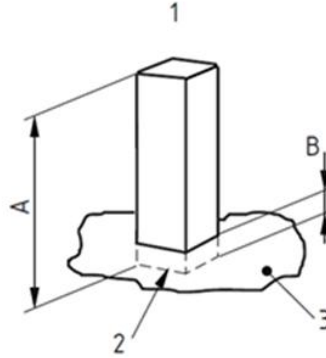


Şekil 3.14. PANalytical X'Pert PRO model bir X-ışını difraktometresi (XRD) cihazı

3.2.7. Kapiler su emme deneyi

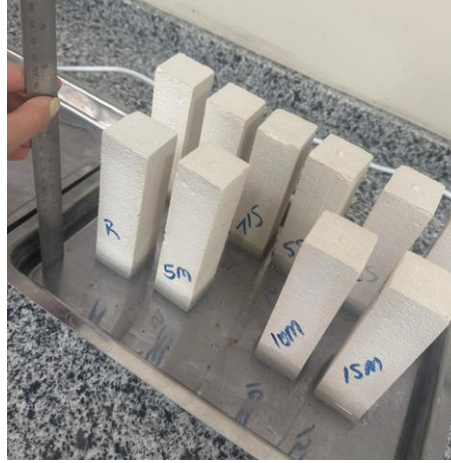
Bu çalışmada, harç numunelerinin kapiler su emme katsayısını belirlemek amacıyla TS EN 1015-18 standardı esas alınarak deneyler gerçekleştirilmiştir. Deney öncesinde, Çizelge 3.5'te verilen karışım oranlarına göre hazırlanan prizmatik harç numuneleri, $40 \times 40 \times 160$ mm boyutlarındaki kalıplara dökülmüş ve Çizelge 3.6'da belirtilen kür koşullarından hidrolik bağlayıcı harçlar bölümüne uygun olarak 2 gün boyunca kalıp içinde bekletilmiştir.

Kalıptan çıkarılan numuneler, 60 ± 5 °C sıcaklıktaki etüvde sabit kütleye ulaşınca kadar kurutulmuş ve elde edilen kuru kütle değerleri (M_0) kaydedilmiştir. Daha sonra, sabit kütleye ulaşmış numunelerin bir yüzeyi 10 mm derinliğe kadar suya daldırılmış; 10 dakika, 90 dakika ve 24 saatlik süreler sonunda kütle artışları ölçülmüştür. Deney boyunca numuneler, sabit su seviyesinde olacak şekilde su içinde tutulmuş olup, bu yerleşim düzeni Şekil 3.15.'te gösterilmiştir.



Şekil 3.15. Harç numunesi [TS EN 1015-18]

- 1: Prizma numune
- 2: Prizmanın kırılan üç yüzeyi
- 3: Islak yüzey
- A: Ortalama 80 mm
- B: 5 ila 10 mm derinlikte suya daldırılan kısım



Şekil 3.16. Su emme test düzeneği

Su emme katsayısı aşağıdaki Formül 14 ile hesaplanır:

$$C = \frac{(M_2 - M_1)}{A \sqrt{t}} \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{min}^{0.5}) \quad (1.26)$$

C: her bir harç numunesinin su emme katsayısı, (harçlar için; $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{min}^{0.5})$) veya (harçları için; kg/m^2)

M_1 : Kuru numune ağırlığı (kg)

M_2 : Belirli süre sonunda numune ağırlığı (kg)

A: Su ile temas eden yüzey alan (m^2)

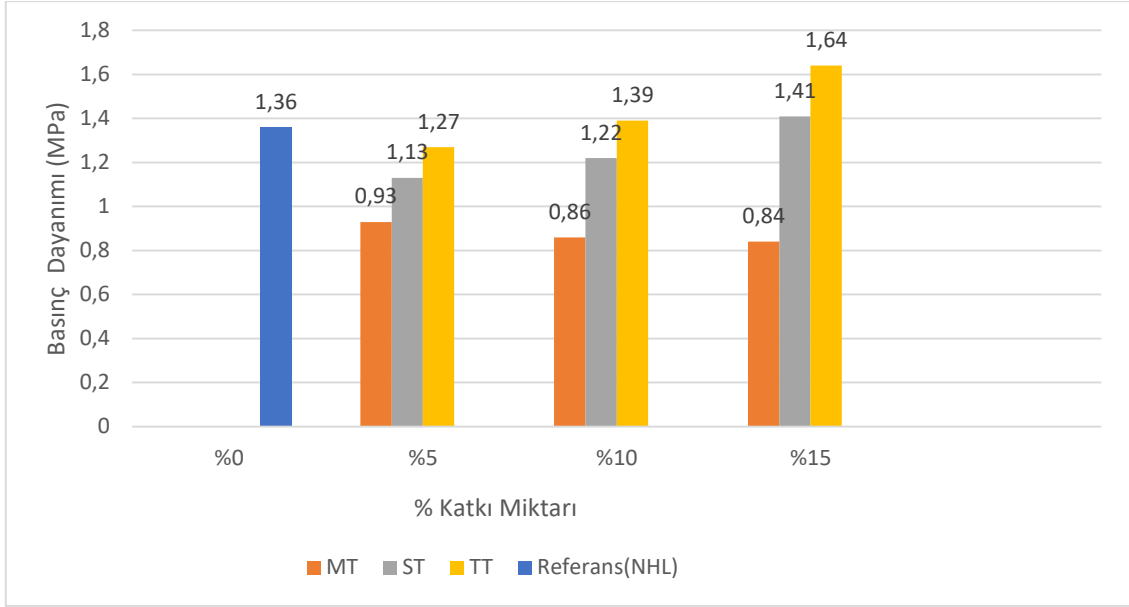
t: suya temas süresi (dk.,min.)

4.BULGULAR

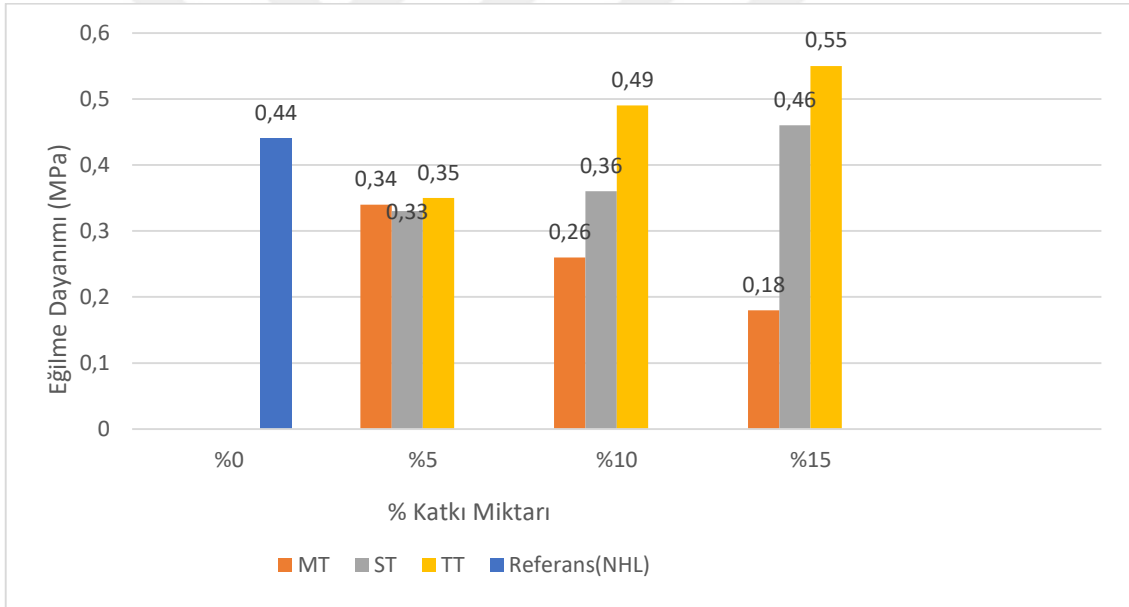
4.1. Eğilme ve Basınç Dayanımı Analiz Sonuçları

Eğilme ve basınç dayanım testleri, malzemenin yük taşıma kapasitesi ve hem yapısal hem de yapısal olmayan uygulamalarda mekanik gerilmelere dayanma yeteneği hakkında temel bilgiler sağlar. Basınç dayanımı testi, harcın eksenel yüke karşı direncini ölçer ve bu özellikle yük taşıyan duvar elemanları için önemlidir. Eğilme dayanımı testi ise harcın eğilme gerilmeleri altındaki davranışını değerlendirerek tokluğu ve çatlak direnci hakkında fikir verir. Bu testler birlikte, NHL bazlı harçların kullanılan atık tozlar ile koruma, restorasyon ve sürdürülebilir inşaat projeleri için uygunluğunu belirlemeye yardımcı olur. Ayrıca, mekanik testler, katkı maddelerinin veya puzolanik malzemelerin (taş yünü tozu, mermer tozu, seramik tozu) ortaya çıkan harcın performans özelliklerini nasıl etkilediğini anlamak için önemlidir.

Mermer tozu (MT), seramik tozu (ST) ve taş yünü tozu (TT) katkılı NHL bazlı harçlardan üretilen numunelerde basınç ve eğilme analizi yapılmıştır. Şekil 4.1 ve Şekil 4.2’de, 7 günlük suda kürlenmiş numunelerin sırasıyla basınç dayanımı ve eğilme dayanımı analiz sonuçları gösterilmektedir. 7 günlük suda kürlenmiş numunelerde referans eğilme ve basınç dayanımı değerleri sırasıyla 0,44 MPa ve 1,36 MPa olarak bulunmuştur. Şekil 4.1’de görüldüğü gibi; %10 taş yünü katkılı, %15 taş yünü katkılı ve %15 ST katkılı karışımlarda basınç dayanımı referans numune değerinin üzerinde iken, diğer numuneler referans numune değerinin altında kalmıştır.



Şekil 0.1. 7 günlük suda kürlenmiş numunelerin basınç dayanımları



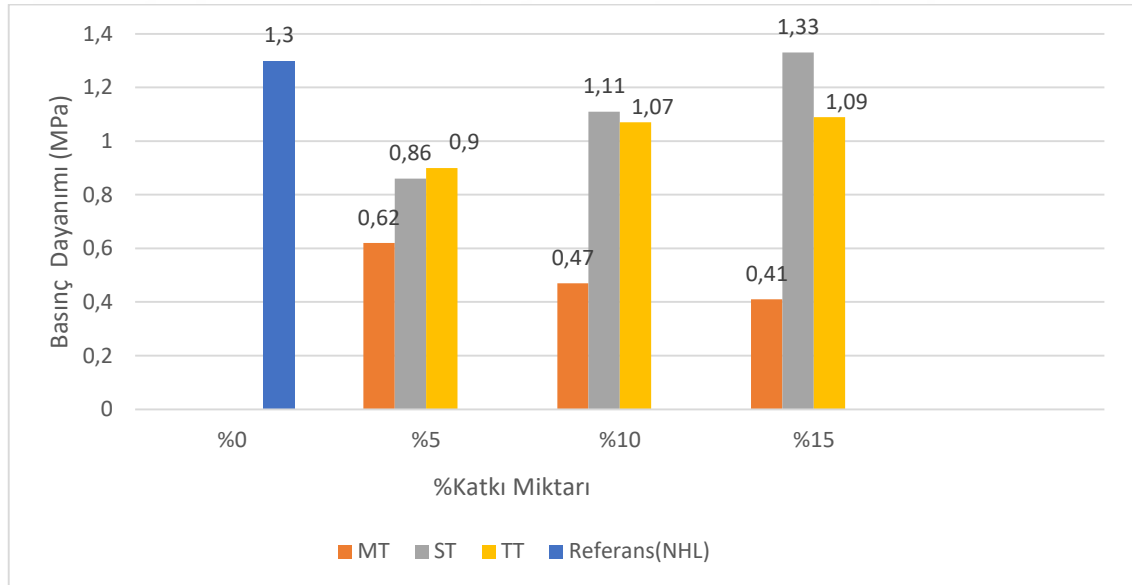
Şekil 0.2. 7 günlük suda kürlenmiş numunelerin eğilme dayanımları

Şekil 4.2’de görüldüğü gibi %10-15 TT katkı ve %15 ST katkı numunelerde eğilme dayanım değerleri referans numunenin eğilme dayanım değerlerinden daha yüksek olurken, diğer numunelerde daha düşük gelmiştir. Elde edilen bu sonuçlara göre;

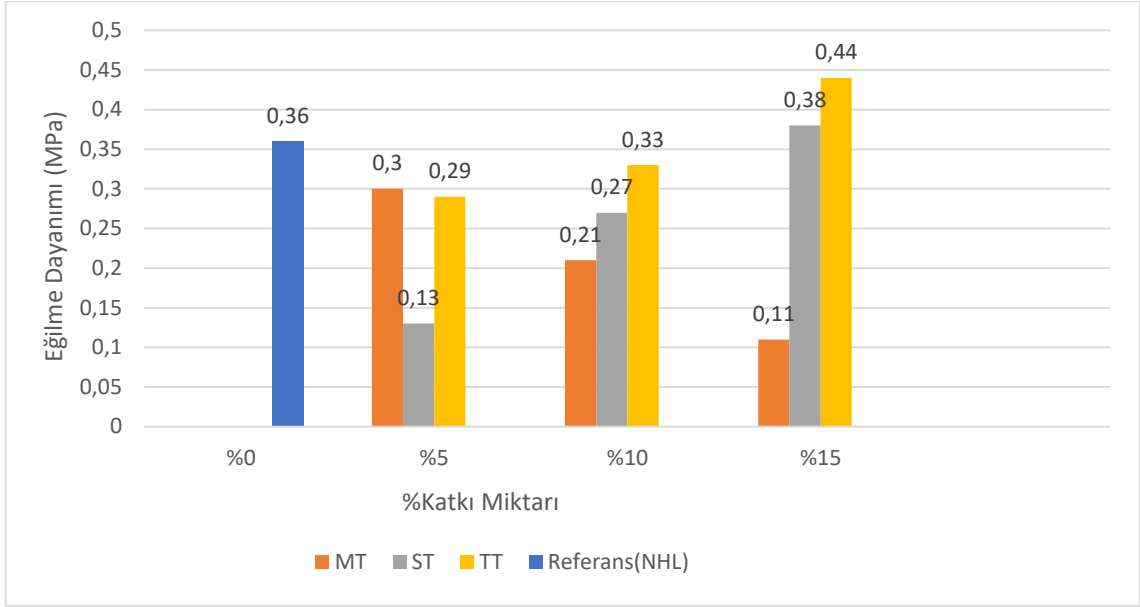
Mermer tozu katkısının ise her iki dayanım türü üzerinde olumsuz etki oluşturduğu belirlenmiştir. %5 mermer tozu ilavesiyle eğilme dayanımı 0,34 MPa’ya (%23 azalma), basınç dayanımı ise 0,93 MPa’ya (%32 azalma) düşmüştür. Bu azalış, %15 mermer tozu katkısında daha da belirginleşmiş; eğilme dayanımı 0,18 MPa’ya (%59 azalma), basınç dayanımı ise 0,84 MPa’ya (%38 azalma) gerilemiştir.

Seramik tozu katkısı incelendiğinde, %5 ve %10 oranlarındaki ilavelerin referans değerlerinin altında kaldığı, ancak %15 katkı oranının olumlu sonuçlar verdiği tespit edilmiştir. %15 seramik tozu katkısıyla eğilme dayanımı 0,46 MPa'ya yükselerek referansa göre yaklaşık %5 artış sağlamış, basınç dayanımı ise 1,41 MPa ile %4 oranında artış göstermiştir.

Taş yünü tozu katkısı ise bu koşullarda en belirgin olumlu etkiyi ortaya koymuştur. %10 taş yünü ilavesiyle eğilme dayanımı 0,49 MPa (%12 artış), basınç dayanımı ise 1,39 MPa (%2 artış) seviyesine ulaşmıştır. Daha yüksek katkı oranında ise bu artış daha belirgin hale gelmiştir. %15 taş yünü tozu katkısıyla eğilme dayanımı 0,55 MPa'ya (%25 artış), basınç dayanımı ise 1,64 MPa'ya (%21 artış) yükselmiştir.



Şekil 0.3. 7 günlük ortam koşullarında kürlenmiş numunelerin basınç dayanımları



Şekil 0.4. 7 günlük ortam koşullarında kürlenmiş numunelerin eğilme dayanımları

Şekil 4.3 ve Şekil 4.4'te, 7 günlük ortam koşullarında kürlenmiş numunelerde katkı miktarına bağlı olarak basınç ve eğilme dayanım değerleri gösterilmektedir. Şekil 4.3'te görüldüğü gibi, sadece %15 ST katkılı numunenin basınç dayanımı, NHL bazlı referans numunenin değerinden %4 daha yüksek gelmiştir. Eğilme dayanımlarına bakıldığında ise, yalnızca %15 TT ve %15 ST katkılı numunelerde eğilme dayanımı, referans numunenin eğilme dayanım değerlerinin üzerinde olduğu görülmektedir.

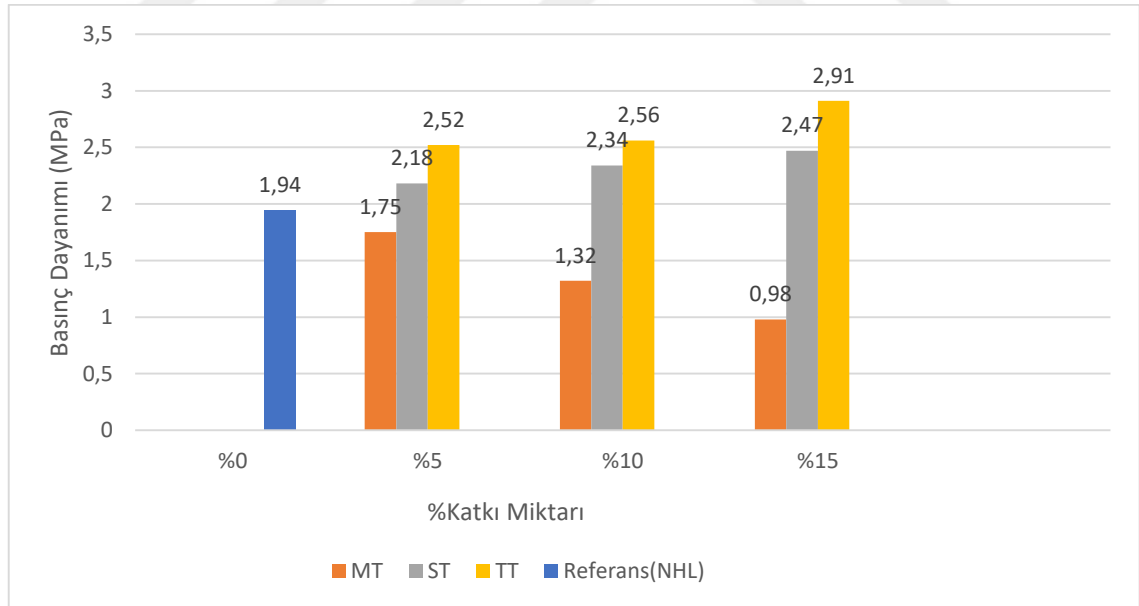
Katkısız referans numune 0,36 MPa eğilme ve 1,30 MPa basınç dayanımı sergilerken, %5 mermer tozu katkısında eğilme dayanımı 0,30 MPa'a (%17 azalma), basınç dayanımı 0,62 MPa'a (%52 azalma) düşmüştür. %10 katkı oranında bu değerler 0,21 MPa eğilme (%42 azalma) ve 0,47 MPa basınç (%64 azalma) şeklinde gerçekleşmiştir. %15 mermer tozu katkısı ise en düşük sonuçları vermiş; eğilme dayanımı 0,11 MPa (%70 azalma), basınç dayanımı 0,41 MPa (%68 azalma) seviyesine gerilemiştir.

Seramik tozu katkısı farklı oranlarda değişken etki ortaya koymuştur. %5 katkı oranında eğilme dayanımı 0,13 MPa (%64 azalma), basınç dayanımı 0,86 MPa (%34 azalma) olmuştur. %10 seramik tozu katkısı ile dayanımlar referans değerine yaklaşarak 0,27 MPa eğilme (%25 azalma) ve 1,11 MPa basınç (%15 azalma) değerleri elde

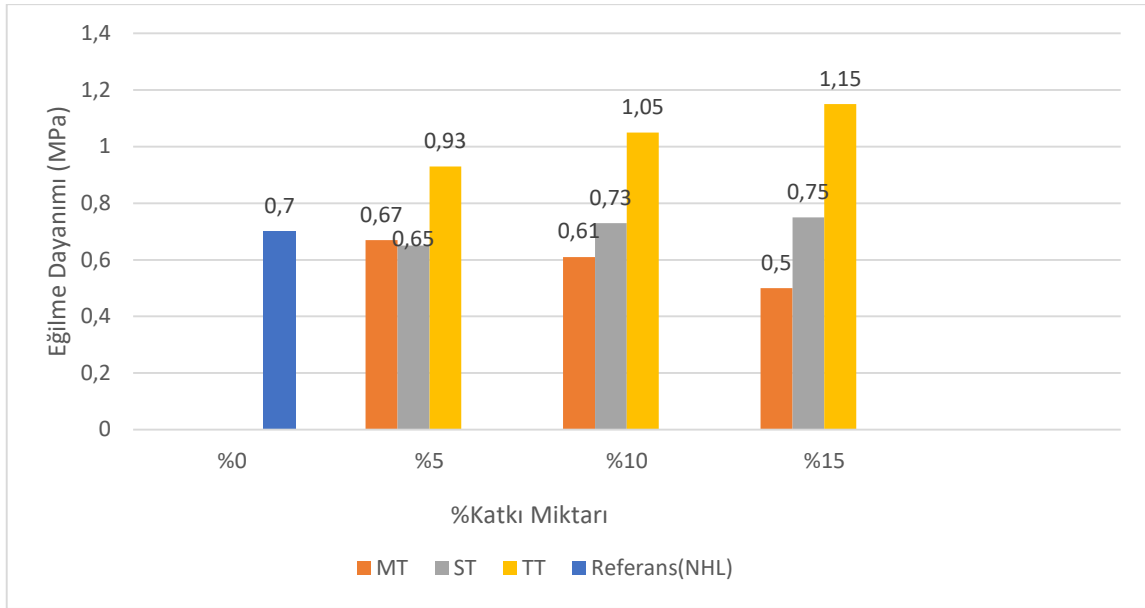
edilmiştir. %15 katkı oranında ise referans değerleri aşılmış; eğilme dayanımı 0,38 MPa (%6 artış), basınç dayanımı 1,35 MPa (%4 artış) seviyesine ulaşmıştır.

Taş yünü tozu katkısı ortam küründe genel olarak olumlu sonuçlar vermiştir. %5 katkı oranında eğilme dayanımı 0,29 MPa (%19 azalma), basınç dayanımı 0,90 MPa (%31 azalma) elde edilmiştir. %10 katkıda eğilme dayanımı 0,33 MPa'a yükselmiş (%8 azalma), basınç dayanımı ise 1,07 MPa (%18 azalma) olmuştur. %15 katkı oranında ise en yüksek eğilme dayanımı elde edilmiş; değer 0,44 MPa'a ulaşarak referansa göre %22 artış göstermiştir. Ancak aynı oranda basınç dayanımı artış göstermemiş, 1,09 MPa ile referansın %15 altında kalmıştır.

Elde edilen bu sonuçlara göre; 7 günlük ortam ve su kürlerinde üretilen MT, ST ve TT katkılı, NHL bazlı numunelerde eğilme ve basınç numune değerleri genellikle referans numune değerleri altında kalmıştır. ST ve TT katkılı numunelerde bazı katkı oranlarında referans numune değerlerinin üzerinde çıksa da, artışlar dikkate değer değildir. Sonuç olarak, 7 günlük ortam ve su kürlerinde üretilen MT, ST ve TT katkılı NHL bazlı harç numunelerinde, inşaat çalışmalarında veya yapı onarım çalışmalarında kullanılmasının uygun olmadığı değerlendirilmiştir.



Şekil 0.5. 28 günlük suda kürlenen numunelerin basınç dayanımları



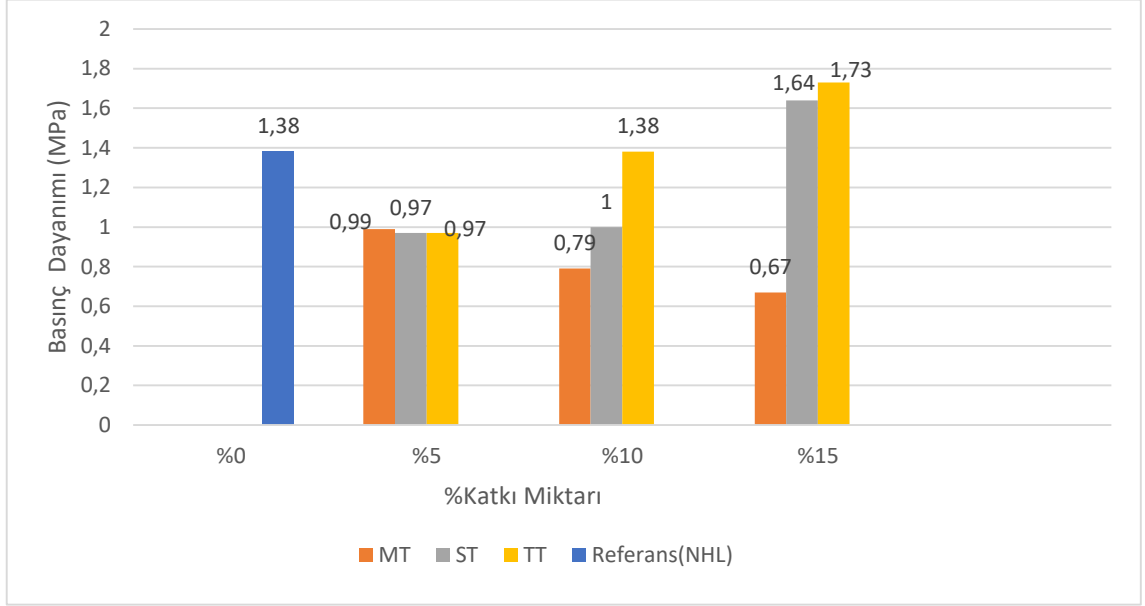
Şekil 0.6. 28 günlük suda kürlenmiş numunelerin eğilme dayanımları

MT, ST ve TT katkılı NHL bazlı harçlardan 28 günlük suda kürlenmiş numunelerin sırasıyla basınç dayanımı ve eğilme dayanımı analizleri yapılmıştır. Elde edilen analiz sonuçları, Şekil 4.5 ve Şekil 4.6’da görüldüğü gibi; MT katkılı NHL bazlı numunelerde eğilme ve basınç dayanımı değerleri, referans numune değerlerinden daha düşüktür. Ayrıca, MT katkı oranı %5’ten %15’e arttıkça basınç ve eğilme dayanımı değerleri düşmektedir. ST ve TT katkılı numunelerin basınç ve eğilme dayanımı, referans NHL bazlı numunenin değerlerinden daha yüksektir.

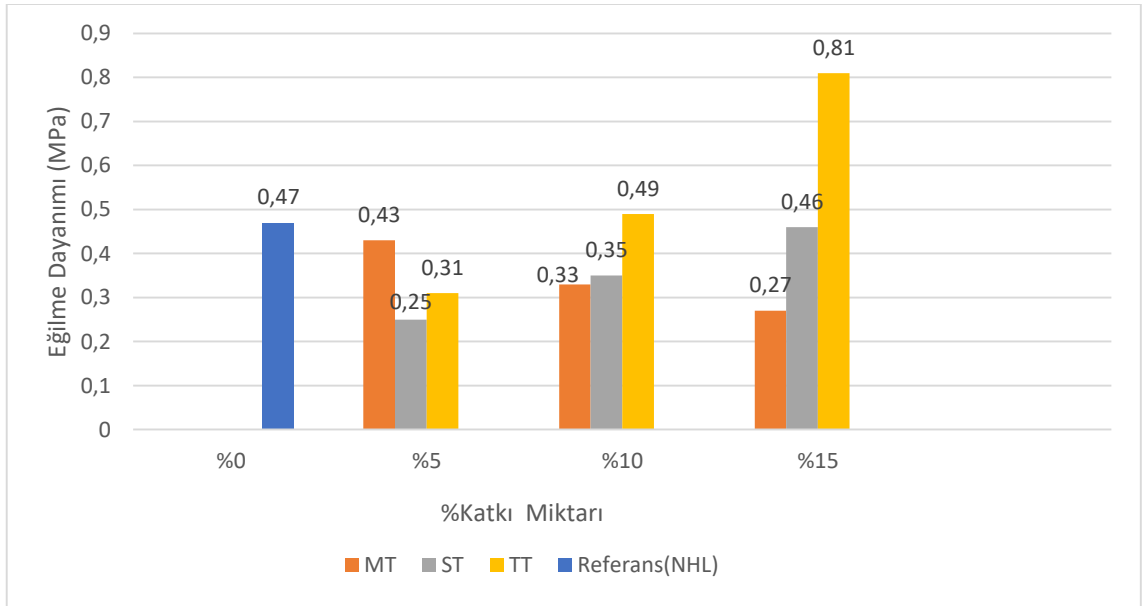
Katkısız referans numune 0,70 MPa eğilme ve 1,94 MPa basınç dayanımı sergilerken, %5 mermer tozu katkılı numune 0,67 MPa eğilme (%4 azalma) ve 1,75 MPa basınç dayanımı (%10 azalma) vermiştir. %10 katkı oranında eğilme dayanımı 0,61 MPa (%13 azalma), basınç dayanımı 1,32 MPa (%32 azalma) seviyesine gerilemiştir. %15 katkı oranında ise bu düşüş daha da belirginleşmiş; eğilme dayanımı 0,50 MPa (%29 azalma), basınç dayanımı 0,98 MPa (%49 azalma) olmuştur.

Seramik tozu katkısı dayanımlarda genel olarak olumlu etki sağlamıştır. %5 katkılı numune 0,65 MPa eğilme (%7 azalma) ve 2,18 MPa basınç dayanımı (%12 artış) vermiştir. %10 katkıda eğilme dayanımı 0,73 MPa (%4 artış), basınç dayanımı 2,34 MPa (%21 artış) seviyesine çıkmıştır. %15 seramik tozu katkısında en yüksek değerler elde edilmiştir; eğilme dayanımı 0,75 MPa (%7 artış), basınç dayanımı ise 2,47 MPa (%27 artış) olarak ölçülmüştür.

Taş yünü tozu katkısı ise her iki dayanımda da en belirgin artışları sağlamıştır. %5 katkı oranında eğilme dayanımı 0,93 MPa (%33 artış), basınç dayanımı 2,52 MPa (%30 artış) seviyesine ulaşmıştır. %10 katkılı numune 1,05 MPa eğilme (%50 artış) ve 2,56 MPa basınç dayanımı (%32 artış) göstermiştir. %15 taş yünü katkısı ile en yüksek değerler elde edilmiş; eğilme dayanımı 1,15 MPa (%64 artış), basınç dayanımı ise 2,91 MPa (%50 artış) düzeyine ulaşmıştır.



Şekil 0.7. 28 günlük ortam koşullarında kürlenmiş numunelerin basınç dayanımları



Şekil 0.8. 28 günlük ortam koşullarında kürlenmiş numunelerin eğilme dayanımları

Şekil 4.7 ve Şekil 4.8’de, 28 günlük ortam koşullarında kürlenmiş numunelerde katkı miktarına bağlı olarak basınç ve eğilme dayanım değerleri gösterilmektedir. Şekil 4.7 ve 4.8’de görüldüğü gibi MT katkı oranı %5’ten %15’e arttıkça basınç ve eğilme dayanımı değerleri düşmektedir. ST katkılı numunelerde basınç ve eğilme dayanımı, katkı oranı arttıkça genel olarak yükselmektedir; özellikle %15 ST katkılı numunelerde hem basınç hem de eğilme dayanımı referans NHL numunesinin değerlerini aşmaktadır. Benzer şekilde, TT katkılı numunelerde de basınç ve eğilme dayanımı, katkı miktarı arttıkça artış göstermektedir ve %15 TT katkılı numune, hem basınç hem de eğilme dayanımı açısından en yüksek değerleri göstermektedir. Katkısız referans numune ise 0,47 MPa eğilme ve 1,38 MPa basınç dayanımı göstermiştir. Bu sonuçlar, ST ve TT katkılarının NHL bazlı harçların mekanik performansını olumlu yönde etkilediğini ortaya koymaktadır.

Mermer tozu katkısı bu koşulda mekanik özellikleri olumsuz etkilemiştir. %5 mermer tozu katkısı ile eğilme dayanımı 0,43 MPa’ya (%9 azalma), basınç dayanımı ise 0,99 MPa’ya (%28 azalma) düşmüştür. %10 katkı oranında eğilme dayanımı 0,33 MPa (%30 azalma), basınç dayanımı 0,79 MPa (%43 azalma) seviyesine gerilemiştir. %15 mermer tozu katkısı ile en düşük değerler elde edilmiş; eğilme dayanımı 0,27 MPa (%43 azalma), basınç dayanımı ise 0,67 MPa (%51 azalma) olmuştur.

Seramik tozu katkısı farklı oranlarda değişken sonuçlar ortaya koymuştur. %5 katkılı numune 0,25 MPa eğilme (%47 azalma) ve 0,97 MPa basınç dayanımı (%30 azalma) göstermiştir. %10 seramik tozu katkısında eğilme dayanımı 0,35 MPa (%26 azalma), basınç dayanımı ise 1,00 MPa (%28 azalma) olmuştur. Ancak %15 katkı oranında dayanımlar referans değerlerinin üzerine çıkmıştır. Eğilme dayanımı 0,46 MPa (referansa göre %2 düşük), basınç dayanımı ise 1,64 MPa (%19 artış) seviyesine ulaşmıştır.

Taş yünü tozu katkısı ortam küründe en yüksek iyileşmeleri sağlamıştır. %5 katkılı numune 0,31 MPa eğilme (%34 azalma) ve 0,97 MPa basınç dayanımı (%30 azalma) göstermiştir. %10 katkı oranında eğilme dayanımı 0,49 MPa’ya çıkarak referansa göre %4 artış, basınç dayanımı ise 1,38 MPa ile referansla aynı düzeyde kalmıştır. %15 taş yünü katkısı ile en yüksek dayanım değerleri elde edilmiştir; eğilme dayanımı 0,81 MPa (%72 artış), basınç dayanımı ise 1,73 MPa (%25 artış) seviyesine ulaşmıştır.

Elde edilen 28 günlük sonuçlara göre, üretilen MT, ST ve TT katkılı NHL bazlı harç numunelerinin basınç ve eğilme dayanımları, 7 günlük değerlere kıyasla önemli ölçüde artış göstermiştir. Bu durum, zamanla devam eden hidratasyon ve dayanım

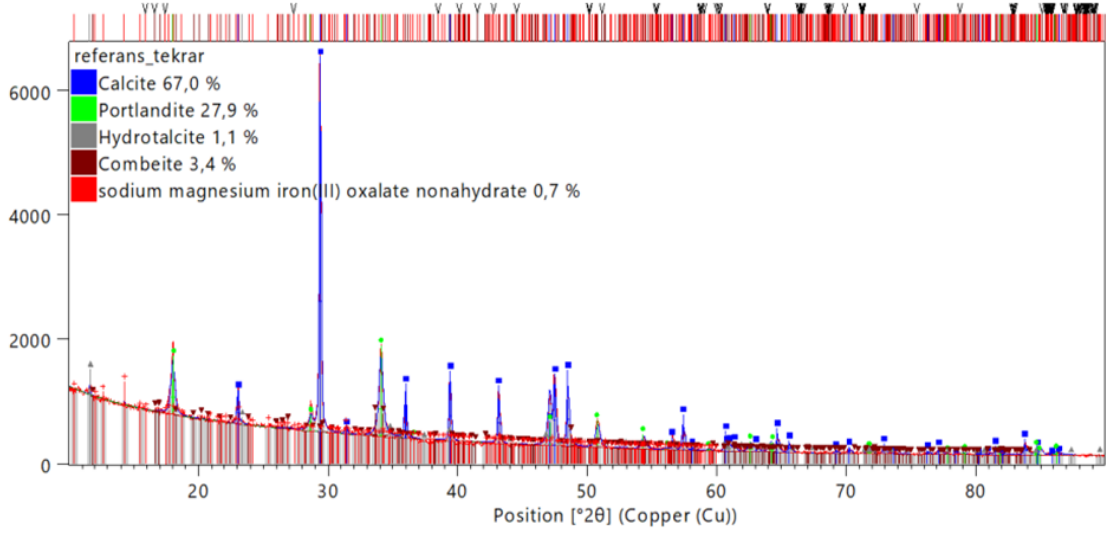
gelişimine işaret etmektedir. MT katkılı numunelerde basınç ve eğilme dayanımı, katkı oranı arttıkça düşme eğilimi göstermiştir; en yüksek katkı oranında en düşük dayanım değerleri elde edilmiştir. Buna karşın, ST ve TT katkılı numuneler katkı oranı arttıkça hem basınç hem de eğilme dayanımı açısından artış göstermiştir. Özellikle %15 katkı oranına sahip TT katkılı numune, hem basınç hem de eğilme dayanımı açısından en yüksek değerleri sergilemiştir. Suda kürlenene numuneler, havada kürlenene kıyasla daha yüksek basınç ve eğilme dayanımı sergilemiş olup, nemli kür koşullarının malzemenin mekanik özellikleri üzerindeki olumlu etkisini ortaya koymaktadır. En yüksek basınç dayanımı 28 günlük suda kürlenene TT katkılı numunede 2,91 MPa, eğilme dayanımı ise 1,15 MPa olarak kaydedilmiştir. Bu sonuçlar, ST ve TT katkılarının NHL bazlı harçların mekanik performansını belirgin şekilde iyileştirdiğini ve yapı malzemelerinde dayanım artırıcı katkı olarak kullanılabileceğini göstermektedir.

Çalışma bulguları, atık malzeme katkılarının harç numunelerinin mekanik performansı üzerindeki etkilerini ortaya koymuştur. Atık mermer tozu katkısı, hem 7 hem de 28 günlük numunelerde mekanik dayanımları olumsuz yönde etkilemiş, özellikle %15 katkı oranında ortam küründe en düşük dayanım değerleri gözlenmiştir. Bu sonuç, Şenol ve Karakurt (2023) ile Demir ve Alyamaç (2022) tarafından bildirilen, mermer tozunun yüksek oranlarda kullanımının mekanik performansı düşürdüğü bulguları ile uyumludur. Buna karşın, atık seramik tozu katkısı, özellikle %15 katkı oranında dayanımlar üzerinde olumlu etkiler göstermiştir; 28 günlük su küründe %15 seramik tozu katkılı numune 0,75 MPa eğilme (%7 artış) ve 2,47 MPa basınç dayanımı (%27 artış) ile en yüksek değerlere ulaşmıştır. Bu durum, Demiral ve vd. (2024) ve Bilal (2019) tarafından %10–15 seramik tozu katkılarının mekanik performansı artırdığı bulgularıyla paralellik göstermektedir. Atık taş yünü katkısı ise tüm katkı oranlarında belirgin olumlu etkiler göstermiş; 28 günlük su küründe %15 katkılı numune 1,15 MPa eğilme (%64 artış) ve 2,91 MPa basınç dayanımı (%50 artış) ile en yüksek değerleri elde etmiştir. Bu sonuç, Alghamdi ve vd. (2024) tarafından %3 oranında atık taş yünü katkısının basınç ve eğilme dayanımlarını artırdığı ve mikro yapıyı güçlendirdiğini rapor eden literatür ile doğrudan örtüşmektedir.

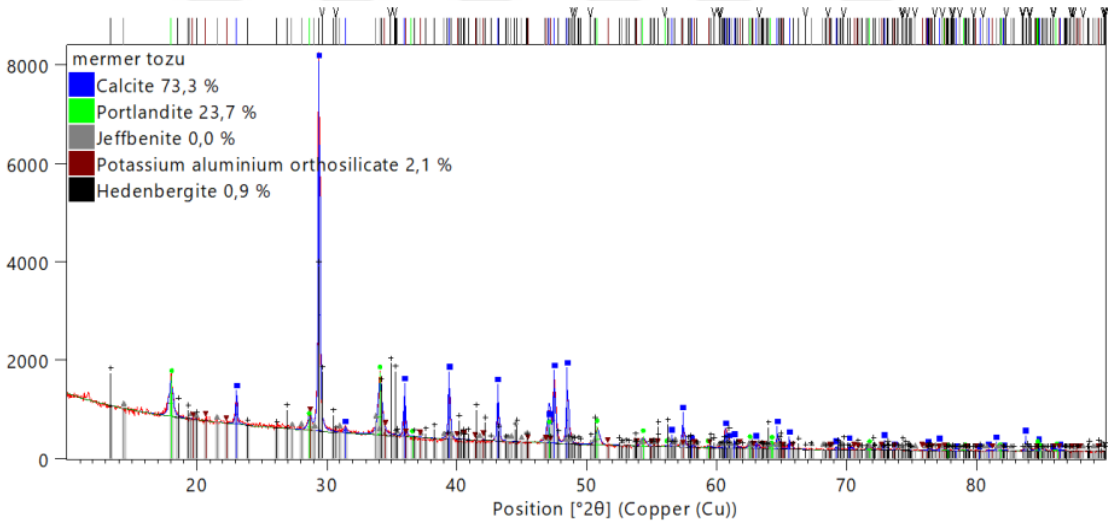
4.2. X-Işını Kırınımı (XRD) Analiz Sonuçları

Deneysel çalışmalarda üretilen bazı harç numunelerinin mikro yapısal özelliklerini araştırmak için XRD çalışmaları yapıldı. XRD çalışmaları ile malzemenin

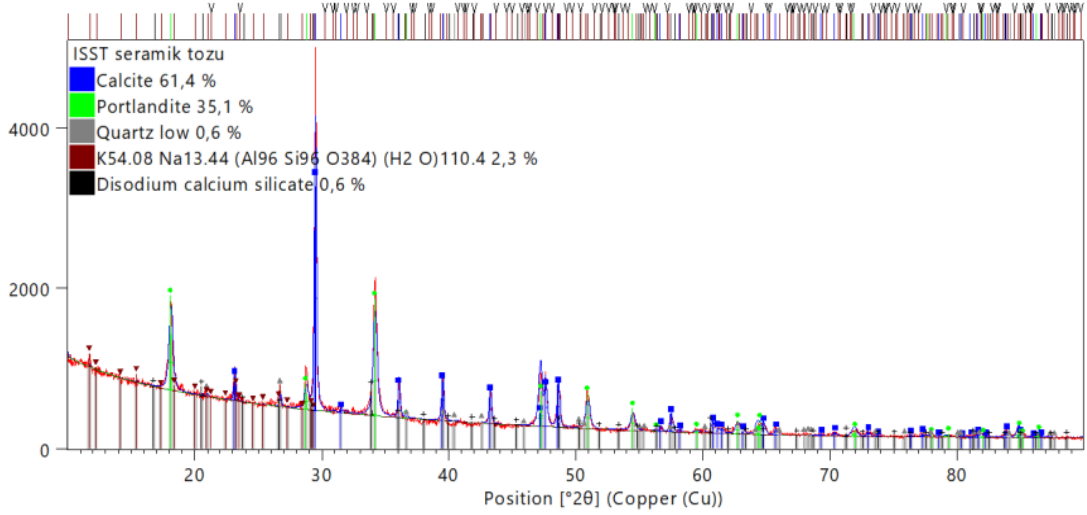
yapısını oluşturan fazlar ve faz oranları tespit edilebilir. Bilindiği gibi, malzeme içindeki faz çeşitliliği ve faz oranları malzemenin mekanik özelliklerini doğrudan etkilemektedir. Bundan dolayı, bu tez çalışmasında üretilen referans harç numunesi ile %15 MT, ST ve TT katkılı NHL bazlı harç numuneleri XRD ile analiz edilmiştir.



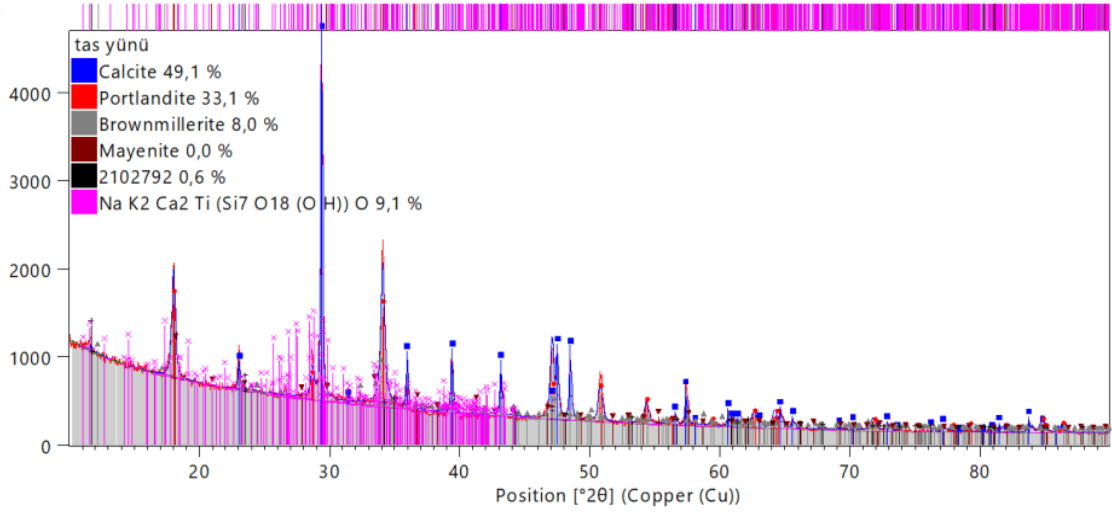
Şekil 0.9. Referans harç numunesi XRD grafiği



Şekil 0.10. %15 Atık mermer tozu ilaveli harç numunesi XRD grafiği



Şekil 0.11. %15 Atık seramik tozu ilaveli harç numunesi XRD grafiği



Şekil 0.12. %15 Atık taş yünü tozu ilaveli harç numunesi XRD grafiği

Elde edilen XRD sonuçları ve mekanik mukavemet verileri, referans numune ile %15 mermer tozu, %15 seramik tozu ve %15 taş yünü tozu katkılı numuneler üzerinden değerlendirilmiştir. Şekil 4.9.'da görüldüğü üzere, referans numunede yüksek oranda kalsit (%67) ve portlandit (%27,9) tespit edilmiştir; bu durum, doğal hidrolik kirecin tipik karbonatlaşma ve hidratasyon süreçlerini yansıtmaktadır. Şekil 4.10.'da gösterilen %15 mermer tozu katkılı numunede kalsit oranı %73,3'e yükselirken portlandit %23,7'ye gerilemiştir. Bu bulgu, mermer tozunun yüksek karbonat içeren inert bir dolgu malzemesi olduğunu, portlandit miktarındaki azalma nedeniyle bağlayıcı reaksiyonların sınırlandırılarak mekanik dayanımda düşüşe yol açtığını ortaya koymaktadır. Şekil 4.11.'de verilen %15 seramik tozu katkılı numunede portlandit oranı %35,1'e yükselmiş, buna karşılık kalsit %61,4'e düşmüştür; bu durum, seramik tozunun pozolanik reaksiyonları aktive ederek bağlayıcı dayanımı desteklediğini göstermektedir. Şekil 4.12.'de sunulan %15 taş yünü

tozu katkılı numunede ise kalsit oranı %49,1'e gerilemiş, portlandit %33,1 seviyesinde korunmuş ve katkı malzemesinin mineralojik yapısından kaynaklanan brownmillerite ile kompleks silikat-oksit fazları tespit edilmiştir. Bu faz yapısı, taş yünü tozunun kimyasal reaktivitesi sınırlı olmakla birlikte, mineralojik katkılar ve fiziksel etkiler aracılığıyla bağlayıcılığı desteklediğini göstermektedir. Bilindiği üzere, kalsit diğer oksit fazlarına göre nispeten daha yumuşak bir mineraldir. Bu fazın malzeme içerisinde azalması ve yerine daha sert fazların geçmesi, malzemenin mekanik özelliklerini iyileştirebilir. Portlandit ise hekzagonal kristal sistemine sahip olup, özellikle çimento ve beton bilimi için önemlidir; yumuşak bir mineraldir. Kalsit fazının etkilerinde olduğu gibi, portlandit fazının azalması ve yerine daha sert fazların geçmesi de malzemenin mekanik özelliklerini olumlu yönde etkiler. Elde edilen XRD kantitatif sonuçlarında da görüldüğü gibi (Şekil 4.9, 4.10, 4.11 ve 4.12), üretilen malzeme içerisinde kalsit ve portlandit oranları değişmiştir. %15 MT katkılı NHL bazlı harçta kalsit oranı referans numuneye göre artarken, ST ve TT katkılı NHL bazlı harçlarda oldukça azalmıştır. Üretilen harç numunelerinde kalsit ve portlandit arasındaki bu değişimler, MT katkılı harçlarda basınç ve eğilme dayanımı değerlerini referans numuneye göre azalttığını; ST ve TT katkılı harç numunelerinde ise artırdığını gösterir.

4.3. Yayılma Analiz Sonuçları

Çizelge 4.1'de yer alan veriler ve elek analizi sonuçları doğrultusunda, farklı atık malzeme katkılarının (mermer tozu, taş yünü tozu ve seramik tozu) NHL 3,5 bazlı harç numunelerinin yayılma performansı incelenmiştir. Katkısız referans numune, 130 mm yayılma değeri ile harcın temel akıcılık kapasitesini göstermektedir. Deney sonuçları, atık katkıların tümünün harç yayılmasını artırıcı yönde etkili olduğunu ortaya koyarken, bu artışın yalnızca katkı türüne değil, aynı zamanda malzemelerin tane boyutu dağılımına ve morfolojik özelliklerine de bağlı olduğu anlaşılmaktadır.

Çizelge 0.1. Atık türü ve oranına göre yayılma değerleri

Atık Malzeme Türü	Kullanım Oranı (%)	Yayılma (mm)
Referans	0	130
Mermer Tozu	5	138
	10	160
	15	165
Taş Yünü Tozu	5	145
	10	172
	15	200
Seramik Tozu	5	160
	10	163
	15	170

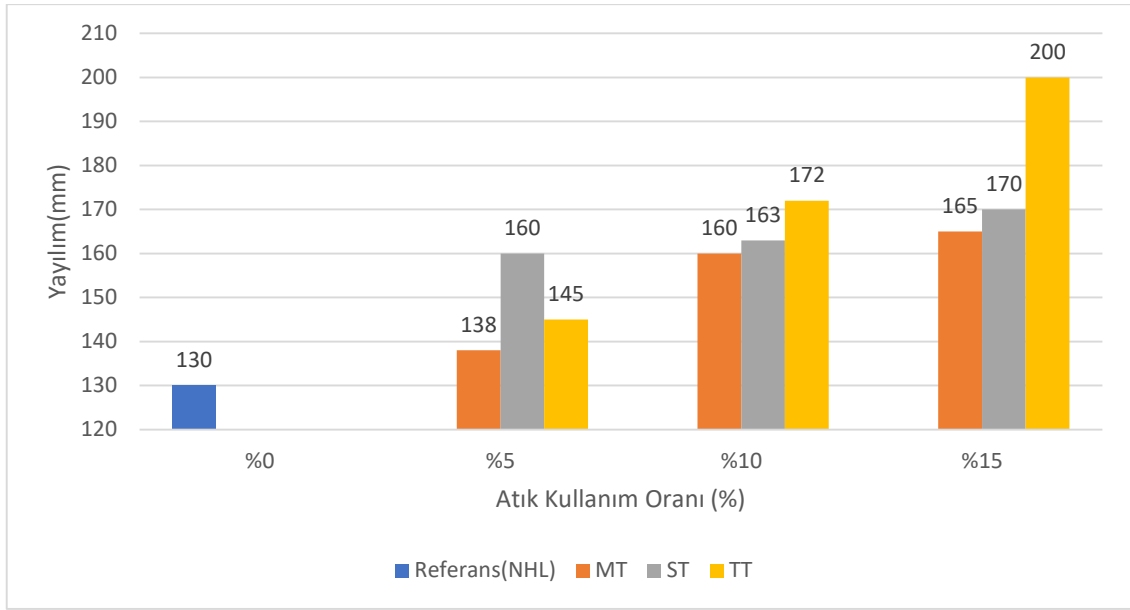
Elek analizine göre, NHL ince ve homojen bir yapıya sahip olup, yaklaşık %90,59'u 45 mikron altındaki tanelerden oluşmaktadır. Bu ince yapı, harçlarda sıkı ve homojen bir doku oluşmasına katkı sağlar. Mermer tozu, NHL'ye kıyasla biraz daha kaba bir dağılım sunmakla birlikte, oldukça ince partiküllerden oluşur (%70,93 <45 μ m). Seramik tozu, %85,95 oranında 45 mikron altı taneleri ile en ince malzeme olarak dikkat çekmektedir. Taş yünü tozu ise %49,06 oranında 45 mikron altı taneler içerir; daha iri ve lifsi yapısı nedeniyle heterojen bir dağılım gösterir. Bu farklı tane boyutu dağılımları, harç içindeki suyun hareketliliği, dolgu kapasitesi ve kimyasal reaksiyon yüzeyi üzerinde belirleyici rol oynamaktadır. İnce taneler, daha yüksek yüzey alanı sağlayarak suyu daha hızlı bünyeye çeker ve yayılmayı etkilerken; iri ve lifsi taneler harç içinde boşlukları doldurarak hacimsel stabiliteyi artırabilir ancak reaktif yüzey alanı daha düşüktür.

Mermer tozu katkısı ile ölçülen yayılma değerleri, %5 oranında 138 mm, %10 oranında 160 mm ve %15 oranında 165 mm olarak belirlenmiştir. Mermer tozunun nispeten ince fakat NHL'ye kıyasla biraz daha kaba yapısı, suyun hareketini sınırlamakta ve yayılma artışını orta seviyede tutmaktadır. Bununla birlikte, mermer tozu, suyun harç içinde homojen dağılmasına katkı sağlayarak özellikle düşük ve orta katkı oranlarında akıcılığı artırmaktadır. %10'dan %15'e geçişte artışın sınırlı olması, katkının doygunluk noktasına ulaştığını göstermektedir.

Seramik tozu katkısı ile elde edilen yayılma değerleri ise %5 oranında 160 mm, %10 oranında 163 mm ve %15 oranında 170 mm olarak ölçülmüştür. Seramik tozu, ince ve homojen taneli yapısı sayesinde suyun harç içerisindeki dağılımını kolaylaştırmakta ve düşük katkı oranlarında yüksek yayılma sağlamaktadır. Ancak katkı oranı arttıkça yayılmadaki artış sınırlı kalmaktadır; bu durum, ince tanelerin erken doygunluk noktasına ulaşması ve suyun hızlı şekilde bünyeye çekilmesinden kaynaklanmaktadır.

Taş yünü tozu katkısı ile ölçülen yayılma değerleri, %5 oranında 145 mm, %10 oranında 172 mm ve %15 oranında 200 mm olarak belirlenmiştir. Taş yünü tozu, lifli ve iri taneli yapısı sayesinde harç içerisindeki suyun hareketliliğini artırmakta ve yüksek yayılma değerleri göstermektedir. Ancak yüksek yayılmanın yalnızca katkının lifli ve gözenekli yapısından kaynaklanmadığı; iri ve heterojen tane boyutu dağılımının da bu değeri etkilediği anlaşılmaktadır.

Elek analizi ve yayılma verileri bir arada değerlendirildiğinde, yayılma performansının sadece katkı türüne bağlı olmadığı, malzemenin tane boyutu dağılımı ve morfolojik özelliklerinin de belirleyici olduğu görülmektedir. Mermer tozu katkısında yayılma artışı sınırlı kalırken, seramik tozu ince taneli yapısı sayesinde düşük oranlarda yüksek yayılma sağlamaktadır. Taş yünü tozu ise iri ve lifsi taneli yapısı ile en yüksek yayılma değerlerini sunmakta, ancak bu etkinin bir kısmı tane boyutundan kaynaklanmaktadır. Bu bulgular, atık katkı malzemelerinin harçlardaki akıcılık ve işlenebilirliğini değerlendirirken hem katkı türü hem de tane boyutu dağılımının dikkate alınmasının önemini ortaya koymaktadır.



Şekil 0.13. Atık kullanım oranlarına göre yayılma(mm)

4.4. Kapiler Su Emme Analiz Sonuçları

Çizelge 0.2. Numunelere göre su alma miktarları ve kapiler su emme kapasitesi (10 dk., 90 dk., 24 saat)

Numune	10 dk. su alma (g)	10 dk. Kapiler Su Emme (kg/m ² ·min ^{0.5})	90 dk. su alma (g)	90 dk. Kapiler Su Emme (kg/m ² ·min ^{0.5})	24 saat su alma (g)	24 saat Kapiler Su Emme (kg/m ² ·min ^{0.5})
Ref (NHL3,5)	31	24,60	71	18,73	115	8,51
%5MT	32	25,39	71	18,73	112	8,29
%10MT	32	25,39	74	19,52	113	8,37
%15MT	34	26,98	79	20,84	111	8,22
%5ST	32	25,39	78	20,58	118	8,74
%10ST	31	24,60	74	19,52	116	8,59
%15ST	31	24,60	71	18,73	114	8,44
%5TT	35	27,77	82	21,63	113	8,37
%10TT	38	30,15	81	21,37	113	8,37
%15TT	38	30,15	81	21,37	114	8,44

Çizelge 4.2’de hidrolik kireç (NHL) esaslı harçlara %5, %10 ve %15 oranlarında mermer tozu (MT), seramik tozu (ST) ve taş yünü tozu (TT) eklenerek hazırlanan harçların 10 dakika, 90 dakika ve 24 saatlik su emme davranışları incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar, katkı malzemelerinin hem toplam su alma miktarları hem de kapiler su

emme katsayıları ışığında incelendiğinde, katkı malzemelerinin harçların su alma kapasitesini zaman ve katkı oranına bağlı olarak önemli ölçüde etkilediği görülmektedir.

Referans numuneye (NHL) kıyasla, mermer tozu (MT) katkısı ile hazırlanan harçlarda 10 dakikalık kısa vadeli su emme miktarlarında hafif bir artış gözlemlenmiştir. 10. dakikada referans numune 31 g su alırken kapiler su emme katsayısı $24,60 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{min}^{0.5})$ olarak ölçülmüştür; buna karşın MT katkılı harçlarda 10 dakikalık su alma miktarı %5 ve %10 katkı için 32 g, kapiler katsayı $25,39 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{min}^{0.5})$, %15 katkı için 34 g ve $26,98 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{min}^{0.5})$ olarak belirlenmiştir. Bu durum, mermer tozunun harca başlangıçta suyu daha hızlı çekebilen bir yapı kazandırdığını göstermektedir. Orta vadede (90 dk) su emme miktarları da benzer bir eğilim sergilemiş; referans numune 71 g su alırken kapiler katsayısı $18,73 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{min}^{0.5})$ iken, %15 MT katkılı harçta su emme miktarı 79 g ve kapiler katsayısı $20,84 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{min}^{0.5})$ ile en yüksek seviyeye ulaşmıştır. Buna karşın, 24 saatlik uzun vadeli su emme verileri, MT katkısının yüksek oranlarda harcın toplam su alma kapasitesini sınırlayabileceğini göstermektedir; referans harç 115 g ve $8,51 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{min}^{0.5})$ değerlerine ulaşırken, %15 MT katkılı harç 111 g ve $8,22 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{min}^{0.5})$ ile daha düşük seviyelerde su emmiştir. Bu bulgular, mermer tozunun başlangıçta geçirgenliği artırarak hızlı su alımına olanak tanıdığını, ancak zamanla gözenekleri doldurarak poroziteyi azaltması ve uzun vadede su alma kapasitesini sınırlandırmasıyla açıklanabilir.

Seramik tozu (ST) katkılı harçlar incelendiğinde, başlangıçta referans numuneye kıyasla yüksek su emme kapasitesi gösterdikleri gözlemlenmiştir. Özellikle %5 ST katkılı numunede 10 dakikada su emme miktarı 32 g ve kapiler su emme katsayısı $25,39 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{min}^{0.5})$ olarak ölçülmüştür; 90. dakikada su emme 78 g ve kapiler katsayı $20,58 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{min}^{0.5})$, 24 saat sonunda ise 118 g su ve $8,74 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{min}^{0.5})$ değerleri ile referansın (10 dk: 31 g, $24,60$; 90 dk: 71 g, $18,73$; 24 saat: 115 g, $8,51$) üzerinde kalmıştır. %10 ve %15 katkı oranlarında ise emme miktarları ve kapiler katsayılar kademeli olarak azalmış, %10 ST’de 10 dk 32 g ($25,39$), 90 dk 74 g ($19,52$), 24 saat 116 g ($8,59$); %15 ST’de 10 dk 31 g ($24,60$), 90 dk 71 g ($18,73$), 24 saat 114 g ($8,44$) olarak ölçülmüştür. Bu veriler, seramik tozunun özellikle düşük katkı oranlarında gözenek yapısını artırarak kısa vadede su emme kapasitesini belirgin şekilde yükselttiğini, ancak katkı oranı arttıkça bu etkinin sınırlı kaldığını göstermektedir. Seramik tozları yüksek özgül yüzeye ve mikroporoziteye sahip olduğundan kısa sürede suyu hızlıca çekebilmekte, fakat gözenekli yapı kireçle reaksiyona girerek zamanla daha sıkı bir yapı oluşturduğundan, 24 saatlik

verilerdeki göreceli düşüş bu etkiyi doğrulamaktadır. Sonuç olarak, ST katkısı başlangıçta kapiler su emme kapasitesini artırmakta, ancak sistem zamanla dengeye ulaşmaktadır.

Taş yünü tozu (TT) katkılı harçlar, özellikle kısa vadeli su emme değerlerinde referans numuneye kıyasla en yüksek artışları gösteren sistemler olmuştur. 10. dakikada %5 TT katkılı numune 35 g su alırken kapiler su emme katsayısı $27,77 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{min}^{0.5})$, %10 ve %15 TT katkılı numuneler ise 38 g ve $30,15 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{min}^{0.5})$ olarak ölçülmüştür; bu değerler, referans numunenin 31 g ve $24,60 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{min}^{0.5})$ değerlerinin üzerinde olup taş yünü tozunun harca başlangıçta yüksek geçirgenlik kazandırdığını göstermektedir. Orta vadede (90 dk) su emme miktarları %5 TT’de 82 g (21,63), %10–15 TT’de 81 g (21,37) aralığında ölçülmüş ve katkı oranı arttıkça ciddi bir artış gözlenmemiştir; bu da lifli yapının orta vadede su emme hızını stabilize ettiğini göstermektedir. Uzun vadede (24 saat) ise tüm TT katkılı numuneler 113–114 g ve kapiler su emme katsayıları $8,37\text{--}8,44 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{min}^{0.5})$ seviyelerinde referansa (115 g, 8,51) oldukça yakın değerler vermiştir. Bu bulgular, taş yünü tozunun yüksek lifsi yapısı sayesinde kısa sürede suyu hızlıca çekebildiğini, ancak zamanla doygunluğa ulaştığında su emme kapasitesinin sınırlı kaldığını ortaya koymaktadır. Ayrıca, TT katkısı harç içerisinde başlangıçta büyük ölçüde açık porozite kazandırmasına rağmen bu boşlukların hızla suyla dolup dengeye ulaşması, 24 saatlik nihai su emme miktarlarının referansa yakın olmasını açıklamaktadır. Dolayısıyla TT katkısı, başlangıçta kapiler su emme kapasitesini artırmakta, ancak bu geçirgenlik zamanla stabilize olmaktadır.

5.SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, NHL 3,5 esaslı restorasyon harçlarında bağlayıcı miktarı azaltılarak, atık mermer tozu, atık seramik tozu ve atık taş yünü tozunun farklı oranlarda (%5, %10, %15) mekanik ve fiziksel özellikler üzerindeki etkisi değerlendirilmiştir. Numunelere 7 ve 28 günlük yaşlarda hem ortam koşullarında hem de su küründe eğilme ve basınç dayanımı testleri uygulanmış; ayrıca yayılma özellikleri, kapiler su emme oranları ve %15 katkı içeren karışımlar için XRD analizleri gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar, katkı türüne ve miktarına bağlı olarak harçların performansında önemli farklılıklar olduğunu göstermiştir.

- Mekanik dayanım performansları değerlendirildiğinde; referans harçlar, tüm yaş ve koşullarda temel karşılaştırma verilerini sağlamıştır. Su küründe, ortam koşullarına kıyasla daha yüksek mekanik değerler elde edilmiştir. Bu, hidratasyon sürecinin nemli ortamda daha etkin ilerlediğini göstermiştir.
- Atık mermer tozu katkısı, hem 7 hem de 28 günlük numunelerde mekanik dayanımları olumsuz yönde etkilemiştir. Özellikle %15 katkı oranında ortam küründe en düşük dayanım değerleri gözlenmiştir. 28 günlük su küründe katkısız referans numune 0,70 MPa eğilme ve 1,94 MPa basınç dayanımı sergilerken, %15 mermer tozu katkısıyla bu değerler 0,50 MPa eğilme (%29 azalma) ve 0,98 MPa basınç dayanımı (%49 azalma) seviyesine gerilemiştir. Ortam küründe de benzer eğilim izlenmiş, %15 mermer tozu katkılı numune 0,27 MPa eğilme (%43 azalma) ve 0,67 MPa basınç dayanımı (%51 azalma) ile en düşük performansı göstermiştir. Bu olumsuzluk, mermer tozunun yüksek kalsiyum karbonat içeriği nedeniyle bağlayıcı reaksiyonları sınırlamasından kaynaklanmaktadır.
- Atık seramik tozu katkısı, özellikle %15 katkı oranında dayanımlar üzerinde olumlu etki göstermiştir. 28 günlük su küründe %15 seramik tozu katkılı numune 0,75 MPa eğilme (%7 artış) ve 2,47 MPa basınç dayanımı (%27 artış) ile en yüksek değerlere ulaşmıştır. Ortam küründe de benzer şekilde %15 katkı oranı 0,46 MPa eğilme (referansa göre %2 düşük) ve 1,64 MPa basınç dayanımı (%19 artış) sağlamıştır. Bu gelişim, seramik tozunun ince partikül yapısı ve pozolanik karakteri ile açıklanabilir; bu özellikler hidratasyon ürünlerini artırarak matrisin yoğunlaşmasına katkıda bulunmuştur.

- Atık taş yünü tozu katkısı, tüm katkı oranlarında en belirgin olumlu etkileri göstermiştir. 28 günlük su küründe %15 taş yünü katkılı numune 1,15 MPa eğilme (%64 artış) ve 2,91 MPa basınç dayanımı (%50 artış) ile en yüksek değerlere ulaşmıştır. Ortam küründe ise aynı katkı oranı 0,81 MPa eğilme (%72 artış) ve 1,73 MPa basınç dayanımı (%25 artış) sağlamıştır. Taş yününün mineralojik bileşimi ve lifsi yapısı, mikroçatlak ilerlemesini engelleyerek hem eğilme hem de basınç dayanımlarını artırmıştır.
- Kullanılan atıkların yayılım özellikleri incelendiğinde; seramik tozu, en ince taneli katkı olması nedeniyle harçların su tutma kapasitesini artırmış ve işlenebilirliği olumlu yönde etkilemiştir. Taş yünü tozu, daha kaba ve lifli yapısına rağmen, tüm katkılar arasında en yüksek yayılma (akışkanlık) değerini sağlamıştır. %15 katkı oranında 200 mm yayılma değeriyle, işlenebilirlik açısından büyük avantaj sunmuştur. Tane boyutu dağılımı nedeniyle mermer tozu katkısı akışkanlık etkisi zayıf kalmış, işlenebilirlik sınırlı düzeyde iyileşmiştir.
- Mermer tozu katkısı, başlangıçta kapiler su emme oranını artırmış ancak uzun vadede geçirgenliği azaltmıştır. Bunun nedeni, karbonat içeriğinin yüzeyi tıkalıyıcı etki oluşturmaktır. Seramik tozu, yüksek katkı oranlarında su emme kapasitesinde doygunluğa ulaşmıştır. İnce yapısı sayesinde başlangıçta suyu emmiş, fakat yapısal doygunluk sonrasında dengeye gelmiştir. Taş yünü tozu, ilk etapta suyu hızlı emmiş, ancak zamanla stabil bir su emme profili oluşturmuştur. Genel olarak, tüm katkı maddeleri başlangıçta su emme davranışını değiştirmiş olsa da, uzun vadede referans numuneye oldukça yakın su emme performansları sergilemiştir. Bu da, atık katkıların harcın su geçirgenliği açısından ciddi bir dezavantaj oluşturmadığını, hatta bazı durumlarda geçirgenliği düşürücü etkilerinin olabileceğini göstermektedir.
- Atık taş yünü tozu diğer katkı malzemelerine göre en yüksek kuru yoğunluğa sahip olup (1,537 g/cm³), bu da malzemenin mineralojik yapısının ve lifsi formunun etkisini göstermektedir. Atık mermer tozu ve atık seramik tozları yoğunluk bakımından birbirine yakındır, ancak tane boyutu dağılımındaki farklılıklar fiziksel performansları etkilemiştir.
- XRD bulguları ve mekanik dayanım sonuçları değerlendirildiğinde; mermer tozu katkısı karbonat içeriğini artırarak bağlayıcı reaksiyonları sınırlandırmış ve

mekanik dayanımı düşürmüştür. Seramik tozu katkısı portlandit içeriğini artırmış, pozolanik reaksiyonların aktif olduğunu göstermiştir. Taş yünü tozu katkısı kimyasal olarak düşük reaktivite göstermesine rağmen mineralojik yapısı sayesinde fiziksel dayanımı güçlendirmiştir.

- Taş yünü ve seramik tozları, tarihi yapıların onarımı ve koruma amaçlı harçlarda performans artırıcı katkı olarak değerlendirilebilir. Mermer tozu, ancak sınırlı oranlarda ve yapısal olmayan dolgu harçlarında önerilmektedir. Tüm katkı türleri, uzun vadede su geçirgenliği açısından referans harca yakın sonuçlar vermiş, bu da özellikle restorasyon harçlarında kullanım açısından önemli bir avantaj sağlamıştır.
- Bu çalışma sonucunda, inşaat sektöründe atıkların yeniden kullanımının sadece ekonomik değil, aynı zamanda çevresel ve teknik bakımdan da önemli kazanımlar sağladığını ortaya koymuştur. Bu bağlamda, atık malzemelerin bertaraf edilmeden önce inşaat sektöründe değerlendirilmesine yönelik yasal ve teknik altyapıların güçlendirilmesi, atık yönetimi stratejilerinde öncelikli hedeflerden biri olmalıdır.
- Atıkların yeniden kullanımı, doğal kaynak tüketimini azaltmakta ve çöp sahalarına giden atık miktarını düşürmektedir. Bu durum, çevresel sürdürülebilirliğin sağlanması, karbon ayak izinin azaltılması ve döngüsel ekonomiye katkı sağlanması açısından büyük önem taşımaktadır. Dolayısıyla, atık katkılı harçlar ve bağlayıcı sistemler, yeşil bina ve sürdürülebilir malzeme uygulamaları açısından stratejik öneme sahiptir. Bu atıkların değerlendirilmesi, hem çevresel açıdan atık bertarafı sorununa çözüm sunmakta hem de sürdürülebilir ve ekonomik yapı malzemeleri geliştirilmesine katkı sağlamaktadır.
- Mekanik performans ve işlenebilirlik açısından seramik tozu ve taş yünü tozunun düşük ve orta oranlarda (özellikle %5-%15 arası) kullanımı önerilmektedir. Mermer tozunun ise dayanım gerektiren uygulamalarda sınırlı veya alternatif katkılarla kombine edilerek kullanılması faydalı olacaktır.
- Farklı atık tozların karışımlarıyla oluşturulan hibrit katkıların mekanik, kimyasal ve fiziksel performans üzerindeki etkileri ileride araştırılabilir. Çalışmanın sürdürülebilir yapı malzemeleri üretimine katkısı açısından ekonomik ve çevresel değerlendirmeler yapılması, endüstriyel uygulamalar için önemli bir adım olacaktır.

- Yüksek yayılma (akışkanlık) değerlerinin mekanik dayanım üzerindeki etkisi detaylı incelenmeli; özellikle taş yünü tozu katkısının yüksek yayılma sağlarken uzun vadeli dayanım performansı optimize edilmelidir.
- Atık malzemelerin sürdürülebilir yapı malzemeleri üretimindeki kullanım potansiyeli ekonomik ve çevresel açılardan değerlendirilerek, endüstriyel ölçekte uygulanabilirlik araştırılmalıdır.
- Farklı ortam ve iklim koşullarında katkılı harçların dayanıklılık, karbonatlaşma, donma-çözülme gibi uzun dönem performans testleri yapılmalıdır.



KAYNAKLAR

- Abadou, Y., Ghrieb, A., Bustamante, R., & Faid, H. (2020). Optimization By Mixture Design Approach: Impact Of Marble And Ceramic Recycle On Properties Of Mortar Based On Air Lime. *Journal Of Engineering, Design And Technology*, 18(6), 1731-1747.
- Abbas, M. M., & Muntean, R. (2025). Marble Powder As A Sustainable Cement Replacement: A Review Of Mechanical Properties. *Sustainability* (2071-1050), 17(2).
- Ahunbay, Z., (1999), *Tarihi Çevre Koruma ve Restorasyon*, Yem Yayın, İstanbul.
- Akın, İ., & Göller, G. (2012). Vücutta Kullanılan Seramikler. *Tse Standart Ekonomik ve Teknik Dergi*, 51(598), 62-66.
- Aköz, F., (1989), *Teras Çatılardaki Çok Katlı Su Tutucu Tabakanın Servis Ömrünü Tahmin İçin Matematiksel Model Oluşturulması*, Doktora Tezi, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Akyurt Takır, D. (2022). Tarihi Yığma Yapıların Onarımında Kullanılan Enjeksiyon Yöntemi ve Hidrolik Kireç Esaslı Enjeksiyon Malzemelerinin (Grout) Performans Değerlendirilmesi (Yüksek Lisans Tezi). Yök Tez Merkezinden Edinilmiştir. (717965)
- Alghamdi, H., Shoukry, H., Mim, N. J., Khawaji, M., Abadel, A. A., & Farouk, M. (2024). Impact Of Waste Rockwool On The Performance Of LC3-Based Lightweight Mortar: A Promising Solution For Greener Construction. *Construction And Building Materials*, 443, 137805.
- Al-Jabri, K., & Shoukry, H. (2024, February). Sustainable Disposal Of Waste Rockwool In The Production Of Normal And Lightweight LC3-Based High-Performance Mortars. In *Proceedings Of The International Conference On Sustainability: Developments And Innovations* (Pp. 261-269). Singapore: Springer Nature Singapore.
- Alotaibi, J. G., Alajmi, A. E., Alsaed, T., Khalaf, J. A., & Yousif, B. F. (2024). On The Incorporation Of Waste Ceramic Powder Into Concrete. *Frontiers In Mechanical Engineering*, 10, 1469727.
- Altuncu, E., Esen, S.G. (2014). Ultra Yüksek Sıcaklığa Dayanıklı Seramik Malzemeler: Tantalyum Karbür (TaC), Havacılık Ve Uzay Teknolojileri Dergisi, 8(1):67-74
- Anon A, 2008, *Makine Teknolojisi, Mermer Blok Üretimi*, Millî Eğitim Bakanlığı, Mesleki Teknik Eğitim ve Öğretim Sisteminin Geliştirilmesi Projesi, Ankara, 50 S. Seramik, Plastik, Cam, Kâğıt, Yol Yapımı, Beton Karışımında Üretiminde Kullanılmaktadır

- Arslanhan, M. (2016). Çimento Üretim Proseslerinde Eritiş Metoduyla Hazırlanmış Numunelerin Wdxf Analizleri ve Hata Etkilerinin İncelenmesi (Yüksek Lisans Tezi, Bursa Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü).
- Ashurst, J. (2003). Mortars, Plasters And Renders In Conservation (Second Edition). London: Ecclesiastical Architects And Surveyors Association Press.
- Atkuri, V. K., & Rao, G. R. (2021). Strength Properties Of Ceramic Waste Concrete. In IOP Conference Series: Materials Science And Engineering (Vol. 1025, No. 1, P. 012017). IOP Publishing.
- Basaran, B., Kalkan, I., Aksoylu, C., Özkılıç, Y. O., & Sabri, M. M. S. (2022). Effects Of Waste Powder, Fine And Coarse Marble Aggregates On Concrete Compressive Strength. Sustainability, 14(21), 14388.
- Batur, A., 1999. Donatısız Yığma Binaların Yatay Yükler Altındaki Davranışı ve Bazı Ülkelerin Şartnamelerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Bayülke, N. 2001. Depremde Hasar Gören Yapıların Onarım ve Güçlendirilmesi, İnşaat Mühendisleri Odası İzmir Şubesi, İzmir.
- Bayülke, N. 2001. Depreme Dayanıklı Betonarme ve Yığma Yapı Tasarımı. İzmir İmo, İzmir.
- Beycioğlu, A., Basyiğit C. Ve Subası, S., 2008. “Endüstriyel Atıkların İnşaat Sektöründe Kullanımı ile Geri Kazanılması ve Çevresel Etkilerinin Azaltılması”, Çevre Sorunları Sempozyumu, Kocaeli, 14-17, Mayıs, 1387-1394.
- Bhavsar, J. K., & Panchal, V. (2022). Ceramic Waste Powder As A Partial Substitute Of Fly Ash For Geopolymer Concrete Cured At Ambient Temperature. Civil Engineering Journal, 8(7), 1369-1387.
- BILAL, M. A. M. (2019). Geopolimer Betonda Pirinç Kabuğu Külü Ve Atık Seramik Tozu Kullanımının Araştırılması. (Doctoral Dissertation, Kastamonu Üniversitesi).
- Bilal, M. A. M. (2019). Geopolimer Betonda Pirinç Kabuğu Külü ve Atık Seramik Tozu Kullanımının Araştırılması (Master's Thesis, Fen Bilimleri Enstitüsü).
- Bilgin, N., 2010. “Mermer Tozu Atıklarının Yapı Malzemesi Üretiminde Kullanımı”, Yüksek Lisans Tezi, Ytū Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul
- Bilgin, Ö., Koç, E., 2013. Mermer Madenciliğinde Çevresel Etkiler, Madencilik Türkiye Dergisi, Sayı 28, 68-79
- Borand, G. (2016). Gıda Ambalajı Olarak Kullanılan Bazı Polimer Malzemelerin X-Işını Floresan Spektroskopisinde Kantitatif Analiz Geliştirilmesine Yönelik Bir Çalışma (Yüksek Lisans Tezi, Bursa Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü).
- Bostancı, D. (2020). Sönmemiş ve Hidrolik Kireçle Zemin İyileştirilmesi ve Kütle Stabilizasyonu (Yüksek Lisans Tezi). Yök Tez Merkezinden Edinilmiştir.

- Boynton, R.S., 1980, Chemistry And Technology Of Lime And Limestone, 2nd Edition, John Wiley And Sons, Inc., New York.
- Böke H., Akkurt S., İpekoğlu B., Tarihi Yapılarda Kullanılan Horasan Harcı ve Sıvalarının Özellikleri, Yapı Dergisi, 2004, 269: 90-95.
- Bursa Teknik Üniversitesi. (n.d.). *Yoğunluk ölçümü deneyi* [Ders notu]. Erişim tarihi: 17 Eylül 2025, https://depo.btu.edu.tr/dosyalar/metalurji/dosyalar/yogunluk_olcumu_deneyi.pdf
- Ceylan, H. Mança, S. (2013). Mermer Parça Atıklarının Beton Agregası Olarak Değerlendirilmesi. S D U Teknik Bilim Dergisi,3(2),21-25
- Cheng, A., Lin, W. T., & Huang, R. (2011). Application Of Rock Wool Waste İn Cement-Based Composites. Materials & Design, 32(2), 636-642.
- Chokkalingam, P., El-Hassan, H., El-Dieb, A., & El-Mir, A. (2022). Development And Characterization Of Ceramic Waste Powder-Slag Blended Geopolymer Concrete Designed Using Taguchi Method. Construction And Building Materials, 349, 128744.)
- Çakı, M. (1999). Neolitik Dönemden İlk Çağa Seramiğin Kültürel Bir Nesne Olarak İnsan Yaşamındaki Yeri (Yayımlanmamış Sanatta Yeterlik Tezi). Anadolu Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü.
- Çamlıbel, N. 2000. Yapıların Taşıma Gücünün İyileştirilmesi, İstanbul
- Çizer, Ö. Böke, H. Ve İpekoğlu, B. (2004). Bazı Osmanlı Dönemi Hamam Yapılarının Kubbe ve Duvarlarında Kullanılan Kireç Harçların Özellikleri.
- D. Akyurt Takır, “Tarihi Yığma Yapıların Onarımında Kullanılan Enjeksiyon Yöntemi ve Hidrolik Kireç Esaslı Enjeksiyon Malzemelerinin (Grout) Performans Değerlendirilmesi,” 2022.
- D. E. Akbulut, “Tarihi Yapıların Onarımında Kullanılacak Harçların Seçimine Yönelik Bir Öneri,” Doktora Tezi. Yıldız Teknik Üniversitesi. Fen Bilimleri Enstitüsü, 2006.
- Dal, M. Ve Öcal, A. D. (2017). Mardin Şehrindeki Taştan Yapılmış Eserlerde Görülen Bozunmalar. Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 19(1), 60-74.
- Darfoun, R. M. S. M. (2024). Atık Seramik Tozunun Çevre Dostu, Pirinç Kabuğu Külü Esaslı Tuğla Üretiminde Kullanılabilirliği (Master's Thesis, Kırşehir Ahi Evran University (Turkey)).
- Dariz P., Schmid T., Ferruginous Phases İn 19th Century Lime And Cement Mortars: A Raman Microspectroscopic Study, Materials Characterization, 2017, 129: 9-17. Doi: 10.1016/J.Matchar.2017.04.009

- Debes, G. (1949). Kagit Beton Betonarme, Çev.Akil Muhtar Şuvak, İtü Matbaası, İstanbul.
- Demir, D., “Mermer Tozunun Kullanım Alanları”, Bk.Aku.Edu.Tr.
- Demir, T., & Alyamaç, K. E. (2022). Investigation Of The Use Of Marble Powder İn Production Of High Strength Concretes. Open Journal Of Nano, 7(1), 18-25.
- Demiral, N. A. Z. I. M., Özodabaş, A. Y. L. İ. N., Orak, B., & Tilafşunlu, M. Atık Seramik Tozlarının Çimento Harcı Yapımında Kullanılması.
- Dpt, (2001). Sekizinci Beş Yıllık Kalkınma Planı, Ankara.
- Dpt, “Madencilik Özel İhtisas Komisyonu Raporu”, 2001.
- El-Dieb, A. S., Taha, M. R., & Abu-Eishah, S. I. (2018). The Use Of Ceramic Waste Powder (Cwp) İn Making Eco-Friendly Concretes. In Ceramic Materials-Synthesis, Characterization, Applications And Recycling. Intechopen.
- El-Mandouh, M. A., Hu, J. W., Mohamed, A. S., & Abd El-Maula, A. S. (2022). Assessment Of Waste Marble Powder On The Mechanical Properties Of High-Strength Concrete And Evaluation Of İts Shear Strength. Materials, 15(20), 7125.
- Erdoğan, S. T. Ve Erdoğan, T.Y. (2007). Bağlayıcı Malzemelerin ve Betonun Onbin Yıllık Tarihi (1.Baskı.). Ankara: Metu Press Publishing.
- Erdoğan, T. (2009). Materials Of Construction (3rd Edition.). Ankara: Odtü Yayıncılık.
- Eren, E. (2019). Yüksek Performanslı Isı Yalıtım Malzemesi Olan Vakum Yalıtım Panellerinin Bina Uygulamaları İçin Kullanımının Karşılaştırmalı Olarak İncelenmesi (Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü). İstanbul Teknik Üniversitesi.
- Eren, M. (2019). Atık Mermer Tozu ve Lastik Agrega Kullanılarak Üretilmiş Çevre Dostu Betonların Dayanım ve Dayanıklılık Özelliklerinin Belirlenmesi (Doktora Tezi). Yök Tez Merkezinden Edinilmiştir. (618652)
- Eriç, M. (2010). Yapı Fiziği ve Malzemesi (3. Baskı.). İstanbul: Literatür Yayıncılık.
- Erkek D., Ve Özdemir S., 2011. “Mermer ve Traverten Sektörüne Küresel ve Bölgesel Yaklaşım”
- Erman, D. O. (2012). Türk Seramik Sanatının Gelişimi: Toprağın Ateşle Dansı. Acta Turcica, 4(1), 18-33.
- Ersen A. Sir Bernard Feilden 1919-2008 Koruma Mimarları İçin Anıt Bir Anı. Restorasyon ve Konservasyon Çalışmaları Dergisi. 2012; (9): 3-11.
- Eyckmans, E. (2016), Kültürel Miras Koruma Projelerinde Sivil Toplum Kuruluşları-Yerel Yönetim İlişkilerinin Değerlendirilmesi. Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi. İstanbul Kültür Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

- Ferrández, D., Yedra, E., Morón, C., Zaragoza, A., & Kosior-Kazberuk, M. (2022). Circular Building Process: Reuse Of Insulators From Construction And Demolition Waste To Produce Lime Mortars. *Buildings*, 12(2), 220.
- García-Ten, F. J., Quereda Vázquez, M. F., Gil Albalat, C., Chumillas Villalba, D., Zaera, V., & Segura Mestre, M. C. (2016). Life Ceram-Zero Waste In Ceramic Tile Manufacture. *Key Engineering Materials*, 663, 23-33.
- Gören, B. (2022). Gazbeton Isı Yalıtım Levhasının, Taş Yünü Isı Yalıtım Malzemesi ile Karşılaştırılarak, Bina Enerji Performansı ve Isınma Maliyetine Etkisinin İncelenmesi (Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Arel Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü).
- Görgülü, K., 1994. Bazı Mermer Ocaklarında (Isparta- Burdur- Sivas) İşletme Sistemlerinin İncelenmesi ve Öncelikli Kaya Madde/Kütle Özellikleri ile İlişkilendirilmesi Araştırmaları. C.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Y.L. Tez Sivas. 95 S.
- Griffin, I. (2005). Grouts For The Conservation Of Architectural Surfaces. Getty Conservation Institute, 5, 1-17.
- Gülan, L., Yıldız, S., & Keleştemur, O. (2016). Atık Mermer Tozu Ve Cam Lif Katkılı Betonun Mekanik Ve Fiziksel Özellikleri Üzerine Karbonatlaşmanın Etkisi. *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 28(2), 189-200.
- Gür, D. (2019). Tarihi Yapıların Onarımında Kullanılmak Üzere Puzolan Katkılı Hidrolik Kireç Esaslı Onarım Harcı Üretilme Olanaklarının Araştırılması (Yüksek Lisans Tezi). Yök Tez Merkezinden Edinilmiştir. (551385)
- Gürkan, E. (n.d.). *Elek analizi* [Ders notu]. Ondokuz Mayıs Üniversitesi. Erişim tarihi: 17 Eylül 2025, <https://avys.omu.edu.tr/storage/app/public/elif.gurkan/126417/elek-analizi.pdf>
- Hasol, D., “Ansiklopedik Mimarlık Sözlüğü”, Yem Yayınları, İstanbul, 296 (1988).
- Hedin, R. (1963). Plasticity Of Lime Mortars, National Lime Association
İla (International Lime Association), 2002. Lime And Limestone Statistics, Arlington,U.S.A.
- İmmib (İstanbul Maden ve Metaller İhracatçı Birliği), 25 Ekim 2023, <https://İmmib.Org.Tr/>
- Jambor, J. J. (1963). Relation Between Phase Composition, Overall Porosity And Strength Of Hardened Line Puzzolana Pastes. *Magazine Of Concrete Research*, 5, 131–142.
- Kalınçimen, G., Öztürk, A., Kaplan, G., & Yıldız, S. (2015). Seramik Atıklarının Çimento İkame Malzemesi Olarak Kullanılması ve Asit Dayanıklılığının İncelenmesi. *Kastamonu University Journal Of Engineering And Sciences*, 1(1), 9-16.

- Kalınçimen, G., Öztürk, A., Kaplan, G., & Yıldız, S. (2015). Seramik Atıklarının Çimento İkame Malzemesi Olarak Kullanılması Ve Asit Dayanıklılığının İncelenmesi. *Kastamonu University Journal Of Engineering And Sciences*, 1(1), 9-16.
- Karaesmen, E., 1996. Deprem ve Sonrası, Türkiye Mühendisler Birliği, Ankara.
- Kathirvel, P., Saraswathy, V., Karthik, S. P., & Sekar, A. S. S. (2013). Strength And Durability Properties Of Quaternary Cement Concrete Made With Fly Ash, Rice Husk Ash And Limestone Powder. *Arabian Journal For Science And Engineering*, 38, 589-598.
- Kınca, D. (2002). Adapting Buildings For Changing Uses Guidelines For Change Of Use Refurbishment. Taylor & Francis Group: London.
- Kısad (Kireç Sanayiciler Derneği), (2015-2019). Kireç ve Kireçtaşı Satış Raporları Kısım Z. A., Ve Kan Ö. D., 2011. "Elazığ Mermeri Sektörel Arştırması", Fırat Kalkınma Ajansı Raporu, Elazığ, Türkiye.
- Köktürk, U., 2002. "Endüstriyel Hammaddeler", Dokuz Eylül Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Yayını, Maden Mühendisliği Bölümü, İzmir.
- Kubiliute, R., Kaminskas, R., & Kazlauskaitė, A. (2018). Mineral Wool Production Waste As An Additive For Portland Cement. *Cement And Concrete Composites*, 88, 130-138.
- Kulaksız, S., 2007, Doğal Tağ (Mermer) Maden İşletmeciliği ve İşleme Teknolojileri, Ankara, 55-60.
- Kulaksız, S., Güney, M.A., Güngör, N., Büyükgenç, M., 2001. Madencilik Faaliyetleri Sonucu Topografik Yapısı Bozulan Alanların Doğaya Yeniden Kazandırılmasına Yönelik Uygulamalar Hakkında Rapor ve Öneriler, 39., Ankara. (Yayınlanmamış).
- Kun, N., (2000), Mermer Jeolojisi ve Teknolojisi, (1.Baskı), İzmir.
- Kun, N., 2013. Mermer Jeolojisi ve Teknolojisi (Genişletilmiş 2. Baskı), İzmir.
- Kurugöl, S., "Eski Mimarilerde Kullanılmış Olan Kireç Harçlarının Genel Özellikleri", Yapı Dünyası, 19-24 (2006)
- Lasseguette, E., Burns, S., Simmons, D., Francis, E., Chai, H. K., Koutsos, V., & Huang, Y. (2019). Chemical, Microstructural And Mechanical Properties Of Ceramic Waste Blended Cementitious Systems. *Journal Of Cleaner Production*, 211, 1228-1238.
- Lin, W. T., Han, T. Y., Huang, C. C., Cheng, A., & Huang, R. (2012). Using Rock Wool Wastes As Partial Replacement Of Cement In Cement-Based Composites. *Advanced Science Letters*, 8(1), 489-494.

- Loh, W. Y. (2011). Classification And Regression Trees. Wiley İnterdisciplinary Reviews: Data Mining And Knowledge Discovery, 1(1), 14-23.9
- M. Başpınar, G. Görhan ve E. Kahraman, «Mermer Tozu ve Atıklarının Kullanım Alanlarının Araştırılması,» 6. Mermer Ve Doğaltaş Sempozyumu, 2008
- Marras, G.; Careddu, N.; Internicola, C.; Siotto, G. (N.D.). Recovery And Reuse Of Marble Powder By-Product
- Marvila, M. T., Alexandre, J., De Azevedo, A. R., & Zanelato, E. B. (2019). Evaluation Of The Use Of Marble Waste İn Hydrated Lime Cement Mortar Based. Journal Of Material Cycles And Waste Management, 21(5), 1250-1261.
- Mavi, Ö. (2000). Kireç Harç ve Sıvalarının Fiziksel ve Mekanik Özelliklerinin İyileştirilmesi. (Yüksek Lisans Tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Mcclellan, G., Eades, J., 1970, The Texture Evolution Of Limestone Calcines. Astm Special Technical Publication 472 (S. 209-227), American Society For Testing And Materials, Philadelphia.
- Medeiros, M. G., Nadaleti, W. C., Rocha, J. C., Cheriaf, M., Gleise, P. J. P., & De Castilhos Jr, A. B. (2021). A Cleaner Material Production By The Incorporation Of The Rockwool Waste Into Portland Cement Matrices. Journal Of Cleaner Production, 293, 126059.
- Morehead, D., R., 1986, Cementation Of Hydrated Lime, Cement And Concrete Research, 16, 700-708.
- O. Şimşek, Yapı Malzemesi Iı, Ankara: Beta, 2001.
- Oktay, D. Uğuryol, M. Güner, M.B. Hazar Yoruç, A.B. Ve Yüzer, N. (2020). Tarihi Binaların Sağlamlaştırılması İçin Killi Kireçtaşıdan Üretilen Enjeksiyon Malzemesinin Karakterizasyonu. Journal Of The Faculty Of Engineering And Architecture Of Gazi University, 3(53) ,1387-1397
- Okumuş, H. (2008). Seramik Tasarım ve Üretiminde Sağlık Açısından Alınması Gereken Önlemler, Sanatta Yeterlik Tezi, Marmara Üniversitesi Güzel Sanatlar Enstitüsü, İstanbul.
- Özsaraç, S. 2008. Yığma Yapılarda Taşıyıcı Tuğla Duvarların Gfrp ile Güçlendirilmesinin Deneysel Olarak İncelenmesi, M.S., İtü, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Anabilim Dalı Yapı Mühendisliği Programı, İstanbul.
- Öztürk B., 2006. “Mermer Sanayisindeki Eşletmelerin Üretim ve Pazarlama Sorunlarının Araştırılması”, Yüksek Lisans Tezi, Muğla Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü, Muğla.
- Pacheco-Torgal, F., & Jalali, S. (2011). Retracted Article: Compressive Strength And Durability Properties Of Ceramic Wastes Based Concrete. Materials And Structures, 44(1), 155-167.

- Pavia, S., Treacy, E., 2006, A Comparative Study Of The Durability And Behaviour Of Fat Lime And Feebly-Hydraulic Lime Mortars. *Materials And Structures* (39), 391-398.
- Penteado, C. S. G., De Carvalho, E. V., & Lintz, R. C. C. (2016). Reusing Ceramic Tile Polishing Waste In Paving Block Manufacturing. *Journal Of Cleaner Production*, 112, 514-520.
- Resuloğlu, S. (2005). Koruma Olgusu ve Kültür Ve Tabiat Varlıklarını Koruma Kurullarının Yaklaşımları. Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi. Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.
- Sanayi Genel Müdürlüğü. (2023). Seramik Sektör Raporu 2022. T.C. Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı.
- Saral, G., Yiğit, A., 2010. Mermer Ocak, Fabrika Tesis Tasarımı ve Bilgisayar Destekli Ocak Maliyet Analizi. Dokuz Eylül Üniversitesi Maden Mühendisliği Bölümü, Bitirme Tezi, 35s, İzmir.
- Science Learning Hub. (N.D.). What Are Ceramics? Science Learning Hub. (3 Haziran 2025) <https://www.sciencelearn.org.nz/resources/1769-what-are-ceramics>
- Seabra M., Paiva H., Labrincha J. And Ferreira V., Admixtures Effect On Fresh State Properties Of Aerial Lime Based Mortars, *Construction And Building Materials*, 2009, 23(2): 1147-1153. Doi: 10.1016/J.Conbuildmat.2008.06.008
- Sentürk, A., Gündüz, L., Tosun, İ.T., Sarımsık, A., 1996. “Mermer Teknolojisi”, Süleyman Demirel Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Maden Mühendisliği Bölümü, 242s.
- Stanmore B., Gilot P., Review-Calcination And Carbonation Of Limestone During Thermal Cycling For Co2 Sequestration, *Fuel Processing Technology*, 86 (16), 1707-1743, 2005.
- Subaşı, S., Öztürk, H., & Emiroğlu, M. (2017). Utilizing Of Waste Ceramic Powders As Filler Material In Self-Consolidating Concrete. *Construction And Building Materials*, 149, 567-574.
- Şenol, A. F., & Karakurt, C. (2023). Atık Mermer Tozunun Çimento Harçlarının Dayanım Özelliklerine Etkisi. In 1st International Conference On Frontiers In Academic Research. ICFAR, Konya. Proceeding Book.
- Şimşek, N. (2021). Kenevir Lifi, Keçi Kılı ve Polipropilen Elyaf Katkılı Horasan Harcının Özelliklerinin Araştırılması (Yüksek Lisans Tezi). Yök Tez Merkezinden Edinilmiştir. (678652)
- T. Tetik, “Tarihi Yiğma Yapıların Deprem Performansı ve Güçlendirme Teknikleri,” Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2015

- Taki Güler Arş. Gör Ercan Polat Muğla Büyükşehir Belediyesi, E. (N.D.). Mermer Madenciliğinde Çevresel Yaklaşımlar
- Tanyıldızı, M. (2022). Capillarity Of Concrete Incorporating Waste Ceramic Powder. Muş Alparslan Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, 10(1), 925-930.
- The American Ceramic Society. (N.D.). Brief History Of Ceramics And Glass. Retrieved June 3, 2025, From <https://Ceramics.Org/About/What-Are-Ceramics/A-Brief-History-Of-Ceramics-And-Glass/>
- Ts En 459-1. (2015). Yapı Kireci- Bölüm 1: Tarifler, Özellikler ve Uygunluk Kriterleri, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- Tummer (Türkiye Mermer ve Doğaltas Makine Ureticileri Birliği), “Mermer ve Doğaltas Atıklarının Ekonomiye Kazandırılması Toplantısı Raporu”, Ankara 1-3 (2013).
- Türk Standartları Enstitüsü. (2000). TS EN 1015-1: Kâgir harcı – Deney metotları – Bölüm 1: Tane büyüklüğü dağılımı tayini (elek analizi yoluyla). Ankara: TSE Yayınları.
- Türk Standartları Enstitüsü. (2000). Ts En 1015-11 Alçı ve Harçlar- Sertleşmiş Harçlar İçin Deney Metotları- Bölüm 11: Taze Harçtan Hazırlanan Harç Numuneleri Üzerinde Eğilme ve Basınç Dayanımı Tayini. Ankara: Tse Yayınları.
- Türk Standartları Enstitüsü. (2000). TS EN 1015-3: Kâgir harcı – Deney metotları – Bölüm 3: Taze harç kıvamının tayini (yayılma tablası ile). Ankara: TSE Yayınları.
- Türk Standartları Enstitüsü. (2002). TS EN 1015-18: Yapı harçları – Sertleşmiş harçlar için deney metotları – Bölüm 18: Kapiler su emme katsayısının tayini. Ankara: TSE Yayınları.
- Türkiye Iıı. Mermer Sempozyumu (Mersem '2001) Bildiriler Kitabı 3-5 Mayıs 2001 /Afyon.
- Uğurlu, E., 2005, Characterization Of Horasan Plasters From Some Ottoman Baths İn İzmir. Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi, İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü, İzmir.
- Uyanık, T., 2001. “Doğal Taşlar Dış Pazar Araştırması”, T.C. Başbakanlık Dış Ticaret Müsteşarlığı, İhracatı Geliştirme Etüt Merkezi Yayını, Ankara.
- Uygarlığın Köklerinden, Geleceğin Dünyasına: Mermer. (N.D.), From <http://Www.Hurriyet.Com.Tr/Paylas/Uygarligin-Koklerinden-Gelecegin-Dunyasina-Mermer-2188>, Accessed 18-12-2019
- Üstündağ, C., 2000. İki Katlı Yığma Binaların Yatay Yükler Altındaki Davranışı ve Kesme Güvenliliğinin Sağlanması, Yüksek Lisans Tezi, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Yeşilkaya, L., 1995. “Mermer Madenciliği, Afyon Kocatepe Üniv. Yay., Afyon, S.6.

- Yıldırım, B. (2021). Seramik Malzemenin Kullanım Alanları ve Ülkemizde “Seramik Üniversitesi” Kurulması Önerisi. Yeni Fikir Dergisi, 13(26), 18–34.
- Yıldız, S. Alişer, B. Ve Keleştemur, O. (2017). Atık Mermer Tozu ve Cam Lif Katkılı Çimento Harçlarının Sülfat Etkisi Altındaki Mekanik ve Fiziksel Özelliklerinin İncelenmesi. Fırat Üniv. Fen Bilimleri Dergisi, 29(2), 23-31.
- Zakar,L. (2018). Tarihi Binalara Ek Bina Tasarımında Yapısal Bütünleştirme Performansını Değerlendirmek İçin Bir Model Önerisi. Yayınlanmamış Doktora Tezi. Mimar Sinan Güzel Sanatlar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Zeng Makina & Mühendislik. (T.Y.). Taş Yünü Geri Dönüşüm Sistemi. <https://www.zengmuhendislik.com/tr/urunlerimiz/tas-yunu-geri-donusum-sistemi>.
- Zeren, M. T. (2010). Tarihi Çevrede Yeni Ek ve Yeni Yapı Olgusu. Yalın Yayıncılık, İstanbul.