
GAZİ ÜNİVERSİTESİ
Gazi
1926

TARİHİ YAPILARDA KULLANILAN HORASAN HARÇLARININ İNCELENMESİ VE ALTERNATİF HORASAN HARCININ ÜRETİLMESİ

Mustafa DAYI

DOKTORA TEZİ
YAPI EĞİTİMİ ANABİLİM DALI

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

TEMMUZ 2017

Mustafa DAYI tarafından hazırlanan "TARİHİ YAPILARDA KULLANILAN HORASAN HARÇLARININ İNCELENMESİ VE ALTERNATİF HORASAN HARCININ ÜRETİLMESİ" adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ ile Gazi Üniversitesi Yapı Eğitimi Anabilim Dalında DOKTORA TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Prof. Dr. H. Yılmaz ARUNTAŞ

İnşaat Mühendisliği, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum. .....

Başkan: Prof. Dr. İ. Özgür YAMAN

İnşaat Mühendisliği, Orta Doğu Teknik Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum. .....

Üye: Prof. Dr. Salih YAZICIOĞLU

İnşaat Mühendisliği, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum. .....

Üye: Prof. Dr. Mustafa ŞAHMARAN

İnşaat Mühendisliği, Hacettepe Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum. .....

Üye: Prof. Dr. İlhami DEMİR

İnşaat Mühendisliği, Kırıkkale Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum. .....

Üye: Yrd. Doç. Dr. Osman ŞİMŞEK

İnşaat Mühendisliği, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum. .....

Üye: Yrd. Doç. Dr. Kürşat YILDIZ

İnşaat Mühendisliği, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum. .....

Tez Savunma Tarihi: 21/07/2017

Jüri tarafından kabul edilen bu tezin Doktora Tezi olması için gerekli şartları yerine getirdiğini onaylıyorum.

.....

Prof. Dr. Hadi GÖKÇEN

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmasında;

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

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Mustafa DAYI
21/07/2017

TARİHİ YAPILARDA KULLANILAN HORASAN HARÇLARININ İNCELENMESİ VE ALTERNATİF HORASAN HARCININ ÜRETİLMESİ

(Doktora Tezi)

Mustafa DAYI

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Temmuz 2017

ÖZET

Türkiye'nin somut kültürel mirası arasında önemli bir yeri olan tarihi yapılar üzerinde, yakın zamana kadar bilimsel ve teknolojik incelemelere dayalı olmadan çok sayıda koruma ve onarım çalışmaları yapılmıştır. Bu nedenle, tarihi yapıda kullanılan özgün malzemelerin teknolojik ve başarım özellikleri hakkında yapılacak deney ve analizler sonucunda doğru bilgiler elde etmek, ilgili tarihi yapının koruma ve onarım çalışmalarında uygun onarım malzemelerinin kullanılması bakımından önemlidir. Tez çalışması üç aşamadan oluşmaktadır. İlk aşamada daha önce onarım çalışması yapılmamış olan yani özgünlüğünü koruyan 16. yüzyılda Osmanlılar tarafından inşa edilen İnegöl-Bursa'daki Sungurpaşa hamam yapısı seçilmiş ve bu yapının kubbelerinde kullanılan örgü harçlarından numuneler alınmıştır. Laboratuvar ortamına getirilen özgün harç numunelerinin teknolojik özellikleri tespit edilmiştir. Harç bileşimindeki ana hammaddelerin bağlayıcı olarak sönmüş kireç ve puzolan, agrega olarak da tane boyutu dağılımı uygun volkanik kökenli alüvyon kaynakların kullanıldığı anlaşılmıştır. Ayrıca özgün tuğla örgü harçlarının asitte çözünmeyen kısım ve petrografik inceleme sonucunda b/a oranlarının 1/1, 1/1,5 arasında değiştiği, tek eksenli basınç dayanımı, esneklik modülü ve çekme dayanımının yeterli seviyede olduğu görülmüştür. İkinci aşamada özgün harç numuneleri üzerinde yapılan deneylerden elde edilen sonuçlar ile aynı dönemde inşa edilmiş diğer tarihi yapı harçlarının özellikleri dikkate alınarak farklı bağlayıcı/agrega (b/a) oranında deneme harçları üretilmiştir. Üçüncü ve son aşamada, b/a oranı 1/1 ve 1/3 oranlarında alternatif onarım harç karışımları hazırlanmıştır. Deneysel çalışma kapsamında, bağlayıcı olarak yüksek kalsiyumlu sönmüş toz kireç, puzolanik malzeme olarak diyatomit ve geleneksel metotlarla üretilmiş tuğlaya ait tuğla tozu ile agrega olarak dere agregası kullanılmıştır. Üretilen 14 seri onarım harcının taze ve sertleşmiş durumdaki özellikleri farklı deneysel metotlarla tespit edilmiştir. Onarım harçları üzerinde kimyasal yöntemle karbonatlaşma deneyi ile XRD, SEM-EDS ve TGA-DTA analizleri yapılarak harçların teknolojik özellikleri de belirlenmiştir.

Bilim Kodu	:	91127
Anahtar Kelimeler	:	Tarihi yapı, Horasan harcı, kireç, diyatomit, tuğla tozu
Sayfa Adedi	:	127
Danışman	:	Prof. Dr. H. Yılmaz ARUNTAŞ

EXAMINATION OF THE KHORASAN MORTARS USED IN HISTORICAL BUILDINGS AND PRODUCTION OF ALTERNATIVE KHORASAN MORTAR

(Ph.D. Thesis)

Mustafa DAYI

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

July 2017

ABSTRACT

Recently, numerous conservation and repair works have been carried out on historical buildings which have an important place among the concrete cultural heritage of Turkey, but not based on scientific and technological studies. For this reason, it is important to obtain accurate information as a result of experiments and analyzes on the technological and performance characteristics of the original materials used in the historical building, regarding the use appropriate repair materials in the conservation and repair work of the relevant historical building. The thesis study consists of three stages. At the first stage, Sungurpaşa bath structure in İnegöl-Bursa, which was built by the Ottomans in the 16th century, have not been repaired before and preserved its originality, was selected and samples were taken from the masonry mortars used in the domes of this structure. The technological properties of the original mortar samples have been determined which were brought to the laboratory environment. It has been understood that the main raw materials in the mortar composition are composed of slaked lime and pozzolan as binders and alluvial sources of volcanic origin with suitable grain size distribution as aggregates. In addition, it has been found that the original brick mortars have sufficient uniaxial compressive strength, modulus of elasticity and tensile strength that the ratio of b/a is changed between 1/1 and 1/1,5 as a result of aseptic insoluble part and petrographic examination. In the second stage, test mortars were produced in different binders/ aggregates (b/a) taking into consideration the results obtained from the tests on the original mortar samples and the characteristics of the other historical building mortars constructed in the same period. In the third and last stage, alternative repair mortar mixtures were prepared with 1/1 and 1/3 b/a ratio. In the scope of experimental study, high calcium extruded powdered lime as binder, diatomite as pozzolanic material and brick dust of brick produced by conventional methods and stream aggregate as aggregate were used. The characteristics of the 14 series repair mortar produced in fresh and hardened condition were determined with different experimental methods. XRD, SEM-EDS and TGA-DTA analyzes were carried out on the repair mortars by chemical carbonation experiment and the technological properties of the mortars were determined.

Science Code : 91127

Key Words : Historical building, Khorasan mortar, lime, diatomite, brick powder

Page Number : 127

Supervisor : Prof. Dr. H. Yılmaz ARUNTAŞ

TEŞEKKÜR

Çalışmalarım süresince ilgisini ve desteğini esirgemeyen, bilgi ve tecrübeleriyle beni yönlendiren değerli danışman hocalarım Prof. Dr. H. Yılmaz ARUNTAŞ ve Prof. Dr. Emine N. Caner SALTIK'a, değerli katkıları ile tezimi yönlendiren ve çalışmalarımı teşvik eden Prof. Dr. İ. Özgür YAMAN ve Prof. Dr. Salih YAZICIOĞLU hocalarıma çok teşekkür ederim. ODTÜ Mimarlık Fakültesi Malzeme Koruma Laboratuvarında çalışmalarıma yardımcı olan ve beni yönlendiren Doç. Dr. Ayşe TAVUKÇUOĞLU, Yrd. Doç. Dr. Evin CANER ve Dr. Bilge Alp GÜNEY'e teşekkür ederim.

Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü asistanlarından Arş. Gör. Murat PINARLIK başta olmak üzere tüm asistan arkadaşlarıma, bölümümüz teknik personellerinden Tekniker Osman AYDIN'a ve diğer personel arkadaşlarıma teşekkür ederim. Çalışmamızı destekleyen Gazi Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri birimine ve yetkililerine, SEM-EDS ve diğer analizlerin yapıldığı MTA Mineraloji ve Petrografik Araştırmalar birimi koordinatörü Dr. Mustafa ALBAYRAK hocama, kimyasal analizler konusunda yardımlarını esirgemeyen Limak Ankara Çimento Fabrikası yetkilileri ile Kalite Kontrol laboratuvarı çalışanlarına ve TGA-DTA ile XRD analizleri konusunda yardımcı olan Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Malzeme ve Metalurji Mühendisliği Bölümü hocalarına teşekkür ederim.

Ayrıca meslek hayatım ve tez çalışmalarım boyunca her türlü desteği ve sabrı göstererek beni hiçbir zaman yalnız bırakmayan sevgili eşim, oğlum ve aileme çok çok teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET iv

ABSTRACT v

TEŞEKKÜR vi

İÇİNDEKİLER vii

ÇİZELGELERİN LİSTESİ ix

ŞEKİLLERİN LİSTESİ x

RESİMLERİN LİSTESİ xii

HARİTALARIN LİSTESİ. xiv

SİMGELER VE KISALTMALAR xv

1. GİRİŞ 1

2. KURAMSAL TEMELLER VE KAYNAK ARAŞTIRMASI 3

2.1. Bağlayıcı Malzemelerin Tarihsel Gelişimi 3

2.2. Tarihi Yapılarda Kullanılan Harçlar 4

2.2.1. Tarihi yapılarda kullanılan harçların hammadde özellikleri 5

2.3. Tarihi Yapı Harçlarının Özellikleri 15

2.3.1. Tarihi yapı harçlarında kullanılan tuğla ve kiremitlerin özellikleri 18

2.4. Tarihi Yapı Malzemelerinin Bozulma Nedenleri ve Sonuçları 19

2.5. Tarihi Yapılarda Onarım Harçları Üzerine Yapılan Çalışmalar……..…… 22

3. MATERYAL VE METOT 31

3.1. Tarihi Sungurpaşa Hamamı ve Özgün Örgü Harç Deneyleri 31

3.1.1. Tarihi Sungurpaşa hamamının yapım tekniği 32

3.1.2. Tarihi Sungurpaşa hamamından numune alınması ve kodlanması 35

3.1.3. Özgün örgü harç deneyleri 36

Sayfa

3.2. Alternatif Onarım Harcı Ön Deneme Karışımları…….. 45

3.3. Alternatif Onarım Harçları ve Deneysel Çalışma……..……... 46

3.3.1. Kullanılan malzemeler ve oranların belirlenmesi 46

3.3.2. Onarım harçlarının hazırlanması..... 57

3.3.3. Onarım harçları üzerinde yapılan deneyler 60

4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE DEĞERLENDİRME 69

4.1. Özgün Örgü Harçlarında Deneysel Verilerin Değerlendirilmesi..... 69

4.1.1. Fiziksel analizler……... 69

4.1.2. Fizikomekanik analizler…… 70

4.1.3. Asit kaybı ve elek analizi…….. 70

4.1.4. Tuz analizleri…… 72

4.1.5. Mikro yapı analizleri……. 72

4.2. Alternatif Onarım Harçlarına Ait Bulguların Değerlendirilmesi……..... 76

4.2.1. Taze onarım harçlarının birim hacim ağırlığı…… 76

4.2.2. Sertleşmiş onarım harçlarının fiziksel özellikleri…….. 77

4.2.3. Onarım harçlarının fizikomekanik özellikleri…… 86

4.2.4. Onarım harçlarının mikro yapı özellikleri……. 93

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER..…….. 111

5.1. Sonuçlar……..……. 111

5.1.1. Tarihi Sungurpaşa hamamı özgün örgü harçları ...…… 111

5.1.2. Alternatif onarım harçları……...…… 112

5.2. Öneriler……..……..... 114

KAYNAKLAR...……..... 115

ÖZGEÇMİŞ…...……... 127

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge **Sayfa**

Çizelge 2.1. Ravenna şehrindeki Tarihi S. Vitale yapısına ait harç agrega dağılımı 17

Çizelge 2.2. Tarihi yapıların harç ve sıvalarında meydana gelen hasarlar ve etkileri 21

Çizelge 2.3. Onarım harçlarının basınç ve eğilme dayanımları 26

Çizelge 3.1. Onarım harçlarının ağırlıkça karışım oranları, su/bağlayıcı (s/b) oranları ve yayılma deneyi sonuçları 47

Çizelge 3.2. Kireç ve puzolanların kimyasal ve fiziksel özellikleri..... 50

Çizelge 3.3. Puzolanik aktivite deney sonuçları 53

Çizelge 3.4. Elektriksel yöntemle puzolanik aktivitenin değerlendirilmesi 54

Çizelge 4.1. Özgün örgü harçlarının fiziksel özellikleri 70

Çizelge 4.2. Özgün örgü harçlarının nokta yükleme, ultra ses hızı ve E_{mod} sonuçları ... 70

Çizelge 4.3. Özgün örgü harçlarında kullanılan 4 mm üstü agrega boyutları 72

Çizelge 4.4. Özgün örgü harç numunelerinin tuz analizleri 72

Çizelge 4.5. Su buharı geçirimliliğine göre malzemelerin sınıflandırılması 83

Çizelge 4.6. K1 onarım harcı agrega ve bağlayıcı kısmı EDS1-2 analiz sonuçları..... 96

Çizelge 4.7. K1T1 onarım harcına ait EDS1-2 noktalarının analiz sonuçları..... 97

Çizelge 4.8. K1D1 onarım harcına ait EDS1-2 noktalarının analiz sonuçları 98

Çizelge 4.9. K3 onarım harcına ait EDS1-2 noktalarının analiz sonuçları 99

Çizelge 4.10. K3T2 onarım harcına ait EDS1-2 noktalarının analiz sonuçları..... 100

Çizelge 4.11. K3D2 onarım harcına ait EDS1-2 noktalarının analiz sonuçları 101

Çizelge 4.12. K1 grubu onarım harçlarına ait yüzdece ağırlık kayıpları 103

Çizelge 4.13. K3 grubu onarım harçlarına ait yüzdece ağırlık kayıpları 105

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil **Sayfa**

Şekil 2.1. Kireç harcının katılaşma ve sertleşme süreci 8

Şekil 2.2. Kireç harcı dış yüzeyinin karbonatlaşma derinliğine etkisi 9

Şekil 3.1. Sönmüş toz kirece ait TGA-DTA termogramı 48

Şekil 3.2. K, D, T ve agregaya ait X-ışınları difraktogramları 49

Şekil 3.3. Ankara/Kızılcahamam yöresi diyatomiti TGA-DTA termogramı 51

Şekil 3.4. Tuğla tozuna ait TGA-DTA termogramı 52

Şekil 3.5. Özgün harç ve onarım harcı agregası ile B8 agregalarının granülometri eğrileri 54

Şekil 3.6. Kahramankazan/Ovaçay yöresi dere agregasının TGA-DTA termogramı 55

Şekil 4.1. Özgün örgü harçlarının ağırlıkça b/a oranları 71

Şekil 4.2. Özgün örgü harçlarına ait asitte çözünmeyen kısmın (kum) elek analizi 71

Şekil 4.3. SIKH örgü harç numunesine ait XRD grafiği 75

Şekil 4.4. SSKH örgü harç numunesine ait XRD grafiği 75

Şekil 4.5. Taze onarım harçlarına ait birim hacim ağırlık grafiği 76

Şekil 4.6. Sertleşmiş onarım harçlarına ait birim hacim ağırlık grafiği 78

Şekil 4.7. Onarım harçlarına ait ağırlıkça su emme oranları 79

Şekil 4.8. Onarım harçlarına ait 28 ve 90 gün yaşlarında porozite oranları 81

Şekil 4.9. Onarım harçlarına ait 28 ve 90 gün yaşlarındaki SD sonuçları 82

Şekil 4.10. K1 grubu onarım harçlarına ait rötre grafiği 84

Şekil 4.11. K3 grubu onarım harçlarına ait rötre grafiği 85

Şekil 4.12. K1 grubu onarım harçlarının basınç dayanımı grafiği 86

Şekil 4.13. K3 grubu onarım harçlarının basınç dayanımı grafiği 87

Şekil 4.14. 90 gün yaştaki onarım harçlarının basınç dayanımı-E_{mod} grafiği 88

Şekil 4.15. K1 grubu onarım harçlarında fenolftalein uygulaması 90

Şekil **Sayfa**

Şekil 4.16. K3 grubu onarım harçlarında fenolftalein uygulaması 92

Şekil 4.17. K1 serisi 90 gün yaşlarındaki onarım harçlarına ait XRD grafiği 93

Şekil 4.18. K3 serisi 90 gün yaşlarındaki onarım harçlarına ait XRD grafiği 94

Şekil 4.19. K1T grubu onarım harçlarına ait TGA grafiği 103

Şekil 4.20. K1T grubu onarım harçlarına ait DTA grafiği 104

Şekil 4.21. K1D grubu onarım harçlarına ait TGA grafiği 104

Şekil 4.22. K1D grubu onarım harçlarına ait DTA grafiği 105

Şekil 4.23. K3T grubu onarım harçlarına ait TGA grafiği 106

Şekil 4.24. K3T grubu onarım harçlarına ait DTA grafiği 106

Şekil 4.25. K3D grubu onarım harçlarına ait TGA grafiği 107

Şekil 4.26. K3D grubu onarım harçlarına ait DTA grafiği 107

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim **Sayfa**

Resim 2.1. Tarihi bir yapının kubbesinde bitkilerin yapmış olduğu tahribat 19

Resim 2.2. Onarımında çimento kullanılmış bir yapı duvarında beyaz renkli tuz kristalleri oluşumu…… 20

Resim 2.3. Tarihi Ortaköy Kervansarayında kireç harçları ile yapılan onarım örneği... 23

Resim 3.1. Sungurpaşa hamamının genel görünümü 32

Resim 3.2. Sungurpaşa hamamı batı cephesi görünümü..... 32

Resim 3.3. Bursa/İnegöl/Sungurpaşa hamamı planı 33

Resim 3.4. Sungurpaşa hamamı ılıklık girişi ve sıcaklık girişi 34

Resim 3.5. Sungurpaşa hamamı ılıklık bölümü duvar ve tromp birleşimi..... 34

Resim 3.6. Sungurpaşa hamamı tüteklik ve kurna bölümü 34

Resim 3.7. Sungurpaşa hamamı sıcaklık kubbesinin iç ve dış görünümü 35

Resim 3.8. SIKH1 kodlu numune ve yapıdan alınan tuğlalı harç numunesi 36

Resim 3.9. Özgün örgü harç numunelerin etüvde kurutulması 37

Resim 3.10. Vakum aleti ve Arşimet terazisi..... 38

Resim 3.11. Tek nokta yükleme deney aleti 40

Resim 3.12. Seyreltik asitte bekletilen numunelerin filtrasyonu ve kurutulması 41

Resim 3.13. Agregaların eleklerden elenmesi ve sınıflandırılması..... 42

Resim 3.14. Mineralojik analizde kullanılan X-ışınları cihazı 44

Resim 3.15. SEM-EDS cihazı ve kontrol ünitesi..... 45

Resim 3.16. Sönmüş toz kirecin x1000 büyütmeli SEM-EDS görüntüsü 48

Resim 3.17. Diyatomitin x15 000 büyütmeli SEM-EDS görüntüsü 51

Resim 3.18. Tuğla tozunun x5000 büyütmeli SEM-EDS görüntüleri..... 52

Resim 3.19. Ovaçay agregasının x300 büyütmeli SEM ve EDS görüntüleri 56

Resim 3.20. Kahramankazan-Ovaçay dere agregası görsel granülometrisi..... 57

Resim **Sayfa**

Resim 3.21. Kazan-Ovaçay agregasının çeyrekleme metoduyla bölünmesi 58

Resim 3.22. Prizmatik çelik numune kalıpları ve harç mikseri 59

Resim 3.23. Onarım harçlarının çelik kalıplara yerleştirilmesi ve deney kalıp seti 59

Resim 3.24. Onarım harçları için özel üretilmiş olan kür kabini 60

Resim 3.25. Yayılma tablası deneyi ile taze harcın birim hacim ağırlık deneyi 61

Resim 3.26. Numunelerin suda bekletilmesi ve Arşimet terazisinde tartımı..... 62

Resim 3.27. Ön deneme harçları sırasında üretilen rötre kalıbı..... 63

Resim 3.28. Onarım harçlarının elektronik kumpas ile boyut ölçümü 63

Resim 3.29. Su buharı geçirimliliği deney numuneleri ve hassas terazi..... 64

Resim 3.30. Harçlar için tasarlanmış eğilme-basınç dayanım cihazı ve kontrol ünitesi 65

Resim 3.31. Fenolftalein yöntemi ile karbonatlaşmanın zamana göre değişimi 66

Resim 3.32. Termogravimetrik ölçümlerde kullanılan Hitachi marka TG-DTA cihazı 67

Resim 4.1. SIKH numunesine ait çift nikol görüntüsü..... 73

Resim 4.2. SSKH numunesine ait çift nikol görüntü 73

Resim 4.3. SIKH numunesine ait agreganın x100 büyütmeli SEM-EDS görüntüsü..... 74

Resim 4.4. SIKH harç numunesi x5000 büyütmeli SEM-EDS görüntüsü 74

Resim 4.5. K1 onarım harcı serisine ait x400 büyütme SEM ve EDS görüntüsü 96

Resim 4.6. K1T1 onarım harcı serisi x13 000 büyütmeli SEM ve EDS görüntüsü..... 97

Resim 4.7. K1D1 onarım harcı serisi x35 000 büyütmeli SEM ve EDS görüntüsü..... 98

Resim 4.8. K3 onarım harcı serisi x2 000 büyütmeli SEM ve EDS görüntüsü..... 99

Resim 4.9. K3T2 onarım harcı serisi x25 000 büyütme SEM ve EDS görüntüsü 100

Resim 4.10. K3D2 onarım harcı serisi x20 000 büyütme SEM ve EDS görüntüsü..... 101

HARİTALARIN LİSTESİ

Harita **Sayfa**

Harita 3.1. İnegöl/Sungurpaşa Köyü Uydu Fotoğrafı..... 31

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	**Açıklamalar**
$\mathbf{E_{mod}}$	Elastisite modülü
KHz	Kilohertz
SD	Su buharına eşdeğer hava kalınlığı
V	Ultrases geçiş hızı

Kısaltmalar	**Açıklamalar**
ASTM	American Standard of Testing Materials
B/A	Bağlayıcı/agrega
D	Diyatomit
ICCROM	International Centre for the Study of the Preservation and Restoration of Cultural Property
K1	b/a oranı 1/1 olan onarım harcı
K1D1	%10 D katkılı K1 grubu harç
K1T1	%10 T katkılı K1 grubu harç
K3	b/a oranı 1/3 olan onarım harcı
K3D1	%10 D katkılı K3 grubu harç
K3T1	%10 T katkılı K3 grubu harç
RILEM	The International Union of Laboratories and Experts in Construction Materials, Systems and Structures
T	Tuğla tozu
TS	Türk Standartları
UK	Uçucu kül
YFC	Yüksek fırın cürufu

1. GİRİŞ

İnsanlar 19. yüzyıldan itibaren geçmiş tarihini ve yaşantıları öğrenme hususunda derin araştırmalar yapmaya, eski uygarlıkların eserlerini bulmaya, ortaya çıkarmaya, tanımaya, dahası onarım ve müdahalede bulunmaya başlamışlardır. Yapılmış olan arkeolojik kazılar pek çok soruya cevap bulmaya imkan sağlamıştır. İnşaat teknolojisinin nasıl geliştiği, bugünkü düzeye hangi aşamalardan geçerek gelindiği merak edilmiş ve hatta bu merak sonucu yepyeni buluşların yapılması da mümkün olmuştur [1].

Tarihi yapılar; yapı malzeme teknolojisi, yapım teknolojisi ve tasarım tarihinin önemli somut belgeleridir. Tarihi yapıları özgün nitelikleri ile devam ettirerek korumak ve eserin gerektirdiği bakım ve onarım işlemlerini belirlemek için, yapının görsel mimari tanımı, röleve, restitüsyon çalışmaları ve karşılaştırılmalı tarihi analizlerinin yapılması önemlidir. Bu çalışmalarla birlikte yapının bünyesini oluşturan malzemelerin, elemanların ve işlevsel sistemlerin tanımı, analizleri, yapının bütününü içeren uyum ve dayanıklılık özelliklerinin belirlenmesi, bozulmuşluk durumlarının ve nedenlerinin ortaya çıkarılması koruma uygulamalarını tanımlamak için gereklidir [2].

Tarihi harçların incelenmesi; eski anıt ve yapıların konservasyonunda harç karakterleri, harçların tarihi ve o dönemin yapım teknikleriyle ilgili önemli bilgiler vermektedir. Orijinal harçların detaylı incelenmesinin ve fonksiyonlarının yanında estetik, fiziksel, kimyasal özelliklerinin tanımlanmasıyla yeni onarım harçları aynı estetik ve teknik özellikler ile hazırlanabilirler [3]. Doğru bir restorasyon çalışması yapılabilmesi için yapının duvar örgü teknikleri, kullanılan yapı malzemesinin boyutları, harcın renk, doku ve karakter özelliklerinin bilinmesi gerekmektedir. Aksi takdirde yapılan bilinçsiz çalışmalar yapıya zarar vermektedir. Venedik Tüzüğü'nde de geleneksel yapım teknikleri ve geleneksel malzemelerin kullanılmasının yapının restorasyonu için önemli olduğu belirtilmiştir. Yapıda kullanılan taş, tuğla ve harç gibi yapı malzemelerinin incelenmesi, yapım tekniği ile ilgili bilgi veren tarihi bir belge niteliği taşımaktadır [4].

Koruma uzmanları, yapılan araştırmalarda Portland çimentosunun zararlarından dolayı restorasyon çalışmalarında kullanılmasını tavsiye etmemektedirler. Günümüzün vazgeçilmez yapı malzemesi olan Portland çimentosu (PÇ) su ile reaksiyona girerek prizlenme süresini kısaltır. Çimentolu harç veya betonlar; gözenekliliği az, yüksek

mukavemetli, ısıl iletkenlik katsayısı yüksek, hızlı su emen buna karşılık geç kuruyan yapı malzemeleridir. Çimentolu karışımdaki boşluk oranının düşük olması harcın içinde suyun dolaşımını engellemektedir. Bu harç yapıda sıva olarak kullanıldığında duvarın nefes almasını engelleyerek iç yoğuşmalara sebep olur. Çimentonun yapısından kaynaklanan bazı suda çözünür tuzlar örneğin potasyum ve sodyum sülfatlar ve jips ile topraktan gelen kimyasal tuzlar reaksiyona girerek suda çözünür tuzlar oluşturarak yapıya zarar verir. Bu zararlarından başka çimento, renk ve estetik açısından da tarihi yapılarda kullanılan geleneksel malzemelerle uyum sağlayamamaktadır.

Kireç harçları, taş ve tuğla kullanılarak inşa edilen birçok tarihi kâgir yapıda kullanılmış yapı malzemeleri arasındadır. Harçlarda kullanılan malzemeler ile harçların fiziksel ve mekanik özellikleri, tarihi yapıların taşıma ve deprem davranışında önemli rol oynar. Kireç harçlarının özelliklerinin belirlenmesi, tarihi yapıların restorasyonunda kullanılacak olan onarım harçlarının üretilmesi bakımından çok önemlidir.

Bu tez çalışmasında, ilk aşamada daha önce bakım ve onarım çalışması yapılmamış olan yani özgünlüğünü koruyan bir tarihi yapının harçları araştırılmıştır. Bu amaçla, gerekli inceleme, görüşme ve resmi yazışmalardan sonra 16. yüzyılda Osmanlılar tarafından inşa edilen İnegöl-Bursa'daki Sungurpaşa hamam yapısı kubbesi seçilmiş ve bu yapının kubbelerinde kullanılan örgü harçlarından numuneler alınmıştır. Laboratuvar ortamına getirilen özgün harç numunelerinin teknolojik özellikleri tespit edilmiştir. İkinci aşamada özgün harç numuneleri üzerinde yapılan deneylerden elde edilen sonuçlar ile aynı dönemde inşa edilmiş diğer tarihi yapı harçlarının özellikleri dikkate alınarak farklı bağlayıcı/agrega (b/a) oranında deneme harçları üretilmiştir. Deneme harçları üzerinde deneyler uygulanarak harçların farklı özellikleri tespit edilmiştir.

Üçüncü ve son aşamada, özgün örgü harçları ve deneme harçları üzerinde yapılan deneysel çalışmaların neticesinde alternatif onarım harç karışımlarına geçilmiştir. Onarım harçlarının üretiminde iki farklı bağlayıcı/agrega (b/a) oranı belirlenmiştir. Deneysel çalışma kapsamında, bağlayıcı olarak yüksek kalsiyumlu sönmüş toz kireç, puzolanik malzeme olarak diyatomit ve tuğla tozu ile agrega olarak dere agregası kullanılmıştır. Toplamda 14 seri harcın taze ve sertleşmiş özelliklerinin belirlenebilmesi amacıyla fiziksel, fizikomekanik, kimyasal, mineralojik bileşim özellikleri analiz edilmiş, termal ve mikro yapı incelemeleri yapılmıştır.

2. KURAMSAL TEMELLER VE KAYNAK ARAŞTIRMASI

2.1. Bağlayıcı Malzemelerin Tarihsel Gelişimi

Kum, çakıl, kırma taş, tuğla ve benzeri agregaları birbirine bağlayan, yani bunları dayanıklı ve bu dayanıklılığı uzun zaman sürdürebilen ve agregaları bir kütle haline getiren maddeler bağlayıcı adı altında toplanabilir. Kimyasal durumları ile katılaşma ve sertleşme reaksiyonları farklı olan bağlayıcılar grubuna alçı, kireç ve çimentodan başka bitüm, katran, kil ve kolloidal özellikli maddeler de girebilir [5].

Kireçtaşının ya da en geniş anlamıyla her tür kalsiyum karbonatın kalsinasyonu ile CaO ve bunun da suyla karıştırılması ile sönmüş kireç elde edildiği çok eski çağlardan beri bilinmektedir. Kirecin bağlayıcılığının ilk ne zaman anlaşıldığı konusunda birçok spekülasyon olmasına rağmen bunun insanlık tarihinin erken dönemlerinde olabileceği söylenebilir [6].

Eski Mısır'da kamışlarla bağdadi sıva yapımında da sönmüş kireç kullanıldığı bilinmektedir. Eski Mısırlılar bu sıvanın üzerine çeşitli mineral renklendiriciler de kullanarak bir de alçı sıva uygulamışlardır [7].

Bilimsel incelemelere göre, insanlar yaklaşık M.Ö. 6000 yılından itibaren asfalt kullanmaya başlamışlardır. Ancak eski uygarlıkların kullandığı asfalt, doğal kaynaklardan doğrudan temin edilen ve doğal asfalt olarak adlandırılan asfalt olmuştur. Doğal asfalt, kendiliğinden yeryüzüne çıkarak gölcükler oluşturan petrolün, içerisindeki hafif yağları ve gazları güneş ve rüzgar etkisiyle kaybetmesiyle oluşan bir malzemedir [8, 9].

Dünyanın yedi harikasından biri olan ve taşları gönyesinde yontulmuş Babil surlarında taşların birbirlerine bitüm mastiği (macunu) ile yapıştırıldıkları bilinmektedir. Mısırlılar, Asuriler ve İbraniler vd. ocaklardan çıkardıkları iri taşları tek parça sütunlarda ve dallerde (döşeme) kullanıyorlardı. Yunanlılar, Mısırlıların kullandıkları inşa tekniklerini kullanmaya devam ederken aynı zamanda tavanlarda daller yerine eğimli çatı örtülerini tercih etmişlerdir. Etrüksler, Milattan on bir asır önce, ticaret yaptıkları Yunanlılardan öğrendikleri usulleri İtalya'ya getirmişlerdi. Kolayca buldukları küçük boyuttaki taşları kullanmaya ve iri

boyuttaki blokları büyük masraf etmeyecek şekilde yapım metotlarını ilerletmişlerdi. Tolozu (mağara) düşünen ve kireç harçlarını sistematik olarak ilk defa kullanan Etrüksler'dir [10].

Mısırlılar her ne kadar bol miktarda kireçtaşına sahip olsalar da, yapılarında sıva olarak ham alçı kullanmışlardır. Mısır'da alçı kullanımı (kalkerden çok daha az rezerve sahip olsa da) öncelikle yakıt sıkıntısı nedeniyle olmuştur. Kireçtaşının kirece dönüştürülmesi alçıdakine kıyasla önemli ölçüde daha yüksek sıcaklıklar (dolayısıyla daha fazla yakıt) gerektirir. Antik Mısır'da binalar için bazı temellerin, kireçtaşı veya inşaat molozları agregalarından oluşan alçıtaşı betonundan inşa edildiği bilinmektedir [11].

Romalılar puzolan katkılı kireç harçları üreterek su geçirimsizliği olan büyük su kemerleri inşa edebilmişlerdir [12]. İmparatorluğun yıkılmasının ardından yapılarda hidrolik olmayan kireç ve katkı malzemesi olarak puzolanlar ile üretilen harçların kullanılmış olduğu görülmektedir [13].

İngiltere'de J. Smeaton 1793'te içerisinde kil olan kireç taşlarını fırınlayarak farklı bir kireç elde etmiştir. Bu kireçle yapılan harcın su altında sertleştiğini bulunca modern çimentonun keşfinin yolu da açılmıştır. Smeaton, bu harçla, Eddystone Deniz Feneri'ni yenilemiş, İngiliz J. Aspdin, 1824'te öğütülmüş kireç taşı ve kili fırınlayarak "Portland Çimentosu" adı verilen modern çimentoyu keşfetmiştir. Fransız J. Monier, 1867'de telden yaptığı iskelet ve çimentolu harcı kullanarak, dünyanın ilk beton çiçek saksılarını yaparak çelik takviyeli betonarme yapı tekniği geliştirmiştir [14].

2.2. Tarihi Yapılarda Kullanılan Harçlar

Yapıda harç kullanımının temel amacı, yapı bileşenlerini meydana getiren elemanların birbirleri ile bağlantısını sağlayarak bir bütün oluşturmaktır. Böylece, bileşene gelen basınç yüklerinin dağılımını gerçekleştiren harç, bileşenin esnemesine de yardımcı olur. Taş veya tuğladan yapılmış olan birçok eski eserin kalın duvarlarında kullanılmış olan örgü harçları, sınırlı basınç dayanımına sahip olsa da bunun bir harç için oldukça yeterli olduğu bilinmektedir. Harç kullanımının diğer bir sebebi ise yapı elemanlarını çevresel faktörlerden korumaktır [15].

2.2.1. Tarihi yapılarda kullanılan harçların hammadde özellikleri

Tarihi yapıların duvar, kolon, kubbe, tonoz vb. elemanlarında taş, tuğla ve diğer yapı malzemesi bileşenlerini birbirine bağlayan ve ayrıca sıva olarak da kullanılmış olan harçların hammaddelerini şu şekilde sıralayabiliriz: Bağlayıcı, agrega ve katkı maddeleri. Ayrıca harçlarda reolojik ve mekanik özellikleri iyileştirmek için bazı organik katkı maddeleri ve takviye olarak bitkisel ve hayvansal malzemeler de kullanılmıştır.

Tarihi yapı harçlarıyla ilgili yapılan çalışmalar; DTA-TGA tekniklerinin, X-ışını kırınım teknikleri ve SEM analizleriyle birlikte kireç vb. bağlayıcı malzemelerin ve harç bileşiklerinin hidratasyon ve karbonasyon derecelerinin belirlenmesinde yararlı bir araç olduğunu göstermektedir [16-18].

Tarihi yapı harçlarının makroskopik analizi; harç katmanlarının sayısı, kaplama ve boya katmanları, agrega tane boyutu, kaba agreganın şekli ve rengi, bağlayıcının rengi ve yoğunluğu, çatlak oluşumu, rötre çatlakları, organik lifler ve görünür porozite gibi gözlemlenebilir tüm yapısal, morfolojik ve fiziksel özelliklerin belirlenmesinden oluşur [19].

Tarihi yapı harçlarında bağlayıcı olarak kullanılan kireçler ve özellikleri

Kireç, antik çağlardan beri bilinen ve çok yönlü kullanımı olan bir maddedir. Kireç üretiminin hammaddesi kireçtaşıdır. Kireçtaşları; yüksek kalsiyum içeren kireçtaşı ve dolomitik kireçtaşı olmak üzere iki sınıfa ayrılabilmektedir. Kimyasal bileşiminde en az %90 kalsiyum karbonat ($CaCO_3$) içeren kayaçlara kalker ya da kireçtaşı adı verilmektedir. %5'ten fazla oranda $MgCO_3$ içeren kireçtaşlarından elde edilen kireç, dolomitik kireç olarak adlandırılmaktadır. Dolomitik kireçtaşlarında $MgCO_3$ oranı %43'e kadar yükselebilmektedir. Oluştuğu yere, içerdiği safsızlıkların cinsi ve miktarına, kullanım alanlarına göre birçok kireçtaşı çeşidi bulunmaktadır [20, 21].

Kireç üretim teknikleri; kalsinasyon sıcaklığı, kalsiyum karbonatın reaktivitesi ve söndürme koşulları gibi çeşitli faktörlere bağlı olarak farklı kristal boyutlarında sönmüş kireç $Ca(OH)_2$ üretimine yol açmaktadır. Restorasyon amacıyla farklı kireçleri ve onlarla yapılan harçların özelliklerini ortaya koymak, özgün harçla onarım harcının uyumu açısından önem arz

etmektedir [22]. Bazı ülkelerde kireç farklı formlarda üretilmektedir. Kirecin bu formları, kullanıma hazır sönmüş toz kireç, ince agrega halinde sönmemiş kireç ve iri halde sönmemiş topak kireçler ve söndürüldükten sonra farklı sürelerde bekletilmiş kaymak kireçlerdir [23]. Kireçler, hidrolik ve hidrolik olmayan kireçler olmak üzere ikiye gruba ayrılır.

Hidrolik kireç

Hidrolik kireç, kimyasal bir reaksiyonla su altında da sertleşebilen ve saf kireçten farklı olarak karbondioksit olmaksızın bu süreci sürdürebilen bir kireçtir. Hidrolik kireç saf kireç ile kıyaslandığında, daha yüksek mukavemetli harçların elde edilmesi daha kolay ve daha hızlı olmaktadır. Hidrolik kireç, kalsiyum ve magnezyum karbonatla birlikte reaktif silika, alüminyum oksit ve/veya kil içeriğine sahip kireçtaşlarından üretilir [24].

Hidrolik kireç de, harç veya sıva yapımı için su ve kumla karıştırıldıktan sonra, sönmüş kalsiyum hidroksit saf kireci (Hava kireci) ile aynı şekilde karbonasyonla kalsiyum karbonat kristalleri oluşturmaktadır. Hidrolik kirecin sertleşmesi; kısmen portlanditin bu şekilde karbonatlaşmasıyla sağlanır, ancak hidroliklik derecesine bağlı olarak kalsiyum silikat hidratların ve kalsiyum alüminyum hidratların oluşumuyla sonuçlanan kimyasal reaksiyon yoluyla olur [25].

Hava kireci

Kireç, kireçtaşının fırınlarda 900°C civarındaki sıcaklıklarda kalsine edilmesi ile elde edilmektedir [26].

$$CaCO_3 + Isı \longrightarrow CaO + CO_2 \quad (2.1)$$

$$CaO + H_2O \longrightarrow Ca(OH)_2 + Isı \quad (2.2)$$

Reaksiyon ürünü kalsiyum oksit veya diğer ismi ile sönmemiş kireç (CaO) bu şekilde kullanıldığı gibi, suyla reaksiyona girmiş sönmüş toz kireç ($Ca(OH)_2$) şeklindeki kullanımı da oldukça yaygındır.

Sönmemiş kireç suyla reaksiyona girdiğinde ısı açığa çıkmakta ve başlangıçta çok hızlı yükselen sıcaklık sönmenin sonlarına doğru sabitleşmektedir. Bu ısı, kireç taneciklerinde büyük termal iç gerilimlere neden olarak sönmemiş kirecin tozlaşıncaya kadar parçalanmasına yol açmaktadır. Sönme işlemi devam ederken su buharı oluşmakta ve hafif bir ses meydana gelmektedir. Sönmemiş kireç; fırın üretim şartlarına, fırın sıcaklığına ve fırında kalma süresine bağlı olarak yumuşak pişmiş, sert pişmiş ve çok sert pişmiş gibi isimler almaktadır. Kirecin aktivitesini belirlemede kullanılan T_{60} deneyinde yumuşak pişmiş, gözenek sayısı fazla ve aktivitesi yüksek kireçlerin 3-4 dk içinde çok şiddetli reaksiyon göstererek 60-80°C sıcaklığa çıktığı; sert pişmiş gözenek sayısı az, aktivitesi düşük kireçlerin ise daha uzun sürede bu sıcaklığa çıkabildiği belirlenmiştir. Çok sert pişmiş kireçlerin ise 60-80°C sıcaklığa hiçbir zaman çıkamadığı gözlenmiştir [20, 27, 28].

Sönmüş kirecin uzun yıllar hava ile temas etmeden bekletildikten sonra kullanılması, Roma ve daha sonraki dönemlerden bu yana bilinmektedir. Roma döneminde Vitruvius, kirecin en az üç yıl bekletildikten sonra kullanılması gerektiğini bildirmektedir [29].

Sönmüş kirecin en önemli özelliği yüzey alanıdır. Yüzey alanı kireçlerin aktivite tayini açısından en güvenilir ölçülerden birisidir. Kirecin cm^2/g cinsinden ölçülen alanı ne kadar büyükse aktivitesi de o kadar fazla olmaktadır. Yüzey alanı büyük olan kirecin çökme hızı, plastisite, emme kapasitesi vb. fiziksel özellikleri oldukça iyidir. Laboratuvar şartlarında üretilen kireç örnekleri ağırlıkça farklı su oranlarında söndürülerek en uygun söndürme şartları belirlenmeye çalışılmış ve en aktif kirecin %70 su ilavesi ile söndürülmesi ile oluştuğu tespit edilmiştir. %80 su ilavesi ile yapılan söndürmede ise kireçte suya aşırı doyma olduğu ve özgül yüzey alanı değerlerinin tekrar azalma eğilimine girdiği görülmüştür [30].

Arkeolojik kazılar sonucunda, M.Ö. 5000 ve 10000 yılları arasında Çatalhöyük'te inşa edilmiş olan yapıların zeminlerinin bir kısmının yapımında ve döşemesinde kireç kullanıldığı görülmektedir [31-33]. Bu arkeolojik bulgular, Mezopotamya Khafaje'de bulunan 4500 yıllık kireç fırınlarının kalıntılarıyla birlikte, kirecin Neolitik Çağ'da da kullanılmış olabileceğine işaret etmektedir [34].

Hidrolik kireç kullanımı ve/veya saf kirece puzolan katılmasıyla hazırlanan harçlar Yunanlılar ve Romalılar tarafından geliştirilmiştir. Yapay hidrolik kireç, Vezüv yanardağının yakınlarında bulunan yüksek hidrolik kapasiteli bir tüfün çıkarıldığı Puzzoli

kasabasından alınan puzolanik bir malzemenin kirece karıştırıldığı bilinmektedir. Bu puzolanik malzeme yüksek reaktif silis ve alümin içermektedir. Bu puzolanik tüf, $Ca(OH)_2$ ve su ile karıştırıldığında dayanım özelliği kazanmış kalsiyum silikat hidratlı ve alüminatlı bir yapı oluşturmaktadır [35].

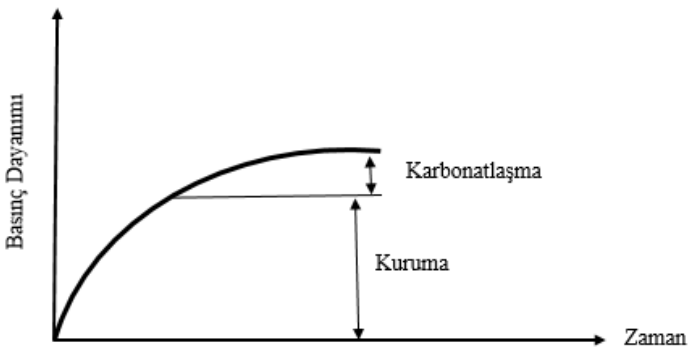
Tarihi yapı harçlarında karbonatlaşma süreci

Hidrolik olmayan kireçler atmosferdeki karbondioksit (CO_2) ile reaksiyona girerek kalsiyum karbonata ($CaCO_3$) dönüşürler [36].

$$Ca(OH)_2 + CO_2 \longrightarrow CaCO_3 \qquad (2.3)$$

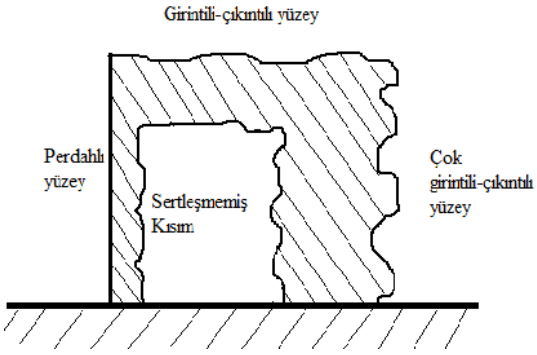
Karbonatlaşma, gaz-sıvı-katı reaksiyonu ile açıklanabilir. Gaz haldeki CO_2 kirecin yüzeyinde veya gözeneklerinde yoğuşmuş H_2O içinde çözünür. Bu çözünmede; H^+, bikarbonat ve karbonat iyonları oluşarak suyu asidik hale getirir. Oluşan asidik suda $Ca(OH)_2$ çözünerek Ca^{+2} iyonları oluşur. Ca^{+2} ile karbonat (CO_3^{-2}) iyonları ile birleşerek $CaCO_3$ oluşur [36]. CO_2 derişiminin artmasıyla karbonatlaşma artarken, suyun yokluğunda veya aşırı miktarda varlığında karbonatlaşma çok yavaş gerçekleşir [37].

Kirecin karbonatlaşması sürecinde ısı açığa çıkar. Fakat reaksiyon çok yavaş geliştiğinden açığa çıkan ısının pek farkına varılmaz. Harcın dış kısmında meydana gelen $CaCO_3$ havanın iç kısımlara girmesini güçleştirir. Bu tepkime geriye dönüşü olmayan tek yönlü bir tepkimedir. Tüm $Ca(OH)_2$ karbonatlaşıncaya kadar devam etmektedir [20].



Şekil 2.1.Kireç harcının katılaşma ve sertleşme süreci [38]

Kireç harçlarının uygulanmasında, ilk kuruma aşamasında harç bünyesindeki aşırı suyu kaybeder ve rötre süreci başlamış olur (Şekil 2.1). Daha sonra atmosferde bulunan CO_2 harç içine nüfuz ederek $Ca(OH)_2$ ile reaksiyona girip karbonatlaşma sürecini başlatmış olur. Karbonatlaşma mekanizması; ortamdaki sıcaklık ve nem içeriği, harç kalınlığı ve boşluk yapısı ile harç çevresindeki bileşenler ve havadaki CO_2 konsantrasyonuyla ilişkilidir [36].



Şekil 2.2. Kireç harcı dış yüzeyinin karbonatlaşma derinliğine etkisi [10]

Vicat, kireç harçlarında karbonatlaşmanın kütlenin dışından içine doğru meydana geldiğini, zamanla bu ilerlemenin yüzeyin perdahı arttıkça azaldığını ve ilerleme hızlarının harç yüzey şekline göre 1 ile 5 değerleri arasında kaldığını belirtmiştir (Şekil 2.2). Vicat, ilerleme hızlarının değişik olmasını şu şekilde açıklamıştır; Kireç harcıyla reaksiyona girecek karbondioksitin ve harç yüzeyi perdahlı ise bir nevi geçirimliliği az kabuk oluşturmakta ve karbonatlaşma derinliği azalmaktadır [10].

Yavaş karbonatlaşma, kireç esaslı harçların kullanımındaki düşüşte önemli faktörlerden biridir. Karbonatlaşma, harçları daha sert ve dolayısıyla daha dayanıklı hale getirmektedir [39]. Bu işlem bağıl nem, sıcaklık ve CO_2 konsantrasyonu gibi birçok faktöre bağlıdır, ayrıca portlanditin kalsit haline dönüşmesinden kaynaklanan hacim artışı meydana gelir [40-42]. Öte yandan harcın toplam karbonatlaşmasının yüzyıllar sürebileceğini belirten bazı yayınlar vardır [43, 44, 12].

Tarihi yapı harçlarında kullanılan agregaların özellikleri

Agregalar, hammadde açısından doğal ve yapay agrega olarak iki sınıfa ayrılırlar. Doğal agregalar inşaat harçlarının en temel malzemelerinden biridir. Agregaların bağlayıcılara kıyasla üretimi daha kolay ve ekonomiktir. Agregalar, kompozit malzemelerin hacim

kararlılığı ve dayanıklılığını geliştirirler. Agregaların fiziksel özellikleri ve bazı durumlarda kimyasal kompozisyonları, taze ve sertleşmiş harçların özelliklerini farklı derecelerde etkileyebilir [45]. Agregaların kaynağından çıkarılırken yapısal değişiklikler oluşabilir ve bunlar agreganın makroskopik özelliklerini etkiler. Yüksek porozite, zayıf-kötü malzeme kullanımı, yuvarlak agrega ve iri tanelerin fazlalığı gibi özellikler, harç matrisindeki agrega-bağlayıcı ara yüzünü zayıflatarak harcın dayanımını azaltır ve porozitesini olumsuz etkileyebilir [46, 47].

Agrega ile bağlayıcı hamur arasında kimyasal bir bağ oluştuğunda, malzeme sürekliliğini karakterize eden iyi bir aderans ortaya çıkmaktadır. Agrega-hamur aderansında, bağlayıcının farklı kristal boyutları, mikro çatlaklar ve yüksek gözeneklilik nedeniyle "zayıf faz" olarak isimlendirilen bir arayüz oluşur [48]. Agrega ve bağlayıcı faz arasındaki elastikiyet modülü orantısızlığı, ara yüzde oluşabilecek mikro çatlak gelişimini etkiler. Bununla birlikte iri agregaların bağlayıcının büzülmesini kısıtladığı, çatlak oluşumunu engellediği ve artan bir yük altında çatlak oluşmaması için daha fazla enerjiyi absorbe ettiği bilinmektedir [49].

Tarihi yapı harçlarında kullanılan inorganik agregalar; kum kaynaklarının farklı olması, farklı kaya formasyonu ürünler ve çok farklı jeolojik yatakları gibi sebeplerle oldukça çeşitlidir [50].

Agrega tipi, şekli ve tane boyutu dağılımı, harçların fiziksel ve fizikomekanik özelliklerini etkilemektedir. Harç üretiminde 2 mm'den küçük agrega kullanımının, harcın basınç dayanımını 16 mm'ye kadar olan iri agregalara göre daha çok etkilediği belirtilmiştir. Ayrıca <125μm çaplı puzolanik karakterdeki silisli ince agregaların harçların dayanımını arttırdığı ve harçlara su geçirimsizlik kazandırdığı belirlenmiştir. Agregaların yuvarlak tanelerden oluşmasının aderans ve ara yüz özelliğini olumsuz etkilediği; bununla birlikte, keskin köşeli tanelerle iyi bir aderans sağlayarak mekanik dayanımı arttırdığı saptanmıştır [39, 45, 51].

Selçuklu döneminde inşa edilmiş tarihi yapıların harçlarında, ince agrega (<250μm) ve orta irilikte agrega (250-500μm) toplamının, agregaların büyük bir kısmını oluşturduğu görülmüştür. Ayrıca orta ve iri agregaların kuvars, feldspat ve mika mineralleri içerdiği, ince opak agregaların kireç içinde homojen dağıldığı ve bağlayıcı fazın orta irilikte agregalarla iyi bir adhezyonu sergilediği belirtilmiştir. İnce agrega (<45μm) içeriğinin XRD, FTIR ve

EDS analizlerindeki veriler ışığında güçlü bir puzolan olan opal-A olduğu tespit edilmiştir [52].

Ayasofya kubbe harçlarında kullanılan agregaların makro gözlemlerinde, tuğla kırıklarının çoğunluğunun kırmızımsı ancak bazılarının sarıya daha yakın bir renkte olduğu belirtilmiştir. Ayrıca harç içinde kum ve tuğla kırığı agreganın hemen hemen eşit miktarda olduğu da yapılan analizler sonucunda elde edilmiştir. Tarihi harçların içinde agrega olarak bulunan tuğla kırıklarının şekli, boyutları ile harcın fizikomekanik özellikleri doğrudan ilgilidir [53].

Lenas ve Alvarez çalışmalarında, mineralojik olarak farklı agrega türlerini harçlarda kullanmış ve kalker agregası yerine silika agrega kullanıldığında dayanımın azaldığını gözlemlemişlerdir [39]. Bağlayıcı matris olan kalsit ile kalker agregası arasındaki morfolojik benzerlik, bu dayanım artışıyla ilişkili olabilir. Aynı zamanda, karışımdaki hacim oranı dayanım üzerinde de etkili olmaktadır. Harçlarda yüksek basınç dayanımının, 0-4 mm agrega aralığına sahip harçlardan elde edildiği belirtilmiştir [49].

Bağlayıcı olarak kireç ve tuğla kırığı agregasından üretilen harçların puzolanik reaksiyonları ve basınç dayanımlarını arttırdığı belirtilmiştir. Roma ve Bizans dönemine ait yapıların harçlarında, tuğla kırıklarının agrega olarak kullanıldığı bilinmektedir. İstanbul'daki Roma döneminde yapılmış yapı harçlarının incelendiği çalışmada; harç numunelerinde yüksek miktarda tuğla kırığı ve tuğla tozu görüldüğü ve harç içinde agregaların homojen bir şekilde dağıldığı saptanmıştır. Harç numunelerindeki agregaların, tuğla kırıkları, mika ve kuvars içeren dere agregasından oluştuğu tespit edilmiştir. Örgü harç numunelerinde iri agregaların mekanik dayanımı sağladıkları için daha fazla olduğu, maksimum tane boyutunun 16 mm ve en çok agreganın 4 mm de yoğunlaştığı belirtilmiştir [54].

Tarihi yapı harçlarında kullanılan puzolanların özellikleri

Yalnız başına kullanıldığında bağlayıcılığı olmayan, fakat sulu ortamda sönmüş kireç veya çimento ile karıştırıldığında reaksiyona girerek bağlayıcılık özelliği kazanan maddelere puzolan denilmektedir. Puzolanik maddelerin içinde fazla miktarda kolloidal halde silis ve alümin bulunmaktadır. Bu maddelerin kireçle yapmış olduğu reaksiyon sonunda puzolan bağlayıcılık özelliği kazanır [55].

Genel olarak puzolanların heterojen bir yapıda olmaları ve hidratasyonun karmaşık yapısı nedeniyle puzolanik aktiviteyi açıklayıcı bir model geliştirilememektedir. Bununla beraber, konuyla ilgili genel eğilimler şu şekilde sıralanabilir [56];

- Diğer özellikler aynı kalmak üzere puzolanın bağladığı $Ca(OH)_2$ miktarının fazla olması, bu puzolanda aktif olan madde miktarının da fazlalığına işarettir,
- Bir puzolanın kısa dönemdeki aktivitesi esas olarak özgül yüzey alanına, uzun dönemdeki aktivitesi ise kimyasal ve mineralojik kompozisyonuna bağlıdır.
- Bir puzolanın bağladığı portlandit miktarı, puzolanın aktif fazlarının içerisindeki SiO_2 miktarı ile ilişkilidir.
- Belirli sınırlar dahilinde kireç-puzolan karışımlarında, kireç/puzolan oranının artması portlandit bağlanmasını artırır.
- Zeolitik puzolanlar camsı puzolanlara göre genel olarak daha aktiftir.
- Farklı puzolanlarda bulunan camsı fazlar farklı kireç bağlayabilme yeteneğine sahiptir.
- Puzolan-kireç karışımlarında ortamda su miktarının fazla olması bağlanan kireç miktarını artırır.

Kireç-puzolan reaksiyonu sonucunda literatürde aşağıda sıralanmış ürünlerin oluştuğu yönünde ortak bir görüş vardır [57-59]:

- CSH formunda kalsiyum silikat hidrat
- C_4AH_x formunda kalsiyum alüminat hidrat ($9 \leq x \leq 13$)
- Hidrate gehlenit-C_2ASH_8
- Kalsiyum karboalüminat-$C_3A.CaCO_3H_{12}$
- Etringit-$C_3A.3CaSO_4H_{32}$
- Kalsiyum alüminat monosülfat- $C_3A.CaSO_4H_{12}$

Yukarıda sıralanmış olan tüm ürünler bir arada bulunmaz. Örneğin kalsiyum alüminat monosülfat ürünü genellikle hidratasyonun başlarında bulunur ve zamanla etringite dönüşür. Muhtemelen karboalüminat, kalsiyum alüminat hidratın karbonatlaşmasıyla oluşur. Yüksek miktarda opal içeren doğal puzolanların kireçle tepkimesi yalnızca kalsiyum silikat hidrat verebilir [57].

Doğal puzolanın kireçle tepkimesiyle, puzolan içerisinde bulunan alkaliler zamanla gözenek çözeltisine geçer. Bu şekilde açığa çıkan alkali miktarı tepkimenin gelişmesine, zamana, puzolanın inceliğine ve sıcaklığa bağlıdır [60].

Doğal reaktif kil mineralleri içermeyen saf kireç, doğal ya da suni puzolanlar eklenerek harç karışımında hidrolik özelliklerin oluşmasını sağlayabilir. Puzolan, doğal hidrolik kireçlerde bulunanlara benzer hidrolik bileşikler oluşturmak üzere kireç ile reaksiyona giren silika ve/veya alüminyum içeren bir malzemedir. Kireç harcına puzolanlar ekleyerek, suyun altında ve karbondioksit olmaksızın sertleşebilme kabiliyetini kazanarak doğal hidrolik kireç benzeri bir malzeme elde edilir [61].

M.S. 200'lü yıllarda puzolanların sönmüş kireçle reaksiyona girerek kireç harcına hidrolik özellik kazandırdığı görülmüştür. Roma harcı, puzolan olarak volkanik tüf ve kirecin karışımıyla üretilen harçlara denilmektedir. Romalılar puzolanlı kireç harçların, kalsiyumlu kireç harçlarından daha üstün özelliklerde olduğunu anlayıp daha fazla yapıda kullanmayı tercih etmişlerdir. Bu yapılar arasında tarihi sur duvarları, su kemerleri, tonozlar ve birçok sivil yapı inşaatı bulunmaktadır [62].

Puzolanlar, saf olmayan hidrolik kirecin performans özelliklerini artırmak için yaygın olarak kirece karıştırılmaktadır. 75 mikrondan daha küçük boyutta öğütülmüş puzolanlar, kireç harcının priz süresini azaltır ve hidrolik reaksiyon sonucunda harcın dayanımı arttırırlar. 300 mikrondan büyük puzolanlar, güçlü bir hidrolik reaksiyona nazaran harç içindeki gözenekli bir agrega gibi rol almaktadırlar [63]. Puzolanlar aynı zamanda serbest kireç ile reaksiyona girerek dayanım ve sertleşmeyi güçlendirmek için doğal hidrolik kireçlerle birlikte de kullanılırlar. Puzolanik malzemeler, orta veya yüksek hidrolik kireçlere kıyasla zayıf hidrolik kireçlere ilave edildiğinde daha belirgin bir reaksiyon sergilemektedirler [61].

Tarihi yapı harçları incelendiğinde, birçoğunun yapısında doğal veya yapay olarak puzolanik özellikte ince agrega içerdiği görülmektedir. Puzolanik katkılar, portlandit ile girmiş olduğu reaksiyon yoluyla harçların dayanımını geliştirmektedir [64-67].

Tuğla tozu ve tuğla kırığı katkılı kireç harçları özellikle Bizans dönemi yapılarının yük taşıyan duvarlarında örgü harcı olarak oldukça sık kullanılmıştır. Örgü harcı kalınlığının, agregaların ve kırık tuğlaların boyutuyla orantılı olarak arttırıldığı görülmüştür. Harç

kalınlıklarının 40 mm'den daha büyük olduğu (Ayasofya kubbesi 70 mm), agrega olarak tuğla kırıklarının 25 mm'ye varan boyutlarda kullanıldıkları ve Bizans yapılarında tuğla kalınlığı kadar harç kalınlığı yapıldığı görülmektedir [68].

Tarihi yapı harçlarında kullanılan katkı malzemeleri

Tarihi yapılarda gerek kerpiç duvarlar, gerekse taş duvarların çoğu, yalnız duvarlara tekdüze bir görünüm katmak için değil, aynı zamanda nem, böcek ve sineklerin içeriye sızmasını önlemek için içten ve aynı zamanda birçok yapıda dıştan sıvanmışlardır. Sıvaları sıcağın sebep olduğu çatlamalara karşı dayanıklı ve esnek yapabilmek için, karışımına kıyılmış hayvan yemi ve saman gibi katkılar katılmıştır [69].

Tarihi yapı harçları incelendiğinde; kireç harcının özelliklerini iyileştirmek amacıyla, yerel olarak elde edilmesi mümkün olan malzemelerin kullanıldığı görülmektedir. Yerel tarım ürünleri (bakliyat, meyve ve sebzeler), yağlar, yumurta, süt, kan, gübre, hayvan kılı gibi malzemelerinde dahil olduğu maddelerden elde edilen birbirinden farklı özelliklerde ürünler harç içinde kullanılmıştır. Her ne kadar karışımlara elde edilebilen her şeyin dahil edilmesi mümkünmüş gibi görünse de, bu karışımların ardında geleneksel bir yöntemin yattığı açıktır [70].

Sıvalara katılan kıtık, keten lifi ve saman gibi organik katkı maddeleri, sıvanın içerisinde bir donatı görevi görmekte, sıvanın çekme kuvvetlerine olan dayanımını ve kendi taşıyıcılığını arttırarak sıvayı çatlama ve dağılmaya karşı daha güçlü kılmaktadır. Benzer şekilde harçlara katılan hayvan kanı, yumurta akı ve benzeri organik katkı maddeleri harcın yapışma ve tutunma özelliğine olumlu katkıda bulunmuştur [9].

Harç ve sıva bileşenlerinde arap zamkı, hayvan tutkalı ve incirin sütlü suyu bağlayıcıya destek yapışkan olarak kullanılmıştır. Çavdar hamuru, kesik süt, hayvan kanı ve yumurta beyazı kirecin daha çabuk sertleşmesi için kullanılmıştır. Arpa, idrar ve hayvan tüylerinin dayanıklılığı arttırdığı, balmumunun büzülmeleri azalttığı, yumurta akı, süt ve keten tohumu yağı gibi maddelerin ise kirece plastik özellik kazandırarak işlenebilirliği arttırdığı belirtilmiştir [71].

2.3. Tarihi Yapı Harçlarının Özellikleri

Tarihi yapılarda kullanılan harçların fiziksel, durabilite, kimyasal ve morfolojik özellikleri, hammadde kompozisyonları ve mineralojik karakterleri farklı metot ve standartlara göre incelenmektedir.

1970-1980 yıllarına kadar, tarihi yapı harçlarının özellikleri çoğunlukla geleneksel kimyasal analizlerle tespit ediliyordu [72-75]. Kimyasal analizlerle bulunan sonuçların yorumlanması, farklı harç bileşenleri hakkında yeterli bilgi toplanamadığı için çok kısıtlı kalıyordu [76-78]. Daha sonraki dönemlerde harç karakterizasyonu veya tanımlama sistematiğinin çoğunluğunun, harcın farklı bileşenlerini nitel olarak belirlemedeki ilk adım olarak optik mikroskop ve X-ışını kırınım teknikleri oluşturmuştur. Bu analizlerden sonra SEM-EDX, mikroprob, DSC/DTA/TGA, FTIR vb. daha niteliksel ve kantitatif analizler için çeşitli kimyasal ve diğer analitik teknikler kullanılmıştır [79-82].

Tarihi yapı harçları karmaşık kompozit malzemelerdir. Tarihi yapı harçlarının incelenmesinde ilk adım olarak ince kesitlerinin polarizen mikroskopta incelenmesiyle harcın özellikleri hakkında önemli bilgiler elde edilir. Agrega ve puzolanik mineral katkılı harçlar çok büyük bir farklılık gösterirler, polarizan mikroskop yöntemi bu farklı inorganik ve organik bileşenleri tanımlamanın ilk adımı olarak en uygun yöntem olmaktadır [50].

Harçların karakterizasyonunda uygun analitik tekniğin seçimi, cevaplanması gereken sorulara ve mevcut materyal miktarına bağlıdır. Farklı yaklaşımlar ve farklı gereksinimlerle en az üç disiplin bu süreçte görev almalıdır. Bu disiplinler; tarihi anıtları koruma, arkeoloji ve malzeme inceleme alanlarıdır [83-85].

<u>Tarihi yapı harçlarının bazı fiziksel ve mekanik özellikleri</u>

Tarihi yapılardan alınan sıva ve örgü harç numunelerine ait birim hacim ağırlık, yoğunluk ve porozite deneyleri, RILEM standart deney yöntemleri esas alınarak yapılmaktadır. Harç numuneleri deneye başlamadan önce yaklaşık 60°C sıcaklığa sahip etüvde 24 saat bekletilir ve kuru ağırlığı bulunduktan sonra doygun kuru yüzey ağırlığı ve su içindeki ağırlıkları tespit edilir.

Tarihi yapı harçlarının mekanik özelliklerinin belirlenmesi oldukça sınırlı olmaktadır. Bazen tarihi yapı üzerinde Schmidt çekici ile sertlik ölçümü yapılırken, bazen de yapıdan alınan numuneler laboratuvar ortamında test edilerek mekanik özellikleri belirlenir. Tarihi yapılardan alınan numuneler çoğunlukla geometrik olmayan şekildedir. Bu sebeple harçların basınç dayanımları, kaya mekaniğinde kullanılan Nokta Yükleme deneyi yardımıyla ve bazı sabit katsayıların-kabullerin yapılmasıyla elde edilir. Ayrıca numune boyutlarının sınırlılığı sebebiyle harçlara ait dinamik elastisite modülü ampirik formüller yardımıyla hesaplanabilmektedir.

Ayasofya'nın ana kubbesinden alınan iki harç numunesi üzerinde yapılan adezyon-yapışma testlerinden 0,4-0,5 MPa çekme dayanımına sahip oldukları sonucuna varılmıştır. Ayrıca aynı yapıdan alınan numuneler üzerinde yarmada çekme dayanımı analizleri yapılmış ve 0,5-1,2 MPa dayanım değerleri elde edilmiştir. Bu sonuçlar Ortaçağ döneminde inşa edilen yapı harçlarıyla karşılaştırıldığında, çekme dayanımının yaklaşık yedi kat daha fazla olduğunu göstermektedir [86].

Ayasofya'daki ana kubbe ve ana kemerlerden alınan tuğla, harç ve tuğla-harç bileşenlerinin yapı üzerinde ve laboratuvar ortamında yapılan ultrases hızı vb. tahribatsız deney verilerine göre yaklaşık dinamik Elastisite modülleri, $E_{harç}$:0,66 Gpa, $E_{tuğla}$:3,1 Gpa, $E_{harç\text{-}tuğla}$:1,83 Gpa olduğu belirlenmiştir [87].

Ayasofya'nın İstanbul'daki depreme dayanıklılığını belirlemek için yapılan çalışmada, anıtın statik ve dinamik davranışının, duvar ve kubbelerinde kullanılan harç ve tuğlaların mekanik ve kimyasal özelliklerine bağlı olduğunu göstermiştir [88, 89].

6. yüzyılda inşa edilmiş bir savunma yapısının ince kesit incelemesinde b/a oranı 1/3 olarak tespit edilmiştir. Ayrıca tuğla agregalar ile bağlayıcı ve diğer agregaların bağlayıcıyla güçlü bir aderansı görülmüştür. Harç içinde agrega olarak tuğla kırığı, kireçtaşı ve silisli agregalar kullanıldığı belirlenmiştir (Çizelge 2.1). Kırık tuğla parçalarının kırmızımsı ve sarı renkte olduğu saptanmıştır. Kalkerli agregaların farklı boyutlarda ve kuvars agregalara göre daha fazla miktarda yer aldığı bildirilmiştir. İnce kesitler üzerinde yapılan agrega dağılım analizine göre, iri agreganın %50'sini tuğla kırıkları oluşturmakta ve agrega tane boyutu azaldıkça tuğla kullanımı da azalmaktadır. Tuğlaların %21 su emmesi, 1,6-1,745 g/cm^3 birim

hacim ağırlığına, tuğla-harç kompozitinin ise 1,635 g/cm^3 birim hacim ağırlığa sahip olduğu saptanmıştır [90, 91].

Çizelge 2.1. Ravenna şehrindeki Tarihi S. Vitale yapısına ait harç agrega dağılımı [90, 91]

Agrega tane aralığı (mm)	Agrega miktarı (%)	Kalker ve silis agregası (%)	Kırık tuğla agregası (%)
16-6	10	5	5
6-3	17	8,5	8,5
3-0,075	73	65,7	7,3
Toplam	100	79,2	20,8

İstanbul'da Erken Bizans Dönemi saray yapılarının tarihi harçlarıyla ilgili yapılan çalışmada şu özellikler ortaya çıkmıştır: Harçların porozitesinin %37-48, ağırlıkça su emme yüzdelerinin %23-33, birim hacim kütlesinin 1,32-1,61 g/cm^3 ve nokta yükleme deneylerine göre basınç dayanımlarının 6-8 MPa arasında değiştiği saptanmıştır [54].

Roma döneminde Antalya'da inşa edilmiş olan iki tarihi yapıya ait harçların analizlerinde; birim hacim ağırlığı 1,4-1,85 g/cm^3, yoğunluğu 2,36-2,63 g/cm^3, ağırlıkça su emmesi %12-34, porozitesi %24-49 aralığında değerler bulunmuştur. Aynı çalışmada harçların nokta yükleme basınç dayanım sonuçlarının 5,6-8,9 MPa arasında değiştiği görülmüştür [92].

Tarihi yapı harçlarında asit kaybı analizi

Seyreltik asit içinde harcın kireç bağlayıcısı, puzolanik bağlayıcı ve yapısında kalsit olan agregalar çözünmektedir. Asitte çözünmeyen agregalar ayrışmadan kalmakta ve toplam numune miktarından bağlayıcı kısmı hesaplanmaktadır. Ayrıca asitte çözünmeyen ve agrega olarak kabul edilen kısma elek analizi deneyi uygulanarak harcın agregasına ait tane boyutu dağılımı elde edilmektedir.

Belçika'da bulunan ve farklı dönemlerde inşa edilmiş olan kale, saray ve kilise yapılarının harçlarında yapılan asit kaybı verilerine göre; agrega tanelerinin 80 μm ile 2 mm arasında değiştiği, b/a oranının ağırlıkça 1/5'e yakın olduğu belirtilmiştir [59]. İstanbul'da Roma döneminde inşa edilmiş üç saray yapısının duvarlarında bulunan harçlar 1/3 oranında seyreltilmiş HCl (Hidroklorik asit) asit çözeltisiyle reaksiyona sokulmuş ve deney sonuçlarına göre 1/3 ve 1/4 b/a oranları elde edilmiştir. Harçların sert yapıda oldukları ve

asit kaybından sonra kalan agregaların analizinde; kirecin tuğla agregalar ile iyi bir aderans sağladığı ve asitte çözünmeden tuğla agrega üzerinde silikatlı kısmın bir arayüz oluşturduğunu belirtmişlerdir. Harçlara ait granülometri eğrisi incelendiğinde, maksimum tane boyutunun 16 mm olduğu ve agreganın %50'sinin 4 mm altı agregalardan oluştuğunu tespit etmişlerdir [66].

Roma dönemine ait iki tarihi yapının harçları üzerinde yapılan asit kaybı analizi verilerine göre; b/a oranı duvar harçlarında 1/6, sıva harcında 1/9; agreganın maksimum tane boyutu 8 mm ve 1 mm altı agrega oranı ortalama %45 olarak bulunmuştur [92].

2.3.1. Tarihi yapı harçlarında kullanılan tuğla ve kiremitlerin özellikleri

Tuğla, kiremit ve benzeri malzemelerin hammaddesi kil (kaolinit, illit vb.), kuvars ve feldspat minerallerinin karışımından oluşmaktadır. Bu karışım 600-900ºC'lerde pişirilirse killer sıcaklık derecelerine ve mineralojik yapılarına bağlı olarak farklı puzolanik aktivitelere sahip olurlar. Bu sıcaklıklarda kil minerallerinin yapıları bozulmakta ve amorf alümina silikatlar oluşmaktadır. Osmanlı döneminde Horasan harcı kullanımında tuğlaların yeni ve iyi pişmiş olma koşulu şartnamelerde belirtilmiştir. Tuğlaların iyi pişirilmesi, hammadde olan killerin tamamen amorf hale dönüşümünün sağlanmasının gerekliliği ile açıklanabilir. Tuğla için en fazla amorf malzemenin elde edildiği sıcaklığın 550-600ºC'de olduğu düşünülmektedir [29, 93, 94].

Killi tuğlaların dışında, alçı ve kumun karıştırılmasıyla üretilen kalsiyum silikatlı tuğlalarda mevcuttur. Bu tuğlalar, killi tuğla gibi fırınlarda pişirilmez, yüksek basınç altında preslenerek üretilir. Kum ve alçıdan üretilen tuğlalar, pürüzsüz ince bir dokuya sahiptir ve killi tuğlalara göre daha açık renkte bulunurlar [95].

Tuğlanın yeni pişirilmiş olması, su ile temas olmadan kullanarak reaktifliğini yitirmemesinin gerekliliği ile açıklanabilir. Çünkü su ile aktif hale gelen amorf silikalar, silisik asit üreterek tuğlada olması muhtemel karbonatlarla reaksiyona girerek reaktiflerini yitirmektedir [96].
XRD analizlerinde, yüksek sıcaklıkta oluşan mullit piklerinin görünmemesi, tuğlaların pişme sıcaklığının 900ºC'yi geçmediğini göstermektedir. Yapılan bazı incelemelerde Horasan sıva örneklerinde bozulmalar gözlenmiştir. Bu bozulmaların sıvalarda oluşan etrenjit kristallerinden kaynaklandığı saptanmıştır. Etrenjit kristalleri, alçının varlığında

yüksek sıcaklıklarda ve nemde tuğla içinde bulunan metakaolin ile kirecin reaksiyonu sonucu oluşmaktadır. Bu gözlem, alçı katılan Horasan sıvalarının, hamam sıvası olarak kullanılmasının uygun olmadığını göstermektedir [97].

Birçok araştırmada hava kireci ve hidrolik kireçli harçlarda puzolanik reaksiyonun, $Ca(OH)_2$ ile reaksiyona giren ve kalsiyum hidratların oluşmasından sorumlu olan SiO_2 ve Al_2O_3'e bağlı olduğuna işaret etmektedir. Böke ve arkadaşları yaptıkları çalışmada, 14. ve 15. Yüzyıllarda harçlardaki tuğla tozu ve kırıklarının puzolanik aktivitelerinin esas olarak kil minerallerinin miktarına bağlı olduğunu tespit etmişlerdir [98].

2.4. Tarihi Yapı Malzemelerinin Bozulma Nedenleri ve Sonuçları

Yapıların gördüğü zararlar boyutlarına göre, hasar, bozulma ve patinalanma olarak şiddetliden hafife doğru sıralanabilmektedir. Orbaşlı'ya göre hasar, strüktürün bozulma, tahribat ve bileşen kaybı sonucu, gerçekleştirmek üzere tasarlandığı kapasiteyi sürdürememesi durumudur [99]. Croci'ye göre ise hasar, strüktürün taşıyıcılığının bir kısmını ya da tümünü kaybetmesi durumudur [100].

Bozulma ise iklimsel, doğal, biyolojik ve benzeri çeşitli etkiler altında malzemenin uğradığı değişim ve dönüşüm olarak açıklanmaktadır. Malzemelerin bozulma düzeyi, malzeme yapısı ve kalitesine, işçiliğin kalitesine, yapıdaki tasarım ve detaylandırmanın doğruluğuna, yapının bakım-onarım seviyesine ve kullanım şekline bağlı olarak değişmektedir [101].



Resim 2.1. Bitki oluşumunun hamam kubbesinde yapmış olduğu tahribat (İnegöl/Bursa)

Tarihi hamam yapısının kubbe dış yüzeyinde meydana gelen bitki oluşumuna bir örnek Resim 2.1'de ve Bursa'da bir tarihi yapının dış duvar yüzeyinde restorasyon sırasında PÇ kullanımı sonucu ortaya çıkan tuz kristalleri Resim 2.2'de görülmektedir.



Resim 2.2. Onarımında çimento kullanılmış bir yapı duvarında beyaz renkli tuz kristalleri oluşumu

Tarihi yapılarda kullanılan taş malzemeler de birçok sebepten dolayı bozulmaya ve korozyona uğramaktadır. Örneğin, taşın duvarda tabii yatak düzlemine paralel olarak oturtulması gerekirken yatak düzlemine dik kullanılması çabuk bozulmasına neden olabilir. Paslanan demir kenetlerin bulunduğu yerdeki taşı çatlatması veya harç ve sıva gibi malzemelerdeki suda çözünen tuzların daha gözenekli olan taşa geçip, kuruma anında tekrar kristalleşmesi taşta kabuklaşma, tozlaşma veya oyuk halinde bozulmalara yol açmaktadır [102].

Bozulmanın sebeplerinden biri de nemdir. Yapıya etki eden nem şu yollarla ilerleyebilir; yağmur suyu sızmaları, yerden yükselen nem ve yoğunlaşan nem gibi. Ağaçların ve otların tarihi yapılarda kökleri ile çatlaklar oluşturduğu, bulundukları yerde nem çekerek bozulmayı başlatıp devam ettirdikleri de sık sık görülmektedir [102].

Tuzların kristalizasyonu, yapı malzemeleri içinde en yaygın ve tahrip edici olanıdır ve kimyasal yapıları ne olursa olsun, gözenekli malzemelerin tümünde donma ya da hava kirliliği bağlantısı olmadan etkili olmaktadır. Suda çözünebilen tuzlar, su ile taşınarak ya da herhangi bir yolla malzemenin gözeneklerine ve boşluklarına ulaşır. Tuzlu su çözeltisi içindeki tuzlar suyun buharlaşması ile kristallenmekte, bu kristaller malzeme yüzeyinde, gözeneklerde ve kılcal boşluklarda toplanmaktadır [101].

Kagir malzemede suyun olumsuz etkileri (Çizelge 2.2); tuz çiçeklenmeleri ve donma durumundaki bozulmalar şeklinde ortaya çıkar. Su ile birlikte gözeneklerden malzemenin derinliklerine nüfuz eden tuz molekülleri (Sülfat, klor ve nitrat tuzları), sıcaklık ve bağıl nemdeki değişim, rüzgar ve benzeri nedenlerle içerisinde çözünmüş oldukları su buharlaştığında gözeneklerde birikirler [95]. Bu birikimlerin oluşturduğu basınç ile malzeme gözenekleri çatlayarak yapısı bozulur. Çiçeklenme olarak adlandırılan bu suda çözünen tuzların oluşturduğu bozulma tipi, kagir malzeme üzerinde suyun yıkıcı etkilerindendir [101].

Çizelge 2.2. Tarihi yapıların harç ve sıvalarında meydana gelen hasarlar ve etkileri [103]

Çevresel Zarar Verici Etkileri		
Faktör	Etki	Hasar Tipi
Yağmur veya kar suları ile oluşan asidik sular (CO_2 ve SO_2 gibi)	Karbonatlaşmış kirecin çözülmesi	Harcın yapışma ve bağlanma özelliklerini azaltır. Agregaları ayrıştırır.
Sürekli donma-çözünme döngüsü	Harçtaki bağlayıcı agrega ara yüzünün bozulması	Harcın dağılarak kopmasına sebep olur.
Aşırı miktarda su buharına maruz kalma (Yangın olaylarında)	Harcın taşıyabileceği kritik su buharı içeriği aşılabilir.	Harcın katmanlar halinde dağılmasına sebep olur.
Harçta kullanılan kumun kil içermesi	Nemli ortamda kilin şişmesi ve içsel gerilme oluşması	Harcın dağılması veya harç yüzeyinde bölgesel olarak şişmelerin oluşması
Deniz suyu, hava kirliliği veya harçta yabancı madde bulunması	Anyonik tuz kristalleri oluşabilir. Örneğin klorür, sülfat veya nitrat gibi	Harcın ayrışması, çatlak oluşumu ve bölgesel renk bozuklukları.
Bitki oluşumu	Özellikle bazı bitki kökleri harçların çözülmesine yol açabilir.	Biyolojik çürüme, harcın boyanması ve dağılması
Organik büyüme varlığı	Böceklerin oluşmasıyla harcın bağlayıcılığı zayıflar.	Mikrobiyolojik çürüme ve harcın çözünmesi
Onarım Malzemelerinin Zararlı Etkileri		
Faktör	Etki	Hasar Tipi
Bağlayıcı olarak kireçten daha fazla çimento kullanımı	Aşırı sert harç oluşumu ve ayrışarak parçalanma	Suyun çatlaklar yoluyla harç içine difüzyonu ve harçta büzülme çatlağı oluşumu
Çimento kullanımından kaynaklı tuzlar	Harç yüzeyinde çiçeklenme	Tuzlar çiçeklenmeye sebep olarak içsel gerilmeleri arttırırlar.
Sentetik reçine eklenmesi	Özgün harcın su ve su buharı geçişini engeller.	Harç yüzeyinde ayrışmalarla birlikte kabuklanma oluşumu

2.5. Tarihi Yapılarda Onarım Harçları Üzerine Yapılan Çalışmalar

Tarihi yapıların korunmasında onarım harcı formülasyonu; esas olarak bağlayıcının hidrolikliği, malzeme karışım oranları ve agreganın granülometrisi özgün harçla uyumlu bir onarım harcının gerekli bileşenlerini tanımlamak için kullanılır [104].

Moropoulou ve arkadaşları tarafından gerçekleştirilen bir çalışmada, puzolanik tarihi harçların restorasyonunda kullanılabilecek alternatif puzolanik maddeler araştırılmıştır. Doğal puzolan olarak Milos Adası toprağı, yapay puzolan olarak da seramik tozu ve metakaolinin kullanıldığı deneyler sonucunda metakaolin/kireç hamurunun diğerlerine göre en yüksek reaktiviteye sahip olduğu ve daha kısa sürede stabil hale geldiği tespit edilmiştir [105].

Tarihi Horasan harçlarının karakterizasyonu ve uygun malzemelerle hazırlanan 13 farklı karışımın analizlerini esas alan bir çalışmada, İstanbul Surları ve Tahtakale Hamamı'ndan alınan Horasan harcı numuneleri incelenmiştir. Yeni karışımlarda puzolanik madde olarak tuğla tozu ve Kapadokya Bölgesinden elde edilen pomza taşı kullanılan araştırma sonucunda, pomza taşının tuğla tozundan daha etkili bir puzolanik katkı olduğu görülmüştür [106].

İtalya Campania bölgesinde yapılan bir araştırmada, 16 tarihi anıtın duvar harçlarının orijinaline uygun şekilde yeniden yapımı amacıyla analitik bir metot geliştirilmiş, yapılan analiz ve araştırmalar doğrultusunda mevcut harçlara en yakın özellikte yeni harç karışımları elde edilmiştir. Ancak bu yöntemlerin puzolanik harçlarda olumlu sonuçlar verirken kalker-silikat agrega esaslı harçlarda yanıltıcı sonuçlar verebileceği vurgulanmıştır [107].

Yapılan diğer bir çalışmada agregaların kireç harçlarında dayanım, porozite, kılcal su emme gibi bazı fiziksel ve mekanik özelliklere etkisi araştırılmıştır. Çalışmanın ana bulguları, düşük b/a oranı (1/1,5; 1/2,5; 1/3) ve kum agregası 0-4 mm fraksiyonunda en yüksek basınç dayanımına ulaşıldığı belirtilmiştir. Harç içinde iri agrega kullanımında, taneler ile bağlayıcı faz ara yüzündeki bağı artırmak ve poroziteyi azaltmak için harçların kalıplara sıkıştırılarak yerleştirilmesi gerektiği tespit edilmiştir [45].

Tarihi yapıların duvar ve sıva harçları genellikle kireç kullanılarak hazırlanmıştır. Günümüzde tarihi yapıların koruma ve restorasyon uygulamalarında da kirecin rolü oldukça önemlidir. Kireç, modern yapı malzemeleri ile karşılaştırıldığında daha ekonomik ve daha sürdürülebilir bir yapı malzemesidir (Resim 2.3).



Resim 2.3. Tarihi Ortaköy Kervansarayında kireç harçları ile yapılan onarım örneği

Tarihi yapılar dayanıklılık özellikleri ile dikkat çekmektedir. Yüzyıllar boyunca ayakta kalmayı başarmış yapıların dayanıklılığını; yapı malzemelerinin özellikleri ve birbirleriyle olan uyumları sağlamıştır [108]. Ancak son yıllarda koruma amacıyla yapılan yanlış müdahalelerle oluşan uyumsuzluklar sonucunda tarihi yapılar büyük zararlar görmüştür [109].

Tarihi yapının özgün harcı ile onarım harcının uyumu için gereken teknik özellikler şu şekilde sıralanmıştır [110]:

- Yüzey özellikleri (Renk, doku vb.),
- Malzeme kompozisyonu (Bağlayıcı tipi, agrega tipi, agrega tane boyutu dağılımı),
- Dayanım (Basınç, eğilme ve yapışma),
- Esneklik (Elastikiyet modülü ve deformasyon yapabilme kapasitesi),
- Porozite özellikleri (Toplam porozite, birim hacim ağırlık, porozite dağılımı, su buharı geçişi ve kapiler su emmesi),
- Termal genleşme katsayısı.

Bu gereksinimlere ek olarak donma-çözünme çevrimleri, taze harcın işlenebilirliği ve uzman ellerde inşası oldukça önemlidir [110].

Onarım harcının kürü yeni bir harç tasarımda dikkat edilecek başlıklar arasındadır. Harçlara uygulanacak kür seçimi, harcın ömrünü ve servis ömrü boyunca oluşabilecek deformasyon ve büzülmesini önemli derecede etkilemektedir [111].

Tarihi yapılara yeniden işlevsellik kazandırmak ve ayakta tutabilmek için yapılan onarım ve koruma çalışmaları oldukça yenidir. Onarım harçlarını standardize etme ve karakteristiklerini ortaya koyabilmek ve bu konularda araştırmalar yapılması gereğine, 1981 yılında Roma'da düzenlenen "Uluslararası Tarihi Yapıların Korunmasında Harç, Bağlayıcı ve Enjeksiyon Karışımları Kullanımı" adlı sempozyumda önemle durulmuştur [112].

Rossi yapmış olduğu bir çalışmada, onarım harçları ile ilgili olarak üç önemli hususa dikkat çekilmiştir [112]:

- Hem özgün harç hem de onarım harcı çalışmaları paralel olarak yapılmalıdır.
- Onarım harçları, uygulandığı veya yerine konduğu malzemelerin özellikleri dikkate alınarak hazırlanmalıdır.
- Restorasyon için üretilecek onarım harçlarının belli temel parametreleri belirgin bir şekilde karakterize edilmelidir.
- Bu parametrelerin ölçüm ve deney yöntemleri standartlaştırılmalıdır.

Tarihi yapılarda duvar sisteminin en sık onarılan bileşeni harçlardır. Genellikle bozulmaya uğrayan harçların onarımı malzemenin değişmesini gerektirir.
Tarihi harçların yenileme yaklaşımları arasında şunlar sayılabilir: (a) Özgün malzemenin aynısı veya benzeri ile onarım, (b) Özgün harç özellikleri ile uyumlu modern malzemeler kullanarak onarım, (c) Özgün harç malzemelerinden daha iyi sayılabilecek modern malzemeler kullanarak bakım ve onarım [112].

Genel olarak, tarihi yapıların onarımı ve korunması için yapılacak onarım harçlarında istenen özellikler aşağıda belirtilmiştir:

1. Tarihi yapı duvarındaki sistem sürekliliği için harcın işlenebilirliği ve adhezyon kabiliyeti yeterli düzeyde olmalıdır.
2. Onarım veya koruma çalışmaları için üretilecek harçların priz başlama süreleri uygulama imalatlarıyla uyumlu ve tutarlı olmalıdır.
3. Onarımı yapılacak harç yüzeyinde mikro veya makro çatlak oluşumunu engellemek için harcın ya hiç büzülme yapmaması ya da çok az büzülme yapması istenir.
4. Tarihi yapı duvarları sıklıkla hareket halindedir (yüzey titreşimleri vb.). Onarım harçları, bu titreşimlerin yapı duvarında oluşturacağı çekme gerilmelerini en aza indirgeyecek esnekliğe sahip olmalıdır.
5. Duvar inşasında kullanılan tuğla veya taş malzemeyle benzer veya uyumlu bir dayanıklılık göstermelidir.
6. Yapı duvarında oluşacak donma-çözünme veya su buharının geçişi için harcın yeterli gözenekliliğe sahip olması gerekir.
7. Duvara ulaşacak suya karşı dirençli ve dayanıklı olmalıdır. Bu özellik onarım harcının gözeneklilik boyutu dağılımı ile yakından ilgilidir.
8. Suda çözünen tuzların etkilerine dayanıklı olmalıdır. Bu özellik, harcın gözeneklilik boyutu dağılımı ile yakından ilgilidir

İskandinavya'da gerçekleştirilen bir restorasyonda, tarihi binalarda özgün kireç harçları yerine, PÇ, sentetik reçine ve farklı karışımlar kullanılmıştır. Günümüz yapı malzemeleri ile üretilen harçların düşük ısı ve yüksek neme dayanıksız olduğu, yeterince esnek ve geçirgen bir malzeme olmadığı belirtilmiştir. Bu durum üzerine özgün harca yakın özelliklerde onarım harcı için özgün harcın özellikleri incelenmiştir. Ancak özgün harcın bazı özelliklerini tespit edebilecek harcın alınmadığı ve mevcut harç parçalarının incelendiği belirtilmiştir. Sonuç olarak belirlenen özellikler ile hazırlanan harcın, PÇ'den daha olumlu sonuçlar vermiş olduğu tespit edilmiştir [113].

Moroupoulu ve arkadaşları, kaymak kireç, toz kireç ve doğal hidrolik kireç ile puzolanik aktiviteleri sırasıyla 6,2 ve 6,0 MPa olan yapay ve doğal puzolanlı, silis kumu ve tuğla kırığı agregalı harçlar üretmişlerdir. Üretilen harçlara ait dayanım değerleri Çizelge 2.3'te verilmiştir.

Çizelge 2.3. Onarım harçlarının basınç ve eğilme dayanımları [114]

Harç Tipi	Karışım Malzemesi	b/a	Kür Süresi (Gün)	Eğilme Dayanımı (MPa)	Basınç Dayanımı (MPa)
NHLA	Doğal hidrolik kireç/agrega	1/2,3	3	0,69	3,25
			15	0,78	3,02
LPA	Kaymak kireç/agrega	1/1.5	3	0,46	0,97
			15	0,47	1,56
LPoA	Toz kireç/agrega	1/1,8	3	0,54	1,18
			15	0,95	2,9
LPMA	Kaymak kireç/doğal puz./agrega	1/1	3	0,41	1,13
			15	0,5	1,15
LPCPA	Kaymak kireç/yapay puz./agrega		3	0,43	1,22
			15	0,48	1,34
LPoCPA	Toz kireç/yapay puz./agrega		3	0,62	2,36
			15	1,3	4,6

Harçlar üzerinde yapılan termal gravimetrik analizlerde, NHLA ve LPMA serilerinde Portlanditin tümüyle hidrolik reaksiyona ve kalsite dönüşmüş olacağı belirtilmiştir. Ayrıca toz kirecin kaymak kirece göre daha fazla $CaCO_3$'a dönüştüğünü tespit etmişlerdir [114].

Perge antik kentinde bulunan taş sütunların restorasyon çalışmaları kapsamında, özgün harçlar incelenmiş ve onarımlarda kullanabilmek için puzolan katkılı harçlar üretilmiştir. Onarım harçlarında puzolan olarak metakaolin, tuğla tozu ve Tunçbilek termik santral atığı olan UK kullanılmıştır. Bağlayıcı: puzolan: agrega oranı ağırlıkça 1: 0,5: 2 olarak alınmıştır. Metakaolin katkılı harçlarda 1,28 g/cm^3 ile en düşük birim hacim ağırlığı ve %47 ile en yüksek porozite değerleri elde edilmiştir. Elastisite modüllerinde en düşük değerin puzolansız referans harçta, en yüksek değer ise UK katkılı harçlarda görüldüğü tespit edilmiştir [115].

Horasan harcının dayanım özelliklerini iyileştirebilmek için endüstriyel yan ürün olan UK kullanılması araştırılmıştır. Bu amaçla, b/a oranı 1/2, 1/2.5 ve 1/3 olan, doğal hidrolik kireçle %0, 10, 20, 30'u oranlarında UK ile yer değiştirmiş bağlayıcı ve kiremit kırığı agregalar kullanılarak harçlar üretilmiştir. 28. gün sonunda en yüksek basınç dayanımının 6,5 MPa ile 1/3 oranında %30 UK katkılı harçlarda olduğu tespit edilmiştir. Çalışma sonucunda, UK'nin oranına bağlı olarak hem yüksek yüzey alanı etkisi hem de puzolanik aktivitesi nedeniyle kiremit kırığı ve bağlayıcılar arasında aderansı artırdığı ve Horasan harcının özelliklerini iyileştirebildiği vurgulanmıştır [116].

Hava kireci, doğal hidrolik kireç, beyaz çimento ile puzolan olarak metakaolin, SD ve doğal puzolan kullanılarak onarım harçları üretilmiştir. Hava kireci ve SD katkılı harçların, kireç-çimentolu harçlar ile doğal hidrolik kireçle üretilmiş harçlar gibi düşük su buharı geçirimliliği sergilediği belirtilmiştir. Doğal puzolan ve metakaolin katkılı harçların ise daha yüksek su buharı geçirimliliğine sahip olduğu tespit edilmiştir [117].

Divriği Ulu Camii koruma çalışmalarına ışık tutmak amacıyla yapıda yer yer görülen taş bozulmalarının nedenlerini teşhis eden bir araştırma yapılmıştır. Tarihi yapının taş duvarlarının derz onarımlarında çimentolu malzemeler kullanıldığı ve PÇ'nin yapıda tuz birikimine yol açtığı belirtilmiştir. Bozulmaların olduğu kısımlarda kimyasal, mineralojik ve mikro yapı incelemeleri yapılmıştır. Bozulmaların, yapının nemli bölgelerinde, çimentolu harçlar kullanımından kaynaklanan bazik ortamda, yapı taşı olan dolomitin bozularak yoğun epsomit ve hekzahidrat tuzlarının oluşumuyla başladığı ve ilerlemekte olduğu saptanmıştır [118].

Canbaz ve Topçu çalışmalarında, %10, %20, %30 ve %40 oranlarında kirece ikame edilmiş kiremit tozu ve YFC katkılı on seri kireç harcının fiziksel, kimyasal ve mikro yapılarını incelemişlerdir. Çalışmada, kiremit tozu katkılı numunelerin basınç dayanımının YFC numunelerine oranla %33 daha düşük çıktığını, bunun sebebinin ise kiremit tozunun puzolanik aktivitesinin düşük olmasından kaynaklanabileceğini açıklamışlardır. Ayrıca kiremit tozu oranı artışıyla harçta ultrases geçiş hızlarının düştüğünü, YFC oranındaki artışın geçiş hızını paralel olarak arttırdığı belirtilmektedir [119].

Fragata ve arkadaşları, hava kireci, hidrolik kireç ve çimentoya atık cam tozu ikame ederek harçlar üretmişlerdir. Atık cam tozunun hava kireci harcı ve hidrolik kireç harcının mekanik özelliklerini arttırdığını, çimentolu harçlarda ise mekanik özelliklerin azaldığını belirtmişlerdir. Bu olayın çimento harçlarında atık cam tozunun agrega olarak görev yapmasına ve çimentolu harçlarda kireç harçlarına kıyasla daha az portlandit olmasının silikatlı bileşikleri oluşturamamasıyla açıklamışlardır [120].

Yeni söndürülmüş toz kireç ile karşılaştırıldığında, uzun yıllar bekletilmiş kaymak kirecin SEM görüntülerinde çok daha küçük boyutta portlandit kristalleri olduğu görülmüştür. CO_2 suda çözünmesiyle, suya doygun halde bulunan CO^{2-}_3 bileşiği $Ca(OH)_2$ içinde daha hızlı

çözünmektedir. Bu sebeple, geniş portlandit kristalleriyle karşılaştırıldığında daha küçük boyuttaki portlanditlerin çözünebilirliği çok daha hızlı olmaktadır [121].

Başka bir çalışmada, bir yıl ile on dört yıl dinlendirilmiş kaymak kireç ve sönmüş kireç tozu ile b/a oranı 1/3 ve 1/4 olan harçlar üretilmiştir. Üretilen harçların karbonatlaşma performansları karşılaştırmalı olarak araştırılmıştır. 14 yıl dinlendirilmiş olan kaymak kireçlerin hekzagonal yapıdaki portlandit kristali boyutlarının diğer kireçlere oranla daha küçük boyutlarda olduğu belirtilmiştir. Bu kaymak kireç ve 1/4 b/a oranı ile üretilen kireç harçlarında en hızlı karbonatlaşmanın olduğu vurgulamışlardır [121].

Cazalla ve arkadaşları araştırmaları sonucunda tarihi yapı konservasyonunda müdahaleler için bazı önemli noktalara değinmişlerdir [121]:

- Konservasyon için kullanılacak kireç harçları en az 1 yıl dinlendirilmiş olmalı,
- Optimum karbonatlaşma verimi için b/a oranının 1/4'ten az olmalı,
- Eğer kireç kaymağı yoksa toz kireç kaymak haline getirilerek b/a oranı 1/3 olacak şekilde kullanılmasını tavsiye etmektedirler.

Ağırlıkça b/a oranı 1/2.5 olan, doğal hidrolik kireç, yağlı kireç ve referans olarak PÇ'li harçlar üretilmiştir. Harçlara uygulanan tuz kristalizasyonu testinde, kütle kayıplarının en çok PÇ ve doğal hidrolik kireçli harçlarda, en az ise yağlı kireçle üretilen harçlarda meydana geldiği belirtilmiştir. PÇ, hidrolik kireç ve yağlı kireçli harçların porozite değerleri sırasıyla %23, %25,5 ve %30,1 olduğunu tespit etmişlerdir. Aynı harçların sırasıyla su emme deney sonuçları ise, %12, %14 ve %17'dir [122].

Volkanik puzolan katkılı 1/1 ve 1/7 b/a oranlı kireç harçları üzerinde fiziksel, kimyasal, mikroskobik ve termal incelemeler yapılmıştır. Harçların 28. günde yapılan TGA-DTA analizlerinde; 100-350°C arasında silika ve alümina hidratların dehidratasyon reaksiyonlarını, 400-550°C arasında $Ca(OH)_2$ dehidratasyonu ve 650-850°C de $CaCO_3$ dekarbonasyonunun meydana geldiği tespit edilmiştir [123].

Diğer bir çalışmada ise, sönmemiş kireç topakları laboratuvar ortamında söndürülmüş ve sönmüş kireçlerin 1 ay, 1, 3 ve 5 yıl yaşlarında mikro yapıları incelenmiştir. Termal analizlerde, 40-350ºC de serbest ve adsorbe suyu, 350-650ºC de portlanditin kimyasal bağ

suyunun uzaklaşması ve 600-900ºC arasında kalsitin dekarbonasyonunun gerçekleştiği belirtilmiştir [124].

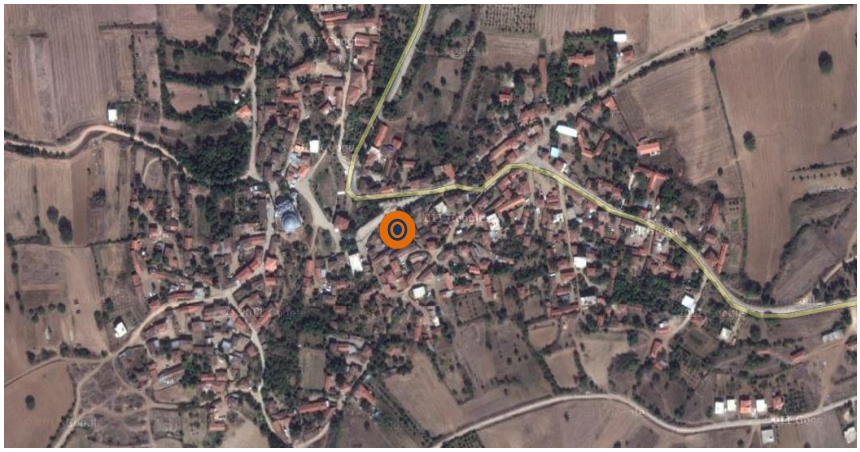
Tarihi yapıların restorasyonu için puzolan/bağlayıcı/agrega oranı 1/1/3 olan onarım harçları üretilmiştir. Üretilen harçların sertleşmiş birim hacim ağırlığı ile porozite değerlerinin arasında bir orantı olduğu kaydedilmiştir. Harçların birim hacim ağırlığı arttıkça görünür porozitenin azaldığı belirtilmiştir. Örneğin, birim hacim ağırlıkları sırasıyla 1,32; 1,67 ve 1,74 g/cm^3 olan harçların porozite değerleri yine sırasıyla %45,3; %33,5 ve %32 olduğu kaydedilmiştir. Aynı grup harçların basınç dayanımları incelendiğinde, 28 günlüklerde harç serileri arasında büyük farkların olmadığı görülmüştür. Ancak 90 günlüklerin basınç dayanım değerlerinde, tuğla tozu katkılı harçlar referansın 4 katı, atık cam tozu 3 katı ve metakaolin katkılı harçların 2 katı daha yüksek değer verdiği saptanmıştır [125].

3. MATERYAL VE METOT

Tarihi yapıların malzeme yönünden incelenmesi ve onarımı için geliştirilecek çalışmaları kapsayan bu çalışmanın deneysel bölümü üç aşamadan oluşmaktadır. Birinci aşamada, daha önce onarım görmemiş ve hala ayakta olan tarihi bir yapı seçilmiştir. Bu amaçla Vakıflar Genel Müdürlüğü ve Vakıflar Bursa Bölge Müdürlüğü ile görüşülmüş ve Bursa ili İnegöl ilçesi sınırları içinde bulunan 16. yüzyıl Osmanlı Dönemi tarihi hamam yapılarından biri olan Sungurpaşa Hamamı çalışma eseri olarak seçilmiştir. Ardından bu tarihi yapıdan özgün harç numuneleri alınarak laboratuvarlarda yapılan deneylerle özgün harçların karakteristik özellikleri belirlenmiştir. İkinci aşamada, özgün harç numunelerinin fiziksel ve mekanik özelliklerinden ve aynı dönemde inşa edilmiş yapılara ait özgün harç analizleri dikkate alınarak alternatif harçlar tasarlanarak ön deneyler yapılmıştır. Üçüncü ve son aşamada ise özgün örgü harcı ve deneme harçlarından elde edilen veriler ışığında, alternatif onarım harçları üretilerek harçların fiziksel, kimyasal, mekanik, mineralojik, termal ve mikroskobik özellikleri tespit edilmiştir.

3.1. Tarihi Sungurpaşa Hamamı ve Özgün Örgü Harç Deneyleri

Tarihi Sungurpaşa hamamı, İnegöl ilçesinin 13 km kuzeyinde yaklaşık koordinatları K40.183°, D29.498° ve rakımı 370 metre olan Sungurpaşa köyü merkezinde bulunmaktadır (Harita 3.1).



Harita 3.1. İnegöl/Sungurpaşa Köyü Uydu Fotoğrafı (Google Earth)

3.1.1. Tarihi Sungurpaşa hamamının yapım tekniği

Sungurpaşa hamam yapısının özelliklerini belirlemek amacıyla Sungurpaşa köyüne gidilerek yerinde incelemeler yapılmıştır. Tarihi hamamın, Sungurpaşa/İnegöl köy merkezinde inşa edilmiş olduğu ve Bursa'daki diğer hamam yapılarıyla benzer özellikler gösterdiği belirlenmiştir (Resim 3.1, 3.2).

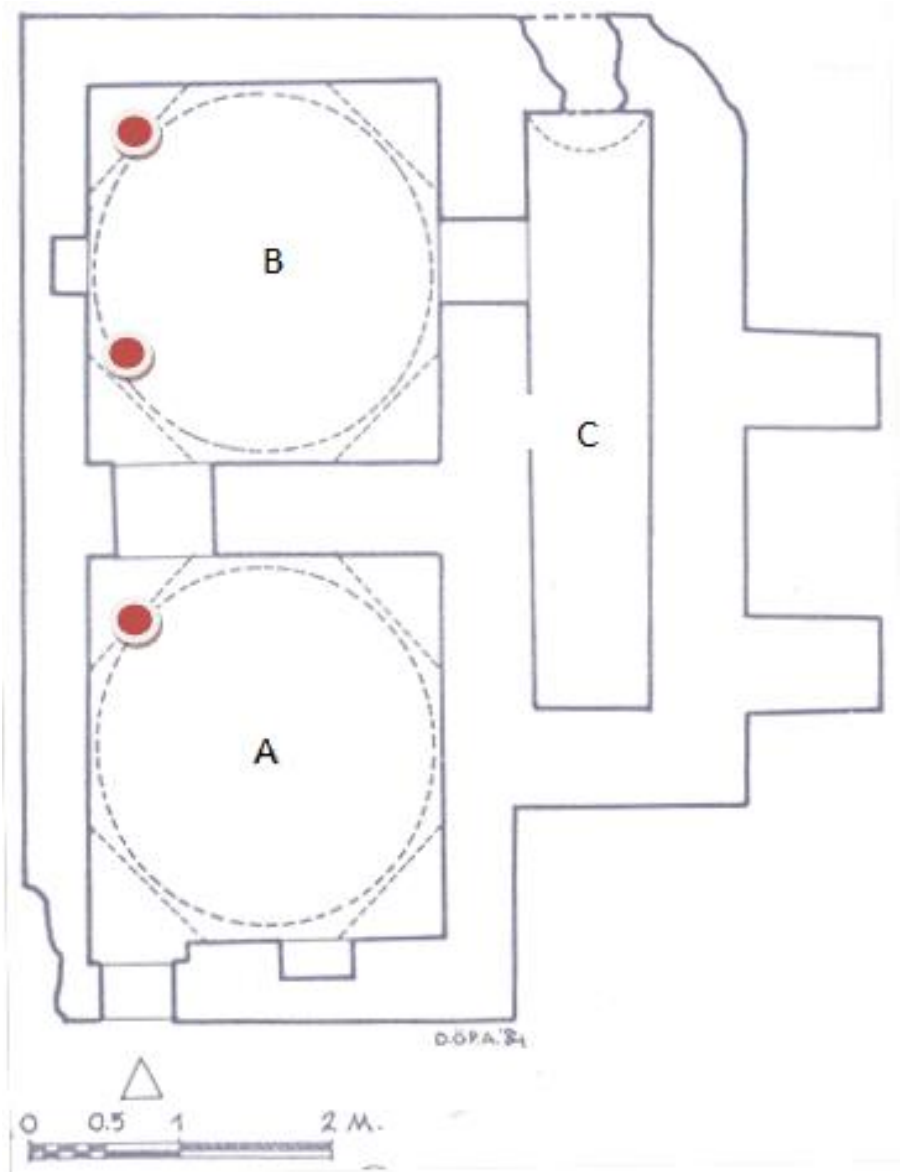


Resim 3.1. Sungurpaşa hamamının genel görünümü



Resim 3.2. Sungurpaşa hamamı batı cephesi görünümü

Sungurpaşa hamamı; sıcaklık, ılıklık ve külhan olmak üzere üç bölümden oluşmaktadır (Resim 3.3). Hamamın sıcaklık ve ılıklık bölümlerinin kubbe başlangıcına kadar moloz taş olduğu, kubbe yapımında ise tuğla kullanıldığı tespit edilmiştir. Yapıdaki duvarların tamamı düşey taşıyıcı eleman olarak tasarlanmıştır. Hamam yapısında moloz taş ve kaba yonu taş duvarların şaşırtma örgü ile örüldüğü ve duvarların üst örtüye geçiş/tromp kısımlarında ise daha düzgün ve küçük kesme taşların kullanıldığı görülmüştür. Kubbe yapımında tuğla kullanıldığı ve kalınlığının bir tuğla olduğu, örgü harcı olarak da kireç harcı kullanıldığı belirlenmiştir (Resim 3.4, 3.5).



Numunelerin alındığı noktalar

Resim 3.3. Bursa/İnegöl/Sungurpaşa hamamı planı (A:Ilıklık, B:Sıcaklık, C:Külhan)[126]



Resim 3.4. Sungurpaşa hamamı ılıklık girişi (solda) ve sıcaklık girişi (sağda)



Resim 3.5. Sungurpaşa hamamı ılıklık bölümü duvar ve tromp birleşimi

Hamam yapısının ılıklık ve sıcaklık mekânlarının kubbesinde yaklaşık 40-50 cm çapında ışık kubbecikleri ile yatay ve düşey yönde künk ve tüteklikler bulunduğu tespit edilmiştir(Resim 3.6, 3.7).



Resim 3.6. Sungurpaşa hamamı tüteklik (solda) ve kurna (sağda) bölümü



Resim 3.7. Sungurpaşa hamamı sıcaklık kubbesinin iç ve dış görünümü

Diğer taraftan Sungurpaşa hamamının köyün merkezinde olmasına karşın bakımsızlıktan harabe bir hale dönüştüğü görülmüştür. Yapının sıcaklık bölümünde bulunan mermerlerin kırılarak yerlerinden söküldüğü, tromplarda bulunan testilerin bilinçsiz define avcılarının kurbanı olduğu ve yapının duvarlarının kazılarak özgünlüğünü yitirdiği belirlenmiştir. Yapının özgün yer döşemesi tespit edilmeye çalışılmış ancak üzerinde bulunan moloz ve çöp yığını nedeniyle mümkün olmamıştır. Ayrıca yapının iç ve dış kısımlarının yabani otlar ile kaplandığı ve bu otların yapı elemanlarına zarar vererek yapının bütününde çevresel koşulları ağırlaştırdığı tespit edilmiştir (Resim 3.1, 3.2).

3.1.2. Tarihi Sungurpaşa hamamından numune alınması ve kodlanması

Tarihi yapıda kullanılan harç teknolojisini belirlemek amacıyla, hamamın sıcaklık ve ılıklık mekanlarının kubbelerinde kullanılan özgün örgü harçlarından numune alınmıştır. Harç numunelerinin alındığı bölgeler fotoğraflanarak kroki üzerinde işaretlemeleri yapılmıştır. Harç numuneleri olabildiğince büyük parçalar halinde çıkarılmaya çalışılmış ve ardından etiketli olarak kilitli poşetlere konulmuştur. Laboratuvar ortamına getirilen numunelerin deney çalışmaları başlamadan önce kodlanarak ölçek verilmiş ve fotoğraflanmıştır (Resim 3.8). Yapıda meydana gelen insani ve çevresel tahribattan dolayı yapının bazı bölümlerinden özgün harç numuneleri alınamamıştır.

Deneye tabi tutulacak özgün örgü harç numunelerinin alındıkları yerler plan üzerinde gösterilmiştir (Bkz. Resim 3.3). Alınan numunelerin kodlanmasına bir örnek aşağıda verilmiştir:

Numune adı: S I K H 1-3
İlk harf: Hamam adı (S=Sungurpaşa)
İkinci harf: Mekan adı (I=Ilıklık, S=Sıcaklık)
Üçüncü harf: Yapı elemanı adı (K=Kubbe)
Dördüncü harf: Yapı malzemesinin adı (H=Harç)
Beşinci rakam: Numune numarası
Altıncı rakam: Beşinci rakamdaki harç numuneye ait kırılmış/parçalanmış numunelerin numarası



Resim 3.8. SIKH1 kodlu numune ve yapıdan alınan tuğlalı harç numunesi

Çalışma kapsamında tarihi hamam yapısından yapıya zarar vermeyecek şekilde birçok harç numunesi alınmıştır. Ancak deneysel çalışmanın sınırlandırılması amacıyla sadece ılıklık ve sıcaklık bölümlerinin kubbesinden alınan tuğla-tuğla arası harç numuneleri seçilmiştir. Belirlenen harç numuneleri üzerinde yapılan fiziksel, mekanik, kimyasal, mineralojik, mikroskobik ve petrografik deney sonuçları alt başlıklarla verilmiştir.

3.1.3. Özgün örgü harç deneyleri

Tarihi Sungurpaşa hamam yapısı ılıklık ve sıcaklık kubbelerinde kullanılan tuğla-tuğla arası örgü harçları üzerinde fiziksel, mekanik, kimyasal ve mikro yapı analizleri yapılmıştır.

Özgün örgü harçları üzerinde yapılan fiziksel, mekanik ve kimyasal analizler ODTÜ Mimarlık Fakültesi Malzeme Koruma laboratuvarlarında, ince kesit ve SEM-EDS analizi Maden Tetkik Arama Genel Müdürlüğü Mineralojik Analizler laboratuvarları ile Hacettepe Üniversitesi Yer Bilimleri Araştırma Merkezi laboratuvarlarında gerçekleştirilmiştir.

Özgün örgü harçlarının fiziksel özellikleri

Tarihi hamam yapısından alınan harç numuneleri üzerinde yoğunluk, porozite ve su emme gibi farklı fiziksel deneyler gerçekleştirilmiştir.

Birim hacim ağırlık, toplam porozite ve su emme oranının belirlenmesi

Toplam porozite, malzemedeki boşluk hacminin toplam hacime oranıdır. Bir malzemenin porozitesi ve boşluk boyutu dağılımı malzemenin durabilite özellikleri hakkında bilgi vermektedir. Harçların içindeki boşluk boyutu dağılımı ile küçük ve büyük boşlukların varlığı, malzemenin çevresel aşınma şartlarına karşı performansı konusunda önemli bir rol oynamaktadır [127].

Numuneler fiziksel özelliklerinin belirlenmesi için öncelikle 40°C de sabit sıcaklığa gelene kadar kurutulmuştur(m_k) (Resim 3.9). Daha sonra numuneler vakum altında suya doygun hale getirilerek Arşimet terazisinde hassas olarak tartılmıştır($m_{arş}$) (Resim 3.10). Numuneler üzerinde bulunan yüzey suyu ıslak bir bez yardımıyla alınarak harçların suya doygun ağırlıkları tartılmıştır(m_{sd}).



Resim 3.9. Özgün örgü harç numunelerin etüvde kurutulması





Resim 3.10. Vakum aleti ve Arşimet terazisi

Özgün örgü harç numunelerinin fiziksel özellikleri aşağıdaki denklemler kullanılarak belirlenmiştir [128].

Harçların birim hacim ağırlıkları aşağıda verilen formül kullanılarak hesaplanmıştır:

$$D = m_k/(m_{sd} - m_{arş}) \quad (3.1)$$

Burada;
D = Birim hacim ağırlık (g/cm^3)
m_k= Numunenin kuru ağırlığı (g)
m_{sd}= Numunenin suya doygun ağırlığı (g)
$m_{arş}$=Numunenin su içindeki ağırlığı (g)

Porozite (P, %) değerlerinin hesaplanmasında aşağıda verilen formül kullanılmıştır:

$$P = [(m_{sd} - m_k)/(m_{sd} - m_{arş})] \times 100 \quad (3.2)$$

Su emme oranı (SEO, %) ise aşağıda verilen formül kullanılarak hesaplanmıştır:

$$SEO = (m_{sd} - m_{arş})/ m_{arş} \quad (3.3)$$

Harçların fiziksel özellikleri Eş. 3.1-3.3'te verilen ve RILEM tarafından önerilen denklemler kullanılarak hesaplanmıştır.

Özgün örgü harçlarının mekanik özellikleri

Harç örneklerinin küçük boyutlarda olması nedeniyle basınç dayanım ölçümleri, uluslararası kaya mekaniği standartlarında belirtilen şekliyle nokta yükleme ölçümleri uygulanarak yapılmış, ultrasonik hız ölçümleri kullanılarak elastisite modülleri hesaplanmıştır.

Tek nokta yükleme deneyi

Harç numunelerin standart boyutta olmaması nedeniyle mekanik analizlerin yapılmasında nokta yük (point-load) deneyi kullanılmıştır. 30-85 mm arasında kalınlığa sahip olan düzensiz şekillerin basınç dayanımlarının hesaplanmasında kullanılan bu yöntemde, konik sivri uçlu nokta yük aletinin iki deney başlığı arasına yerleştirilen örnekler hidrolik el pompası ile verilen yükle kırılmış ve kırılan yük manometre üzerinden okunmuştur (Resim 3.11). Gerekli değerler okunarak düzeltilmemiş nokta yük indeksi ve numunelerin farklı kalınlıklarda olması nedeniyle "boyut düzeltme faktörü" yardımı ile düzeltilmiş nokta yük indeksi hesaplanmıştır [129-131]. Bazı numunelerin ölçüm için yeterli kalınlığa sahip olmamaları nedeniyle basınç dayanımları belirlenememiştir. Tek nokta yükleme dayanım hesapları aşağıda Eş. 3.4-3.8'de verilen denklemler yardımıyla hesaplanmıştır.

$$Is = P/De^2 \tag{3.4}$$

Burada;
Is: Düzeltilmemiş dayanım indeksi
P: Uygulanan yük (kN)
De: Numunenin düzeltilmiş kesiti (mm)

Düzeltilmemiş nokta dayanım indeksi ($Is_{(50)}$) hesaplanırken, öncelikle numunenin düzeltilmiş kesiti (De) ve ardından numune boyut düzeltme faktörü (F) aşağıdaki formüller yardımıyla hesaplanmıştır:

$$De = (4A/\pi)^{1/2} \tag{3.5}$$

$$Is_{(50)} = F \times Is \tag{3.6}$$

$$F = (De/50)^{0.45} \tag{3.7}$$

Burada A değeri, numunenin en kısa köşeler arası kesit uzunluğu ve F değeri numune boyut düzeltme faktörü olarak alınır. $Is_{(50)}$ değeri ise, düzeltilmemiş nokta dayanım indeksi olarak tanımlanmaktadır. Aşağıda verilen denklemde $Is_{(50)}$ değeri kullanılarak eksenel basınç dayanımı (UCS) değerleri hesaplanmıştır [129-131].

$$UCS = 10.6471 \times Is_{50} + 2.4736 \quad (3.8)$$



Resim 3.11. Tek nokta yükleme deney aleti

Ultrases geçiş hızı deneyi ve elastisite modülü

Önemli mekanik özelliklerden biri olan Elastisite Modülü (E_{mod}), bir malzemenin yükleme altında dayanabildiği gerilme/deformasyon oranı olarak tanımlanabilir. E_{mod} değerini hesaplayabilmek için numunelerin ultrasonik hız ölçümleri Pundit Plus aleti ve 220 KHz problar yardımıyla yapılmış, sonuçlar birim hacim ağırlığı değeri ile birlikte Eş. 3.9-3.10'da verilen denklemler kullanılarak hesaplanmıştır [128, 132].

$$V = l / t \quad (3.9)$$

$$E_{mod} = D*V^2(1+\upsilon)(1-2\upsilon)/(1-\upsilon) \quad (3.10)$$

Burada;

V: Ultrases geçiş hızı (m/s)
l: Problar arası mesafe (m)
t: Ultrases geçiş süresi (s)
E_{mod}: Elastisite modülü (MPa)

D: Birim hacim ağırlık (kg/m^3)

V: Poisson oranı

Yapı malzemelerinin poisson oranı 0,1 ile 0,5 aralığında bulunmaktadır. Tarihi yapı harçları yumuşak dokulu ve düşük birim hacim ağırlığa sahip oldukları için poisson oranı 0,18 olarak alınmış ve hesaplamalar yapılmıştır [130, 133]. Numunelerin denklemler kullanılarak hesaplanan eksenel basınç dayanım (UCS), ultrasonik hız (V) ve elastisite modülü değerleri Bölüm 4'te verilmiştir.

Bağlayıcı/agrega oranının belirlenmesi ve elek analizi

Harç matrisinde bulunan agrega ve bağlayıcı kısımların belirlenebilmesi için öncelikle numuneler 24 saat boyunca etüv içinde 55°C'de bekletilmiştir. Sabit ağırlığa ulaşan numuneler seyreltik hidroklorik asitte (%5 HCl) yaklaşık 5 saat bekletilmiştir [134]. Asitte çözünmeyen kısım 40 µm filtre kâğıdından saf su ile yıkanıp süzülerek silikatlı agrega kısmı elde edilmiştir (Resim 3.12).





Resim 3.12. Seyreltik asitte bekletilen numunelerin filtrasyonu ve kurutulması

Harcın asitte çözünmeyen ve filtre kağıdı üstünde kalan kısmı etüvde kurutulduktan sonra, 8; 4; 2; 1; 0,5; 0,25; 0,125 ve 0,063 mm açıklıklı kare delikli eleklerden elenmiş ve ağırlıkları hassas terazide tartılarak kaydedilmiştir (Resim 3.13).

Kaydedilen elek üstü kalan ağırlık değerleri kullanılarak özgün örgü harçlarının granülometri eğrisi çıkarılmıştır. Ayrıca toplam asitte çözünmeyen kısım, harcın etüv kurusu ağırlığından çıkarılarak ağırlıkça bağlayıcı/agrega (b/a) oranı tespit edilmiştir.



Resim 3.13. Agregaların eleklerden elenmesi ve sınıflandırılması

Suda çözünebilir tuzların analizleri

Özgün harçlarda bozulmalara neden olan tuzların, numunelerin içerisinde varlığının tespiti için klor, nitrat, sülfat ve karbonat iyonlarını belirleyen spot tuz analizleri yapılmıştır [135]. Tuzların tarihi yapılarda önemli miktarda bulunması, malzemelerin özgün fizikomekanik özelliklerinin değişip yıprandığına işaret sayılabilir.

Tuz analizi için 1 g harç örneği toz haline getirilmiş ve 200 μm elek altı numune üzerine 100 ml saf su konularak 1-2 saat bekletilmiş ve stok çözelti hazırlanmıştır. Daha sonra stok çözelti üzerinde kimyasal bileşikler yardımıyla spot testler uygulanarak tuz analizleri yapılmıştır.

Mikro yapı analizleri

Tarihi yapı onarımında kullanılacak malzeme ile özgün malzeme uyumunun belirlenmesi için, tarihi yapı inşasında kullanılmış olan ahşap, taş, tuğla, sıva ve harç gibi yapı malzemesi ve bileşenlerinin mikro yapısal özelliklerinin tanımlanması oldukça önemlidir. Mikro yapısal özellikler; ince kesit analizi, XRF (X-Ray fluoresans), XRD (X-Ray diffraction), SEM-EDS (Scaning electron microscope-Energy dispersive spectroscopy), TGA-DTA (Thermal gravimetric analysis – Diffrential thermal analysis) gibi ileri analiz teknikleri ile ortaya çıkarılmaktadır. Bu analiz teknikleri kullanılarak, özgün malzemenin mineralojik yapısı, elementel oksitleri, matris elemanlarının parçacık büyüklüğünü ve yapısal bozunumları hakkında bilgiler elde edilebilir.

İnce kesit analizi

Petrografik analiz, harç ve sıva numunelerinin bağlayıcının genel özellikleri, gözeneklilik, agrega dokusu ve mineralleri belirlemeye yardımcı olan bir yöntemdir. Özgün örgü harç numunelerine ait ince kesit hazırlık işlemleri MTA Genel Müdürlüğü Mineralojik Analizler laboratuvarlarında yapılmış ve Leica MC-072 polarize mikroskop cihazında ince kesit görüntüleri elde edilmiştir.

XRD analizi

Bu yöntem, minerallerin kristal kafeslerindeki yapı taşları (atom, iyon veya molekül) arası uzaklıkların X ışınları ile ölçülmesi esasına dayanmaktadır. XRD tekniği, toz haline getirilen malzemenin mineral bileşimi ve özellikle kil minerallerinin ve polarizan mikroskop altında küçük boyutları nedeniyle görülemeyen veya tanımlanamayan minerallerin tanımlanmasında kullanılan, seri ve güvenilir bir yöntemdir [136].

XRD analizleri ODTÜ Malzeme Koruma Laboratuvarları ve Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Malzeme ve Metalurji Mühendisliği. Bölümü laboratuvarlarında bulunan Brüker D8 Advance marka X-Ray difraktometre cihazlarında yapılmıştır (Resim 3.14). XRD cihazlarında 40 kV, CuKα (λ=1.54 A°) ışıması yaptırılarak 2Θ:3°-70° tarama aralığı kullanılmıştır. Özgün harç numuneleri etüvde kurutulduktan sonra seramik havanda öğütülerek 200 μm elekten elenmiştir. Elek altında kalan toz numune üzerinde yapılan XRD analizi ile numunelerin mineralojik yapıları belirlenmiş ve difraktogramlar dördüncü bölümde verilmiştir.



Resim 3.14. Mineralojik analizde kullanılan X-ışınları cihazı

SEM–EDS (EDX) analizi

SEM-EDS analizi, harç numunelerinin morfolojisi, mikro yapısı ve kimyasal kompozisyonun tanımlanması için kullanılan bir enstrümantal analiz yöntemidir. Taramalı elektron mikroskobu (SEM), analizi yapılacak numunenin yüzeyine yüksek enerjili elektron ışınları yayarak numuneyi görüntüleyen bir elektron mikroskobudur.

Elektron mikroskobu görüntü analizleri ile beraber EDS/EDX (Enerji Dağılımı X- Işını Spektroskopisi) ile bir numunenin element bileşenlerini analiz ederek kimyasal karakterizasyonunda kullanılan bir tekniktir. Element analizleri numuneye gönderilen X ışınlarını belirleyebilmek için eğer enerji ölçümü yapılıyorsa bu sisteme EDS analizi, eğer dalga boyu ölçülerek tanımlanabiliyorsa da WDS (Dalgaboyu dağılım spektroskopisi) analizi denilmektedir.

Harç numunelerinin SEM-EDS analizleri MTA Genel Müdürlüğü, Mineraloji ve Petrografi laboratuvarları ile Hacettepe Üniversitesi Yerbilimleri Araştırma ve Uygulama Merkezi laboratuvarlarında gerçekleştirilmiştir. SEM analizlerinde hassas veriler elde edebilmek için numune yüzeylerine altın-paladyum kaplaması yapılmıştır. Yüksek vakum koşulları altında numune yüzeyinden ikincil elektron (SE) ve geri saçılmış elektron (BSE) sinyal görüntüleri

alınarak fotoğrafları çekilmiştir. Analizlerde FEI Quanta 400 MK2 SEM-EDS (x300.000 büyütme) analiz cihazı kullanılmıştır (Resim 3.15).



Resim 3.15. SEM-EDS cihazı ve kontrol ünitesi

3.2. Alternatif Onarım Harcı Ön Deneme Karışımları

Sungurpaşa tarihi hamamı özgün örgü harçları ve hamamın inşasına yakın dönemdeki tarihi yapıların örgü harcı özellikleri incelenmiştir. Yapılan deneysel ve literatür araştırma sonuçları değerlendirilerek çok sayıda ön deneme karışımı hazırlanmıştır.

Ön deneme karışımlarında kullanılmak üzere Ankara'da faaliyet gösteren AKYÜZ Kireç Ltd. Şti. firmasından yaklaşık altı ay dinlendirilmiş olan kaymak kireç kullanılmıştır. Karışımda kullanılacak agreganın, özgün örgü harcı ile uyumlu bir tane boyu dağılımına sahip olması istenmiştir. Bu sebeple yaklaşık 5 agrega ocağından agrega numuneleri alınmış ve elek analizleri yapılmıştır. Alternatif onarım harcı için en uygun gradasyonlu agrega, Ankara ili KahramanKazan ilçesinde Ovacıkçayı bölgesinden elde edilen agregalardan elde edilmiştir.

Deneme harç karışımları laboratuvar ortamında ve otomatik mikser yardımıyla yapılarak üçlü prizmatik çelik kalıplara yerleştirilmiş ve kalıptan çıkarıldıktan sonra 28. gün sonuna kadar bağıl nemi %70 ve ortam sıcaklığı 20°C olan laboratuvar ortamındaki nem kabinlerinde bekletilmiştir.

Ön deneme harç numunelerinin deneysel verileri incelendiğinde;

- Sertleşmiş harcın birim hacim ağırlığının 1,3-1,65 g/cm^3 arasında değiştiği,
- Taze harç karışımında kaymak kireçten kaynaklı su miktarının fazla olmasının, hacimsel büzülmeyi olumsuz olarak etkilediği, (Bazı serilerde % 13'e kadar)
- Harçtaki agrega miktarının artışıyla büzülmenin azaldığı,
- Agrega miktarındaki artış ile phenolphthalein çözeltisi ile belirlenen karbonatlaşma derinliğinin arttığını söyleyebiliriz.

3.3. Alternatif Onarım Harçları ve Deneysel Çalışma

Tarihi yapıdan alınan özgün harçların incelenmesi ve literatür bilgileri ile ön deneme harçlarından elde edilen veriler değerlendirilerek alternatif onarım harçları için iki farklı b/a oranı seçilmiştir. Ağırlıkça 1/1 ve 1/3 b/a oranlarına agrega ağırlığının %10, %20 ve %30'u kadar puzolanik malzeme eklenerek 14 seri alternatif onarım harcı üretilmiştir. Alternatif onarım harçları üzerinde fiziksel, mekanik, kimyasal, termal ve mikro yapı analizleri uygulanmıştır.

3.3.1. Kullanılan malzemeler ve oranların belirlenmesi

Alternatif onarım harcı üretiminde kullanılan malzemeleri; bağlayıcı, puzolan, agrega ve karışım suyu olarak sıralayabiliriz. Her bir b/a grubunda agreganın ağırlıkça %10, %20 ve %30'u oranlarında diyatomit (D) ve tuğla tozu (T) puzolanik malzemeleri kullanılmıştır. Toplamda 14 seri onarım harcı üretilmiş ve deney günleri 28, 56 ve 90 gün olarak seçilmiştir. Onarım harcı karışımında kullanılan b/a oranı, su/bağlayıcı (s/b) oranı ve yayılma değerleri Çizelge 3.1'de verilmiştir.

Onarım harcı karışımlarında harcın işlenebilirliği ön planda tutularak yayılma tablası değerleri 160±10 mm olacak şekilde sabit tutulmuştur. Yayılma değerinin sabit tutulması su miktarını ayarlayarak sağlanmıştır.

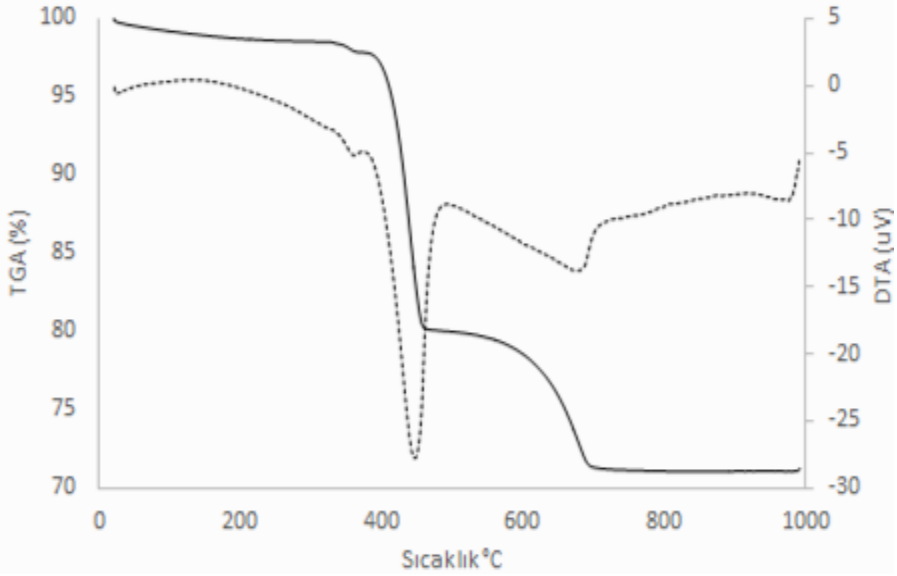
Çizelge 3.1. Onarım harçlarının ağırlıkça karışım oranları, su/bağlayıcı (s/b) oranları ve yayılma deneyi sonuçları

Harç Tipi	Kireç	Agrega	T	D	s/b	Yayılma Değeri (cm)
K1	1	1			0,94	16
K1D1	1	1		0,1	1,1	16
K1D2	1	1		0,2	1,19	16
K1D3	1	1		0,3	1,29	16
K1T1	1	1	0,1		1	16,5
K1T2	1	1	0,2		1,01	16
K1T3	1	1	0,3		1,03	16
K3	1	3			1,04	16
K3D1	1	3		0,3	1,38	16
K3D2	1	3		0,6	1,82	16
K3D3	1	3		0,9	2,14	16
K3T1	1	3	0,3		1,17	16,5
K3T2	1	3	0,6		1,23	16
K3T3	1	3	0,9		1,25	16

Bağlayıcı

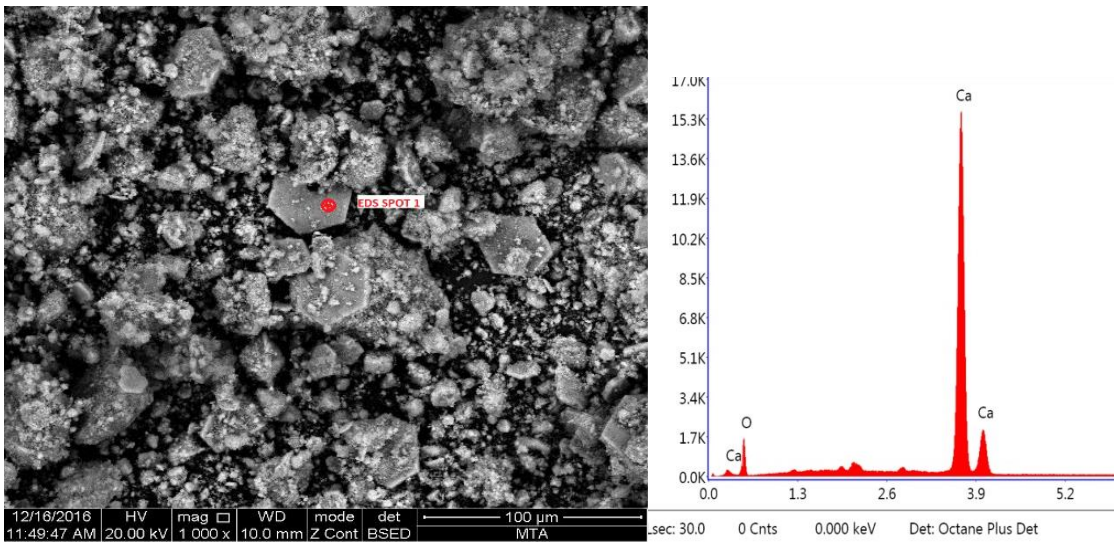
Özgün örgü harçlarının XRD difraktogramları incelendiğinde, yüksek kalsiyumlu saf kireç kullanıldığı belirlenmiş ve onarım harcı için piyasada bulunan sönmüş toz kireçler araştırılmıştır. Yapılan kireç araştırmaları sırasında ülkemizde yüksek kalsiyumlu kirecin nadir olarak üretildiği, ancak TS EN 459-1 sınıflandırmasında CL 80S kodlu toz kirecin daha fazla üretildiği görülmüştür. Onarım harcı üretiminde bağlayıcı olarak kullanılan CL 90S kodlu sönmüş toz kireç (K), KİMTAŞ KİREÇ SAN. TİC. A.Ş.'nin Bartın'da bulunan BARKİSAN Kireç tesislerinden 25 kg'lık torbalar halinde temin edilmiştir. Karışımda kullanılan toz kireç ile ilgili deneysel veriler Çizelge 3.2'de verilmiştir.

Sönmüş toz kirece ait TGA-DTA eğrisi Şekil 3.1'de yer almaktadır. Kirecin TGA eğrisi incelendiğinde, toplam kütle kaybının %29 olduğu ve iki aşamalı bir dekompozisyon gerçekleştiği görülmektedir. 35°C ile 350°C arasında meydana gelen kütle kaybı absorplanan fiziksel su ve organik bileşenlerin yapıdan ayrılmasıyla gerçekleşmiştir. 390°C civarında meydana gelen kütle kaybının $Mg(OH)_2$'in dehidroksilasyonu, 400-500°C ve 580-700°C arası kütle kayıplarının ise sırasıyla $Ca(OH)_2$'in ve $Ca(CO)_3$'ın dekompozisyonu sonucu meydana geldiği düşünülmektedir.



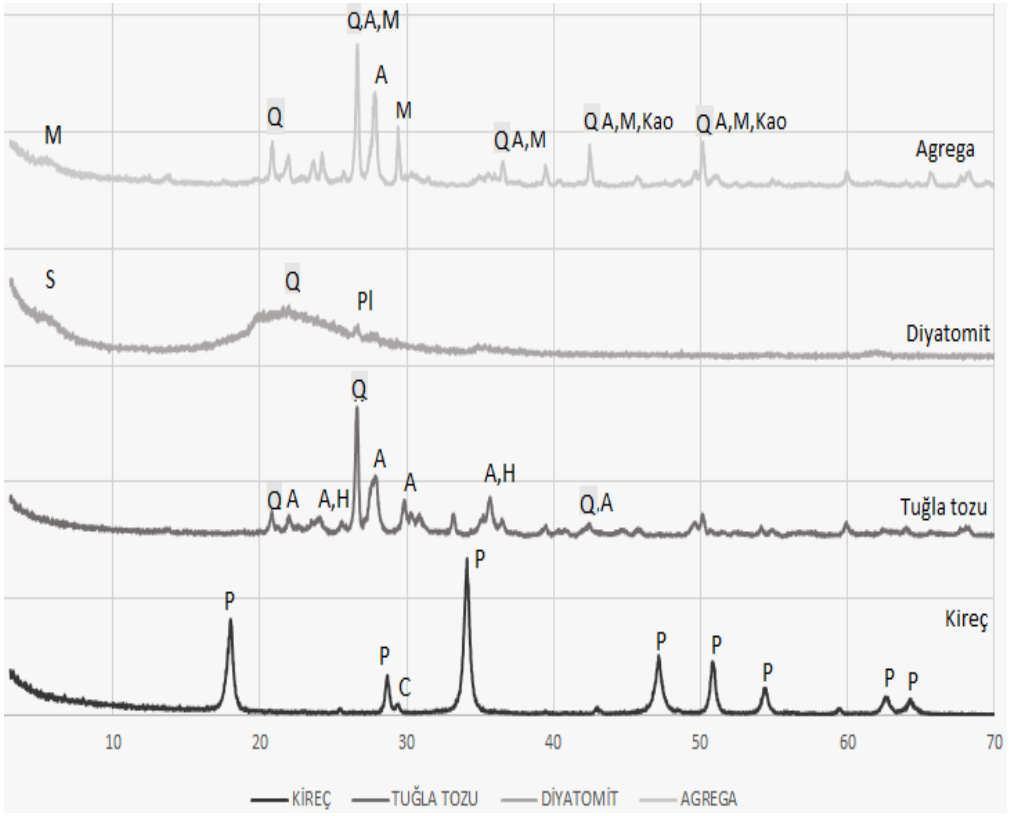
Şekil 3.1. Sönmüş toz kirece ait TGA-DTA termogramı

Sönmüş toz kirecin mikro görüntülerinde hekzagonal yapıdaki portlanditler belirgin olarak görülmektedir (Resim 3.16). Hekzagonal yapının bir kenarının yaklaşık uzunluğu 25 µm ve taneciklerin uzunluğu yaklaşık 5-55 µm arasındadır. Kirecin EDS ile yapılan kimyasal kompozisyonunda %93 $Ca(OH)_2$ ve %2 MgO içerdiği belirlenmiştir. Analiz sonucunda ortaya çıkan yüksek oranda Ca içeriği ile bu kirecin özgün harç kireci ile hemen hemen aynı saflıkta bir kireç olduğunu söylenebiliriz.



Resim 3.16. Sönmüş toz kirecin x1000 büyütmeli SEM-EDS görüntüsü

Sönmüş toz kirece ait X-ışınları difraktogramı Şekil 3.2'de verilmiştir. Difraktogram incelendiğinde, toz kirecin yüksek oranda portlandit ve az miktarda kalsit minerallerinden oluştuğu görülmektedir. Difraktogram üzerinde portlandit mineralleri 2,63 A°; 4,92 A° ve 1,93 A° piklerinde tanımlanmıştır.



Şekil 3.2. K, D, T ve agregaya ait X-ışınları difraktogramları (A:Albit, C:Kalsit, H:Hematit, Kao:Kaolin, M:Montmorillonit, P:Portlandit, Pl:Plajioklas, S:Smektit, Q:Kuvars)

Puzolan

Onarım harcı üretiminde puzolanik malzeme olarak diyatomit (D) ve tuğla tozu (T) kullanılmıştır. Çalışmada kullanılan D, Ankara-Kızılcahamam yöresinden temin edilmiştir. T ise Çorum ilinde özel üretim imalat yapan harman tuğlalarından elde edilmiştir. Puzolanlar laboratuvar ortamında çeneli kırıcıda kırılarak yaklaşık 1 cm iriliğine getirilmiş ve ardından etüvde kurutulduktan sonra bilyalı değirmende öğütülmüştür. Öğütülen puzolanların incelik değerleri, 90 mikronluk elek üzerinde en fazla %5 malzeme kalacak şekilde ayarlanmıştır. Puzolanların ve kirecin kimyasal ve fiziksel özellikleri Çizelge 3.2'de verilmiştir.

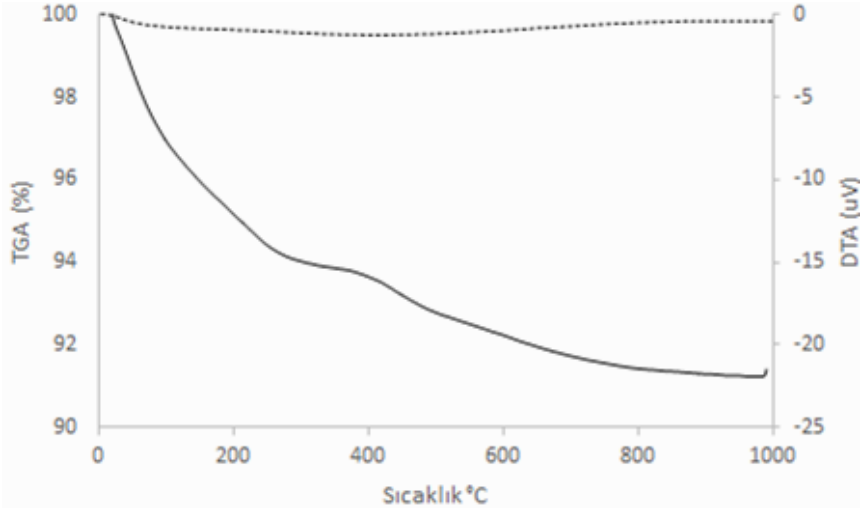
Çizelge 3.2. Kireç ve puzolanların kimyasal ve fiziksel özellikleri

Oksit (%)	Kireç	D	T
SiO_2	-	88.52	58.55
Al_2O_3	-	3.35	16.51
Fe_2O_3	<0.03	0.48	7.95
CaO	94.3	0.56	3.58
MgO	1.80	0.43	0.15
Na_2O	0.21	0.65	1.00
K_2O	-	0.51	2.40
SO_3	0.3	-	-
CO_2	2.5	-	-
TiO_2		0.14	0.88
H_2O	0.6	-	-
Kızdırma Kaybı	-	5.03	0.92
Yoğunluk (g/cm^3)	2.15	1.95	2.65
Blaine (cm^2/g)	7471	6443	5361

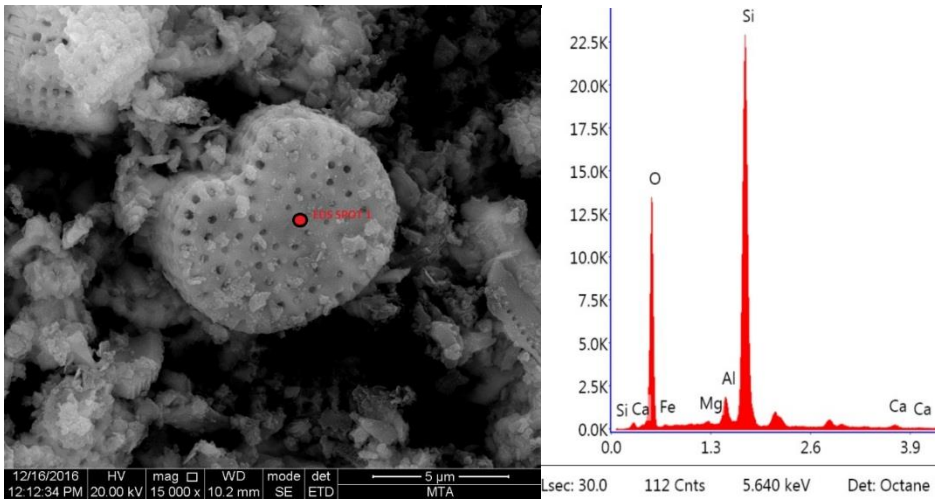
X-ışınları difraktoramına göre diyatomitin ana mineralleri (Şekil 3.2), kuvars ve smektit ile plajioklastan oluşmaktadır. Difraktogramda, malzemenin 20-30Ɵ arasındaki eğri ile amorf yapıda olduğunu kanıtlar nitelikte ve ana fazın amorf silika olduğunu göstermektedir. Kızılcahamam yöresine ait diyatomitlerle yapılan çalışmalarda, bu amorf yapının kuvvetli bir puzolanik malzeme olduğuna işaret etmektedir [137].

Diyatomitin Resim 3.17'de verilen x15.000 büyütmeli SEM görüntüsü ve nokta EDS analizi sonuçlarına göre, diyatomit tanelerinin boyları ortalama olarak 10µm civarındadır. Taneciklerin içinde sanki bir filtreyi andıran 1µm den ufak boşluklar bulunmaktadır. Diyatomit taneciklerinin büyük bir kısmı dairesel süzgeç şeklinde olmakla birlikte bir kısmı da değirmende öğütülürken şekilleri bozularak parçalanmış durumda bulunmaktadır.

Dairesel formdaki diyatomit taneciklerinin bazıları kalp şeklinde veya şekilsiz olarak da görülmektedir. Ayrıca EDS elementel kimyasal analiz değerleri incelendiğinde, bileşimin büyük bölümünde silisyum ile az miktarda alüminyum ve magnezyumun varlığından söz edilebilir. TGA-DTA analizlerinde fiziksel ve kristal suyun dekompozisyonu dışında önemli bir endotermik pike rastlanmamıştır (Şekil 3.3).

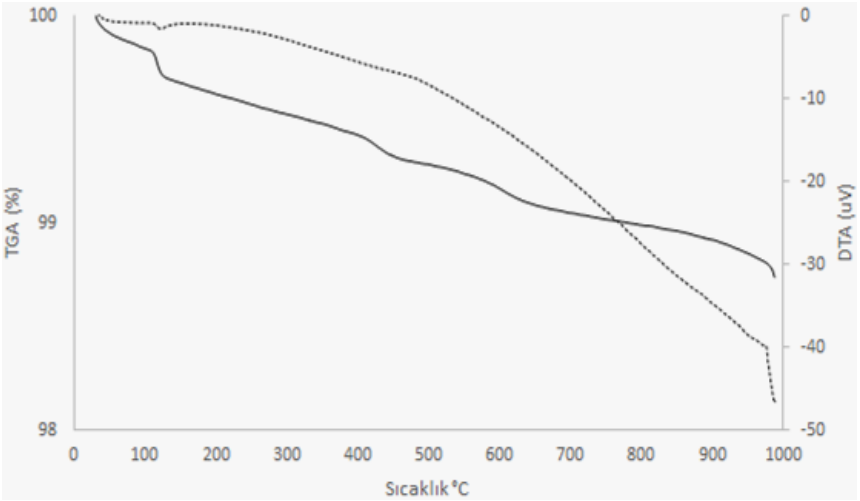


Şekil 3.3. Ankara/Kızılcahamam yöresi diyatomiti TGA-DTA termogramı

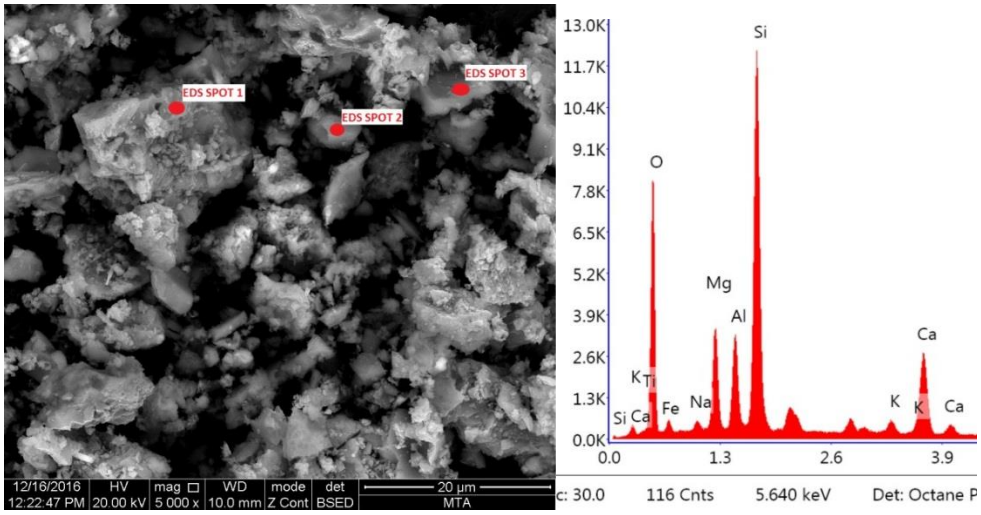


Resim 3.17. Diyatomitin x15 000 büyütmeli SEM-EDS görüntüsü

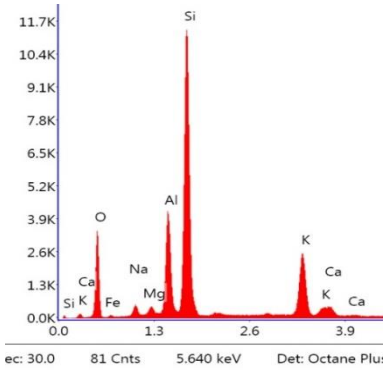
Tuğla tozunun X-ışınları difraktogramı incelendiğinde, tuğlaların temel olarak kuvars, albit ve az miktarda hematit (demir oksit) minerallerinden oluştuğu gözlenmiştir. Tuğla malzemesinin X-ışınları analizinde kil minerallere rastlanmamıştır. Ayrıca onarım harçlarında kullanılan tuğlaların 20-30° 2Θ arasında ortaya çıkan bir eğri bulunmamaktadır. 20-30° 2θ aralığında görülen eğri çizgi, kil minerallerinin yapısındaki kimyasal suyun kaybolmasından sorumlu amorf materyallerin bulunduğuna işarettir [138].



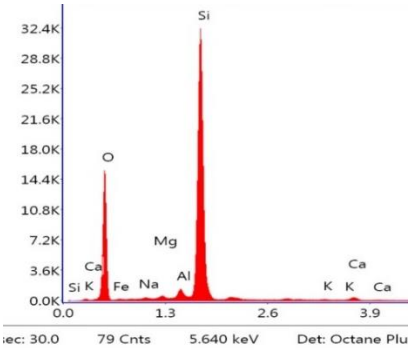
Şekil 3.4. Tuğla tozuna ait TGA-DTA termogramı



EDS SPOT 1



EDS SPOT 2



EDS SPOT 3

Resim 3.18. Tuğla tozunun x5 000 büyütmeli SEM-EDS görüntüleri

Tuğla tozuna ait Şekil 3.4'te verilen ve 1000°C ısıtmayla elde edilen TGA-DTA eğrisinde 100°C'de oluşan fiziksel su kaybı dışında önemli bir faz değişimi gözlenmemiştir. Toplam kütle kaybı yaklaşık %1,1 olarak belirlenmiştir. Resim 3.18'de verilen SEM-EDS görüntülerinde, tuğla tozunun farklı boyutlarda ve keskin köşeli bir yapıda olduğu görülmektedir. Elementel analiz kompozisyonu sonuçlarına göre; Si, Al, Ca ve K elementlerinin Na, Fe ve Ti elementlerinden daha fazla olduğu tespit edilmiştir.

Puzolanik aktivitenin belirlenmesi

Onarım harçlarında kullanılan puzolanların, aktivite deneyleri iki yöntemle belirlenmiştir. Birinci yöntemde, puzolanların aktiviteleri TS 25 standardına göre mekanik dayanım ölçümleri ile belirlenmiştir. Puzolanik aktivite deneyinde harç numuneleri TS EN 196-1'e göre hazırlanmış ve 160x40x40 mm boyutlarında harç kalıpları kullanılmıştır [139]. Hazırlanan üç adet deney numunesi 7 gün sonra eğilme ve basınç dayanımı deneylerine tabi tutulmuştur. Elde edilen dayanım değerleri ve standart değerler Çizelge 3.3'te verilmiştir. Mekanik dayanım sonuçları incelendiğinde, diyatomitin güçlü bir puzolanik etkiye sahip olduğu, ancak tuğla tozunun ise standart değerlerin altında kaldığı ve puzolanik aktivitesinin zayıf olduğu belirlenmiştir.

Çizelge 3.3. Puzolanik aktivite deney sonuçları

Puzolan	Eğilme dayanımı (MPa)	Basınç dayanımı (MPa)
Diyatomit	-	8,7
Tuğla tozu	-	3,0
TS 25 sınır değeri	≥1	≥4

Puzolanların aktivitelerinin belirlenmesi için kullanılan ikinci yöntem, elektriksel iletkenlik ölçümü yöntemidir. Bu yöntemde puzolanların $Ca(OH)_2$ tüketimi derecesi, doymuş portlandit çözeltisi kullanılarak belirlenmektedir. Elektriksel kondüktivite ölçümüyle belirlenen doymuş çözeltideki Ca^{2+} konsantrasyonunun azalması, Luxan ve arkadaşlarının tespit etmiş olduğu sınıflandırma ile karşılaştırılarak ifade edilir (Çizelge 3.4) [140].

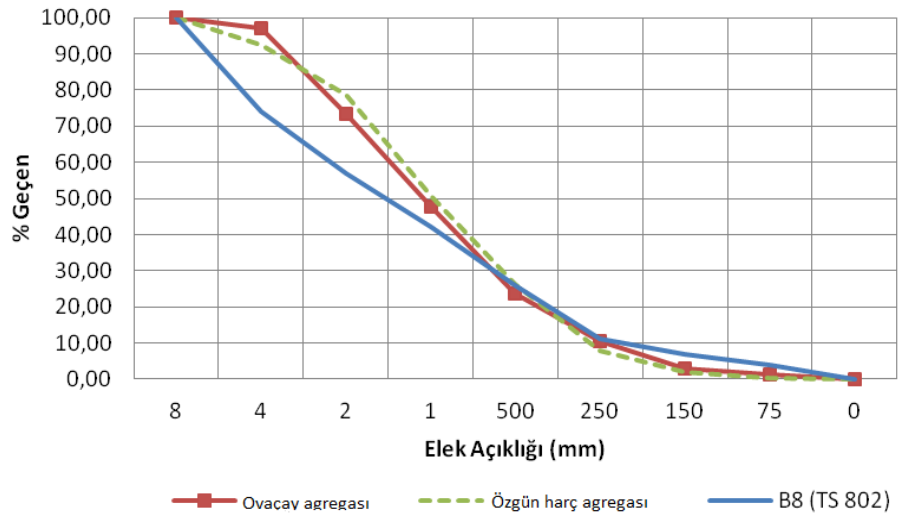
Çizelge 3.4. Elektriksel yöntemle puzolanik aktivitenin değerlendirilmesi

Puzolan sınıflandırması	Elektriksel kondüktivite değerleri (mS/cm)
Puzolan değil	<0,4
Zayıf puzolan	0,4 -1,2
Güçlü puzolan	>1,2

Kondüktometre deney aleti yardımıyla yapılan ölçümlerin sonucunda doymuş $Ca(OH)_2$, diyatomit ve tuğla tozunun elektriksel iletkenlikleri sırasıyla 7,367; 4,250 ve 7,094 mS/cm olarak elde edilmiştir. Puzolanların ve doymuş $Ca(OH)_2$'in elektriksel iletkenlik farklarına göre, diyatomitin oldukça güçlü bir puzolan olduğu, ancak tuğla tozunun puzolanik açıdan zayıf olduğu sonucuna varılmıştır.

Agrega

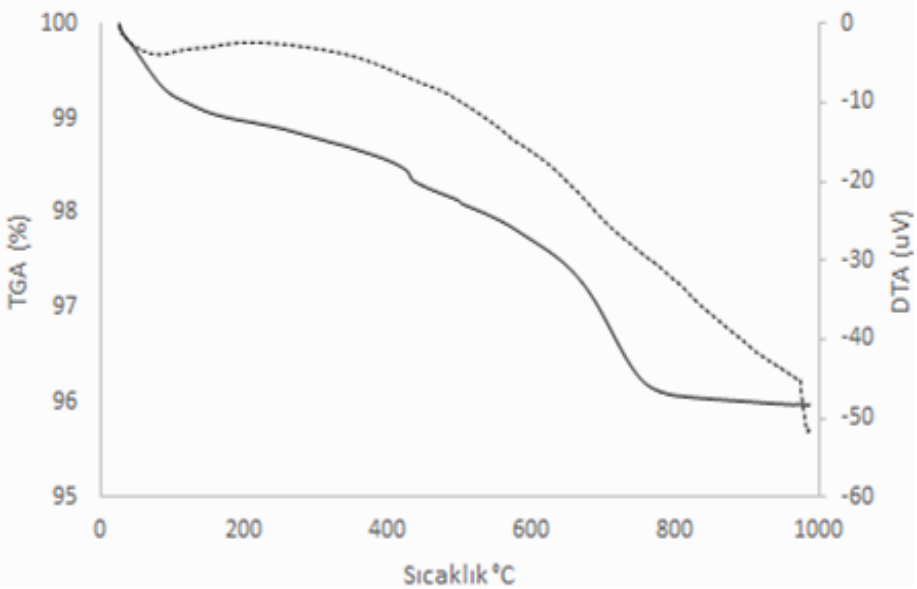
Onarım harcı üretiminde maksimum tane boyutu 8 mm olan silis esaslı dere agregası kullanılmıştır. Ankara ve çevre illerde bulunan kum ocaklarından numuneler alınarak özgün harç ile tane dağılımı, renk ve şekilsel uyumlulukları incelenmiştir. En uygun özellikleri Ankara/Kahramankazan Ovaçay yöresinden elde edilen silisli dere agregası sağlamıştır. Ovaçay dere agregası, geometrik olmayan şekilli bir tür doğal silis agregasıdır (Resim 3.20). Onarım harcında kullanılacak dere agregası ile özgün harç agregası ve standartta belirtilen B8 grubu agreganın tane dağılımı eğrisi Şekil 3.5'te verilmiştir. Agregaya ait termogram grafiği ise Şekil 3.6'da gösterilmiştir.



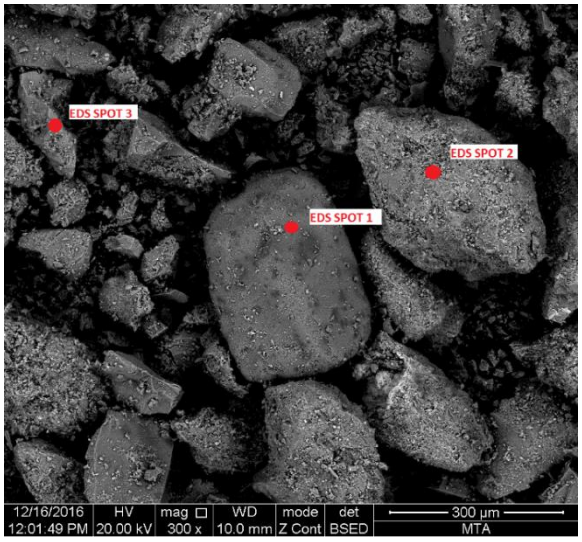
Şekil 3.5. Özgün harç ve onarım harcı agregası ile B8 agregalarının granülometri eğrileri

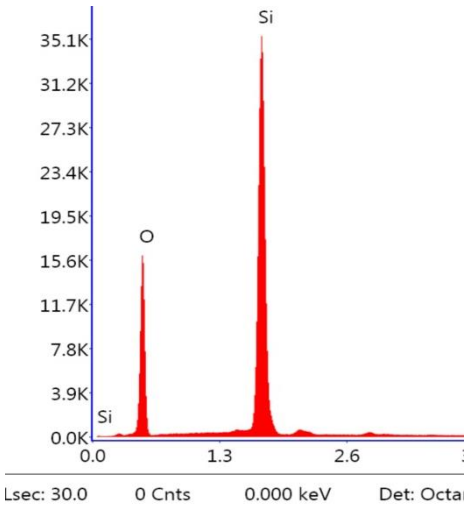
Toz haline getirilerek 150 µm elek altında kalan agregalar üzerinde yapılan XRD analizinde, kuvars, albit ve kil grubu minerallerden montmorillonit ve kaolin mineralleri gözlenmiştir (Şekil 3.2). Agreganın termal gravimetrik analizinde toplam kütle kaybı %4 olarak belirlenmiştir (Şekil 3.6). 100°C'de meydana gelen %1'lik ağırlık kaybı fiziksel suyun buharlaşması sonucudur. 680-780°C arasında meydana gelen %1,6'lık ağırlık kaybı ise kil grubu minerallerin faz dönüşümüne işaret etmektedir [141].

Dere agregasına ait Resim 3.19'da yer alan SEM görüntüleri, boşluksuz ve kompakt bir yapı ile çoğu köşeli olan taneler içermektedir. EDS1 analizinde kuvars tanesi, EDS2'de sodyum feldspat ile EDS3 analizinde kalsiyum alüminyum silikatlı bir mineral tespit edilmiştir. Ayrıca agregaların EDS ile yapılan kimyasal kompozisyon analizinde yüksek oranda Si, Al, Ca ve Mg içerdiği de belirlenmiştir.

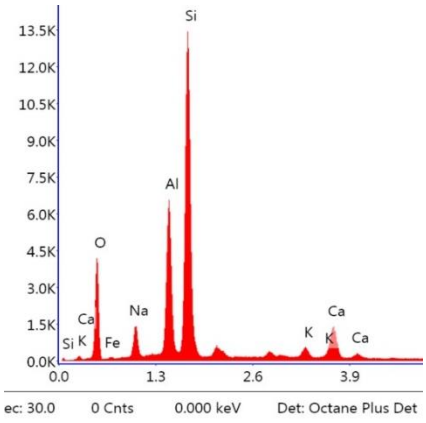


Şekil 3.6. Kahramankazan/Ovaçay yöresi dere agregasının TGA-DTA termogramı

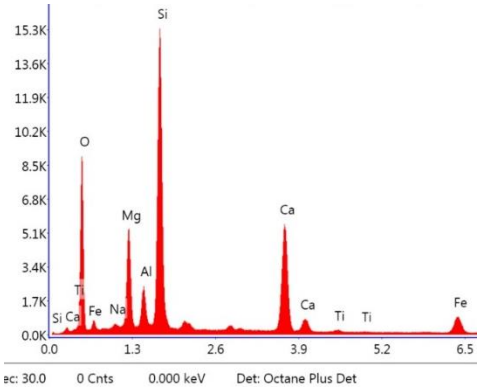




EDS 1



EDS 2



EDS 3

Resim 3.19. Ovaçay agregasının x300 büyütmeli SEM ve EDS görüntüleri



Resim 3.20. Kahramankazan-Ovaçay dere agregası görsel granülometrisi

Karışım suyu

Onarım harcı karışımlarında karışım suyu olarak Ankara/Yenimahalle şehir şebeke içme suyu kullanılmıştır.

3.3.2. Onarım harçlarının hazırlanması

Harç üretiminde kullanılacak ince agrega, kireç ve puzolanik malzemeler gerekli tane boyutuna getirildikten sonra karışıma girmeden önce etüvde 105°C ± 2°C sıcaklıkta 24 saat süreyle kurutulmuştur. Harç üretimine hazır hale getirilen malzemeler karışım gününe kadar hava ile temas etmeyecek şekilde ağzı kilitli poşetlerde laboratuvar ortamında korunmuştur.

Karışıma girecek agregalar arasında homojenliğin sağlanması için, TS EN 932-1'deki çeyrekleme metodu uygulanmıştır (Resim 3.21) [142].



Resim 3.21. Kazan-Ovaçay agregasının çeyrekleme metoduyla bölünmesi

Onarım harcı deney numunesi boyutları, üretimi ve bakımı

Laboratuvar ortamında üretilen kireç harçlarının kalıpta kalma süreleri ile ilgili mevcut bir standart bulunmamaktadır. Bu sebeple kireç harçlarıyla ilgili önceden yapılmış çalışmalarda kullanılan kalıp gün sayıları ile ön deneme karışımı deneylerinden elde edilen tecrübelerden faydalanılmıştır. Bu bilgiler ışığında onarım harçlarının kalıpta kalma süresi 5-6 gün olarak belirlenmiştir.

Onarım harçlarında basınç dayanımı, karbonatlaşma ve rötre deneyleri için 40x40x160 mm olan prizmatik kalıplar kullanılmıştır (Resim 3.22). Su buharı geçirimliliği deneyi kalıpları yaklaşık 50 mm çapında ve 10 mm kalınlığındaki PVC yağmur suyu borusundan kesilerek elde edilmiştir. Ayrıca tüm serilerde onarım harçları ile tuğla malzemenin ara yüz incelemesi için 35 mm çapında ve 60 mm boyunda silindirik numune kapları kullanılmıştır. Bu işlem için 10x10x55 mm boyutlarında tuğla parçaları numune kabının ortasına yerleştirilmiş ve etrafı onarım harcı ile doldurulmuştur.




Resim 3.22. Prizmatik çelik numune kalıpları ve harç mikseri

Harç karışımlarının hazırlanmasında ilk olarak kireç, agrega ve puzolanik malzeme kuru olarak karıştırılmış ve ardından karışım suyu eklenmiştir. Harç karışımlarında homojenliğin sağlanması için Hobart marka manüel mikser yardımıyla karışım 1 dk karıştırılmış ve mikser durdurularak mikser kabı spatula ile harmanlanmıştır. Ardından orta devirde yaklaşık 3 dk daha karıştırılmıştır. Hazırlanan harç karışımları yayılma tablası ve birim hacim ağırlık deneylerinin ardından kalıplara iki tabaka halinde ve her tabakada 10 kez şişleme işlemi yapılarak yerleştirilmiş ve üzerleri mala yardımıyla tesviye edilmiştir (Resim 3.23).




Resim 3.23. Onarım harçlarının çelik kalıplara yerleştirilmesi ve deney kalıp seti

Onarım harçlarının kalıplara dökümünün hemen ardından ortam sıcaklığı 20°C ±2°C ve bağıl nemi %70-75 olan kür kabinlerine konulmuştur. Kür kabinleri yaklaşık 40x60x120 cm boyutlarında ve numunelerin hava ile temasını kesmek için naylon örtülü ahşap çerçeveden imal edilmiştir (Resim 3.24). Dört adet kür kabini üretilmiş ve deney gününe kadar her kabinin ortamı dijital sıcaklık ve nemölçerler ile kontrol altında tutulmuştur.



Resim 3.24. Onarım harçları için özel üretilmiş olan kür kabini

3.3.3. Onarım harçları üzerinde yapılan deneyler

Deneme ve onarım harçlarının üretimi Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Yapı Malzemeleri laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Onarım harçlarının fiziksel, kimyasal ve mekanik özellikleri aynı laboratuvarda, TGA-DTA ve XRD analizleri Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü laboratuvarında, SEM-EDS analizleri Maden Tetkik Arama Mineralojik Analizler laboratuvarında yapılmıştır.

Taze harçların kıvam tayini-yayılma tablası ve birim hacim ağırlık deneyi

Üretilen taze onarım harçlarına TS EN 1015-3 standardına uygun olarak yayılma tablası deneyi uygulanmıştır [143]. Yayılma tablasına ait kesik huni iki kademede doldurulmuş ve her kademeye 10’ar vuruş yapılmıştır. Sarsma tablası 15 defa düşürülmek suretiyle harçların

yayılma çapları cm olarak ölçülmüştür. Ayrıca 35 cm^3 hacminde numune kabına taze harç numuneleri iki kademede şişleme işlemi uygulanarak doldurulmuş ve taze harcın birim hacim ağırlıkları tespit edilmiştir. Yayılma tablası ve taze harç birim hacim ağırlık deney görselleri Resim 3.25'te verilmiştir.



Resim 3.25. Yayılma tablası deneyi ile taze harcın birim hacim ağırlık deneyi

Sertleşmiş harç özelliklerinin belirlenmesi

Puzolan katkılı ve katkısız tüm onarım harçlarının 28 gün, 56 gün ve 90 gün yaşlarında fiziksel, mekanik ve mikro yapı incelemeleri yapılmıştır. Fiziksel özellik olarak; birim hacim ağırlık, porozite, su emme, rötre, ultrases hız ölçümü ve su buharı geçirimliliği deneyleri yapılmıştır. Mekanik özellik olarak ise harçların basınç dayanımları belirlenmiştir. Ayrıca onarım harçlarına XRD, SEM-EDS ve DTA-TGA analizleri uygulanmıştır.

Sertleşmiş onarım harcının fiziksel özelliklerinin belirlenmesi

Onarım harçları üzerinde 28, 56 ve 90 gün yaşlarında birim hacim ağırlık, porozite, ağırlık değişimi, su emme, rötre, ultrasonik hız ölçümü ve su buharı geçirimliliği deneyleri yapılmıştır.

Birim hacim ağırlık, porozite ve su emme deneyleri

Onarım harçlarının fiziksel özellikleri, dayanım deneylerinden kalan parça harçlar üzerinde 28, 56 ve 90 gün yaşlarında TS EN 1015-10 ve TS EN 1936 standartlarına uygun olarak belirlenmiştir [144, 145]. Fiziksel özelliklerin belirlenmesi için öncelikle numuneler 60°C

sıcaklığa sahip etüvde sabit kütleye ulaşıncaya kadar bekletilmiş, ardından 24 saat atmosfer basıncı altında su içinde doygun kuru yüzey (DKY) duruma getirilmiştir (Resim 3.26). DKY durumundaki harçlar Arşimet terazisinde tartılarak su içindeki ağırlıkları tespit edilmiş ve Eş. 3.1-3.3'te verilen denklemler kullanılarak hesaplamalar yapılmıştır.



Resim 3.26. Numunelerin suda bekletilmesi ve Arşimet terazisinde tartımı

Rötre deneyi

Onarım harçlarının kuruma rötre deneyleri ASTM C1148-92'de belirtilen yönteme göre 25x25x285 mm boyutlu numuneler üzerinde yapılması planlanmıştır. Ancak ön denemelerde çelik pimlerin kireç harç çubuklarının büzülmesi nedeniyle yerinden çıktığı tespit edilmiş ve yöntem değişikliğine gidilmiştir. Bu sebeple rötre deneylerinde boyutları 40x40x160 mm olan prizmatik harç numuneleri kullanılmıştır.

Kalıptan çıkarılan harç numunelerin üç yüzeyi (en, boy ve derinlik) üzerine rötre ölçümü için işaretleme yapılmıştır ve ölçümler hep bu işaretli noktalardan alınmıştır. Rötre ölçümlerinin yapılmasında 100 mikron hassasiyetli BTS marka 200 mm lik elektronik kumpas kullanılmıştır. Onarım harçları prizmatik çelik kalıplara yerleştirilmeden önce kalıp ölçüleri belirlenmiş ve böylece harçların ilk boyları hesaplanmış ve ardından haftalık ölçümleri yapılmıştır (Resim 3.27-3.28). Rötre, ilk uzunluğa göre son uzunluğun yüzdesi olarak ifade edilmiştir.



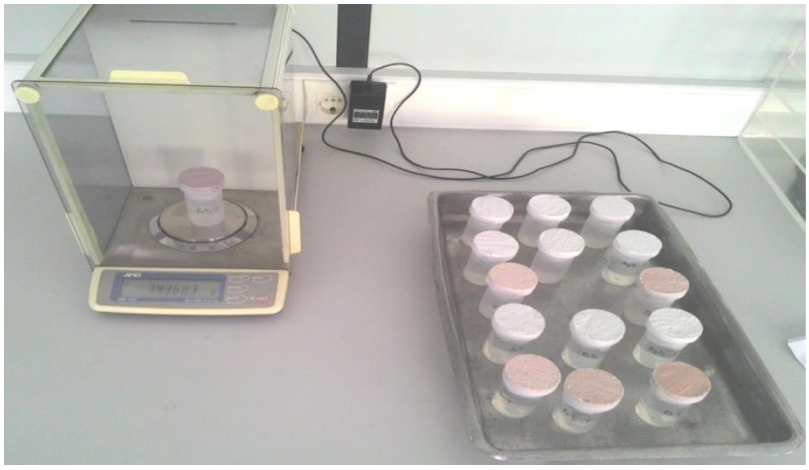
Resim 3.27. Ön deneme harçları sırasında üretilen rötre kalıbı



Resim 3.28. Onarım harçlarının elektronik kumpas ile boyut ölçümü

Su buharı geçirgenliği deneyi

Su buharı geçirimliliği katsayısını (μ) ve su buharı geçirimliliğinin eşdeğer hava kalınlığı cinsinden değerini (SD) bulmak için, 50 mm çapında ve 10 mm kalınlığında disk şekilli harç numuneleri üretilmiştir. Daha sonra harç numuneleri üst kısmında 20 mm hava boşluğu ve alt kısmı saf su olacak şekilde plastik numune kaplarına yerleştirilmiştir. Numunelerin yan yüzeyi ve kapla temas eden alt yüzeyi erimiş parafinle kaplanmış ve ölçüm saatleri dikkate alınarak numunelerin ağırlıkları sabit oluncaya kadar tartım işlemi yapılmıştır (Resim 3.29). Elde edilen verilere göre SD değerleri hesaplanmıştır [146].



Resim 3.29. Su buharı geçirimliliği deney numuneleri ve hassas terazi

Ultrases geçiş hızı ve elastisite modülü

Sesin sağlıklı bir kulak ile duyulabilen titreşimi; 16-16000 Hz arasındadır. Frekansın 16000 Hz'in üzerine çıkması durumunda kulakla duyulmayan ve ultrases denilen ses dalgaları oluşmaktadır. Boşlukta ilerlemeyen bu dalgalar gaz, sıvı veya katı halde bulunan bir cismin içinde belirli bir hızla yayılırlar. Bu hız malzemenin cinsine ve bünye yapısına bağlı olarak değişir. Ses geçiş hızı (V, mm/µs) ölçüm yapılan uzaklığın (L,mm), doğrudan veya dolaylı yöntem ile ölçülen ses geçiş süresine (t, µs) oranlanması ile belirlenir. Ultrases hızı deneyi sonucunda bulunan V hızı, malzemenin cinsi ve yapısal özellikleri hakkında bilgi vermektedir. Ses dalgaları, yörüngelerinde bir boşluğun bulunması durumunda, bu boşluğu geçemeyerek çevresinden dolanırlar. Bu durum, malzemenin bir ucundan diğer ucuna ses geçiş suresinin uzamasına, dolayısıyla ses geçiş hızının azalmasına neden olmaktadır. Ses geçiş hızının çok düşük değerlerde olması, malzemenin yapısında çok fazla boşluk olduğunun göstergesidir [147]. Ses geçiş hızı malzemenin temel fiziksel ve fizikomekanik özellikleri ile doğrudan ilişkili olan önemli bir parametredir.

Önemli mekanik özelliklerden biri olan elastisite modülü (Emod), bir malzemenin yükleme altında dayanabildiği gerilme/birim deformasyon oranı olarak tanımlanabilir. Emod değerini hesaplayabilmek için 40x40x160 mm boyutlarındaki onarım harç numuneleri kullanılmıştır. Ultrasonik hız deneyi; Pundit Plus ultrasonik ses cihazının 220 KHz probları ölçüm boyu 40 mm olacak şekilde numunelerin yan yüzlerine tutularak yapılmıştır. Eş. 3.9'da verilen formül kullanılarak ultrases geçiş hızı değeri (V) hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar ile

harçların birim hacim ağırlığı değerleri Eş. 3.10'da verilen denklemde kullanılarak E_{mod} hesaplanmıştır [128, 147].

Mekanik deneyler

Onarım harcı numunelerinin 28, 56 ve 90 gün yaşlarında basınç dayanımı deneyleri TS EN 196-1 standardına göre gerçekleştirilmiştir. Eğilmede çekme dayanımı deney aletinde ikiye ayrılan numunelerin biri üzerinde dayanım, diğeri üzerinde fiziksel deneyler gerçekleştirilmiştir. Basınç dayanımı deneyi 250 kN kapasiteli ELE marka üniversal test cihazında 100 N/s yükleme hızı uygulanarak yapılmıştır (Resim 3.30).

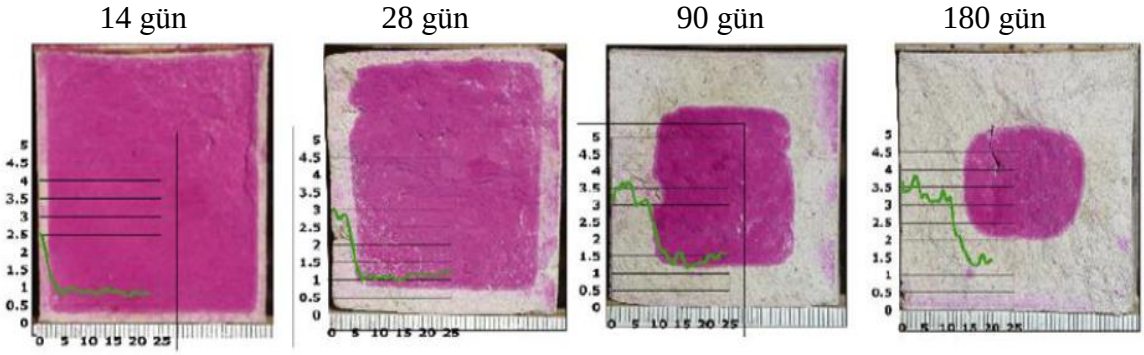


Resim 3.30. Harçlar için tasarlanmış eğilme-basınç dayanım cihazı ve kontrol ünitesi

Karbonatlaşma Derinliği Deneyi

Karbonatlaşmayı ölçmek için çok farklı yöntemler mevcuttur, bu işlemi tespit etmenin geleneksel yöntemi ise, yeni kırılmış bir harç yüzeyine fenolftalein püskürtmektir [148]. Fenolftalein püskürtülen yüzeyin pembe renklerle boyandığı yerde yüksek oranda alkalin portlandit varlığını, renksiz alanlar ise portlanditin kalsite dönüştüğünü göstermektedir. Portlandit oldukça alkali-bazik bir malzemeyken, kalsiyum karbonat nötrdür.

Fenolftalein titrasyonlarda sıklıkla kullanılan kimyasal bir bileşiktir. pH değeri yaklaşık 8,2'de görünür olmaya başlar ve pH 9,8'de tamamen renk değiştirir. Fenolftalein yöntemi harçların karbonatlaşma sürecini büyük oranda belirlemektedir (Resim 3.31) [149].



Resim 3.31. Fenolftalein yöntemi ile karbonatlaşmanın zamana göre değişimi [150]

Onarım harçlarının 28 ve 90 günlerinde karbonatlaşma derinliklerini tayin edebilmek için, eğilme dayanım deneyi sonucunda ikiye ayrılan numuneler üzerine yaklaşık 30 s sonra fenolftalein ($C_{20}H_{14}O_4$) püskürtülmüştür. Harç yüzeyine yaklaşık 10 cm mesafeden yapılan püskürtme işleminden sonra, harçlar fotoğraflanmış ve elektronik kumpas ile karbonatlaşmış kısımlar ölçülmüştür.

XRD, SEM-EDS ve DTA-TG analizi

Onarım harçlarının 28 ve 90.günlerinde mineralojik değişimlerinin izlenmesi için XRD analizi Bölüm 3.1.3'te anlatıldığı şekilde yapılmıştır. SEM-EDS analizleri ise yalnızca 90 günlük harç numuneleri üzerinde yapılmıştır. SEM analizinde, arayüz incelemesi için üretilen ve ortasında tuğla parça bulunan harçlar kesilerek elde edilen yaklaşık 1 cm^3 lük numuneler kullanılmıştır. Harç numunelerin yapısındaki hidrate ürünlerin görselleri alınmış, ayrıca farklı noktalarda elementel nokta analizleri yapılmıştır.

DTA (Diferansiyel Termal Analiz), malzemede sıcaklığa bağlı olarak meydana gelen reaksiyonları tespit etmek için kullanılan bir analiz tekniğidir. Endotermik ve ekzotermik reaksiyonların başlangıç ve bitiş sıcaklıkları, reaksiyonların gerçekleştiği maksimum sıcaklıklar, söz konusu reaksiyonların entalpisi (reaksiyon ısısı) hesaplanabilmektedir.

TGA (Termogravimetrik Analiz), malzemede sıcaklığa bağlı olarak meydana gelen ağırlık değişimlerini tespit etmek için kullanılan bir analiz tekniğidir. Malzemede ağırlık değişiminin başlangıç ve bitiş sıcaklıkları, söz konusu sıcaklıklardaki malzemenin ağırlığı ve % cinsinden ağırlık değişimleri hesaplanabilmektedir.

Onarım harçlarının TGA ve DTA analizleri, Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Malzeme-Metalurji Mühendisliği Bölümü laboratuvarlarında 20°C/dk ısıtma hızı ile 30-1000°C sıcaklığa çıkılarak gerçekleştirilmiştir. Analizler Hitachi ST7300 marka DTA-TG cihazında ve azot ortamı kullanılarak gerçekleştirilmiştir (Resim 3.32).



Resim 3.32. Termogravimetrik ölçümlerde kullanılan Hitachi marka TG-DTA cihazı

4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE DEĞERLENDİRME

Tarihi Sungurpaşa hamamı sıcaklık ve soğukluk bölümlerindeki kubbe örgü harç numuneleri üzerinde fiziksel ve fizikomeknaik deneyler, harçta asit kaybı oranı ve elek analizi ile harcın mikro yapı özellikleri ile hammadde kompozisyonun belirlenmesi amacıyla ince kesit, XRD ve SEM-EDS analizleri yapılmış ve bulgular tablo, grafik ve şekil olarak verilmiştir.

Özgün harç özellikleri ve tarihi yapı harç literatürleri ışığında, alternatif onarım harcı üretimi için b/a oranı 1/1 ve 1/3 olan iki grup seçilmiştir. Bu iki gruba %10, %20 ve %30 oranlarında diyatomit (D) ve tuğla tozu (T) katılarak 14 seri harç üretilmiştir. Üretilen onarım harçları üzerinde farklı gün yaşlarında, puzolanların kireç harcına olan etkilerinin belirlenmesi için fiziksel, fizikomekanik ve kimyasal deneyler ile XRD, SEM-EDS ve TGA-DTA analizleri yapılmıştır.

4.1. Özgün Örgü Harçlarında Deneysel Verilerin Değerlendirilmesi

4.1.1. Fiziksel analizler

Tarihi yapıların onarımı kapsamında yapılan fiziksel analizler, malzemelerin karakterizasyonu ve onarım malzemesi seçimi için önemli bilgiler vermektedir. Tarihi kireç harçların porozitesi genellikle %30-45 arasında değişmekte ve boşlukların çoğu da 10 mikrondan büyüktür. Günümüz kireç harcı ile kireç-çimento harçlarının porozitesi %20-25 arasında ve 0,1 mikrondan küçük gözenekler çoğunlukta olup 10 mikrondan büyük gözenekler yok denecek kadar azdır [127]. Özgün örgü harç numunelerine ait porozite, görünür yoğunluk ve ağırlıkça su emme oranı deneysel verileri Çizelge 4.1'de verilmiştir.

Harç numunelerin fiziksel özellikleri incelendiğinde, porozitenin ortalama %34, birim hacim ağırlığının 1,65-1,71 g/cm^3 arasında ve su emme oranının yaklaşık %10 civarında olduğu tespit edilmiştir. Özgün harçların fiziksel özelliklerinin, tarihi yapılarda kullanılan harçların özellikleri ile benzer özelliklerde olduğu yani boşluklu ve hafif-gözenekli bir yapıda oldukları görülmüştür.

Çizelge 4.1. Özgün örgü harçlarının fiziksel özellikleri

Numune adı	Porozite (%)		Birim hacim ağırlık (g/cm^3)		Su emme oranı (ağırlıkça %)	
SSKH1-1	33.3	33.7	1.71	1.71	9.6	9.6
SSKH1-2	35.7		1.65		9.9	
SSKH1-3	32.2		1.76		9.2	
SIKH1-1	32.2	33.8	1.66	1.65	10.1	10.1
SIKH1-2	32.9		1.67		10	
SIKH1-3	36.4		1.61		10.2	

4.1.2. Fizikomekanik analizler

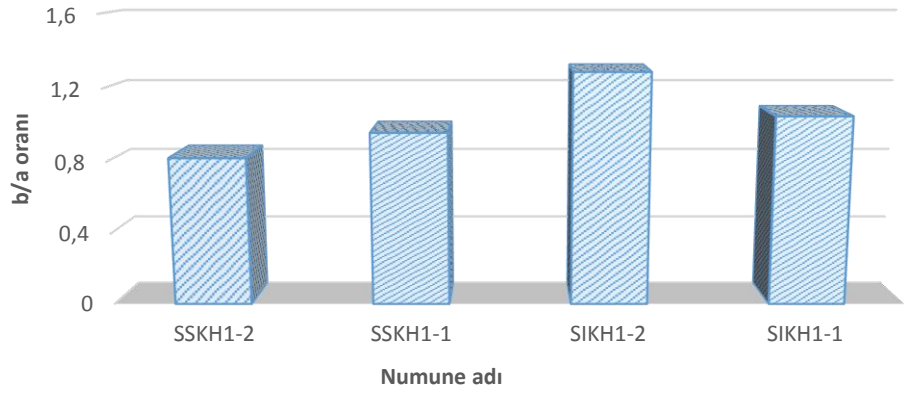
Geometrik şekilli-düzgün boyutlu olmayan harç numuneleri nokta yükleme deneyi (UCS), ultra ses hızı (V) ve elastisite modülü (E_{mod}) değerleri Çizelge 4.2'de verilmiştir. Özgün örgü harç numunelerine ait nokta yükleme deneyi sonucunda hesaplanan basınç dayanımları ortalama 2,5 MPa, ultrases hızları 1329-1552 m/s ve elastisite modülleri ise 3,9-5,6 GPa arasında değişen değerler aldığı ve bu değerlerin farklı tarihi yapılara ait örgü harçlarıyla benzer olduğu tespit edilmiştir [130].

Çizelge 4.2. Özgün örgü harçlarına ait UCS, V ve E_{mod} değerleri

Numune adı	UCS (MPa)		V (m/s)		E_{mod} (MPa)	
SSKH1-1	2,49	2,49	1301	1329	3881,52	3881
SSKH1-2	<1		1357		<1000	
SIKH1-1	2,51	2,52	1677	1552	6501,12	5622
SIKH1-2	2,53		1427		4744,73	

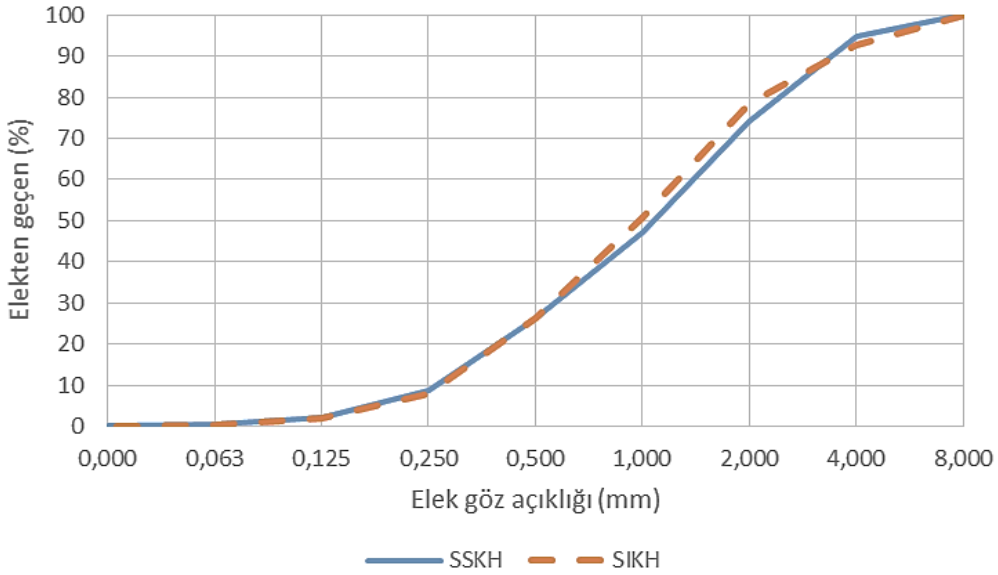
4.1.3. Asit kaybı ve elek analizi

Elde edilen verilere göre Sungurpaşa hamam yapısı örgü harçlarında b/a oranının 1/0,8 ile 1/1,3 arasında değişen değerler aldığı görülmüştür (Şekil 4.1). Aynı dönemde inşa edilmiş diğer tarihi yapılar üzerinde yapılan incelemelerde özgün örgü harcına yakın b/a oranları olduğunu göstermektedir [151].



Şekil 4.1. Özgün örgü harçlarının ağırlıkça b/a oranları

Özgün örgü harçlarına ait granülometrik analizler, harç agregalarında 1 mm'den daha küçük agrega oranının yaklaşık %50 civarında olduğu, 1 mm ile 10 mm'ye varan agrega boyutunun ise kalan %50'yi oluşturduğu tespit edilmiştir. Hamamın kubbe tuğla örgü harçlarında kullanılan agregaların granülometrik eğrisinin birçok tarihi yapı tuğla örgü harç agrega elek analizleri ile uyumlu olduğunu söyleyebiliriz. Örgü harçlarında iri agrega kullanılmış olması, harcın büzülmesini önemli derecede azalttığı düşünülmektedir. Büzülmenin sınırlı oranda kalması, tuğla örgünün hem yapım hem de onarımı için bir avantaj olarak düşünülmektedir [45].



Şekil 4.2. Özgün örgü harçlarına ait asitte çözünmeyen kısmın (kum) elek analizi

Şekil 4.2'den görüldüğü gibi özgün harcın %94'lük kısmı 4 mm altı ince agregalardan oluşmaktadır. Geriye kalan %6'lık kısımda adet olarak 20'den az iri agrega olması nedeniyle

bu agregaların boyutları merak edilmiş, SSKH ve SIKH'ye ait her bir agrega tek tek elektronik kumpas ile ölçülerek kaydedilmiş ve boyut ölçüm sonuçları Çizelge 4.3'te verilmiştir. Bu sonuçlara göre özgün örgü harçlarında ağırlıkça yaklaşık olarak %6 oranında 4-8 mm arası agrega kullanılmış olduğu belirlenmiştir.

Çizelge 4.3. Özgün örgü harçlarında kullanılan 4 mm üstü agrega boyutları

Harç Kodu	Agrega boyutu (mm)	
SIKH	6,64 x 10,45 6,50 x 6,22	5,23 x 5,36 6,40 x 8,49
SSKH	5,96 x 8,05 7,42 x 6,21	3,66 x 6,96 4,44 x 7,05

4.1.4. Tuz analizleri

Özgün örgü harçlarına uygulanan spot tuz analizleri incelendiğinde, atmosferik kirlilikten kaynaklanan nitrat tuzunun az da olsa mevcut olduğu ve kirlilik ve malakaride (alçı sıva süslemesi) bulunan alçının sülfat tuzlarını oluşturduğunu söyleyebiliriz. Ancak tuzlardan kaynaklanan bozulmanın tarihi yapı üzerinde sınırlı olduğu söylenebilir.

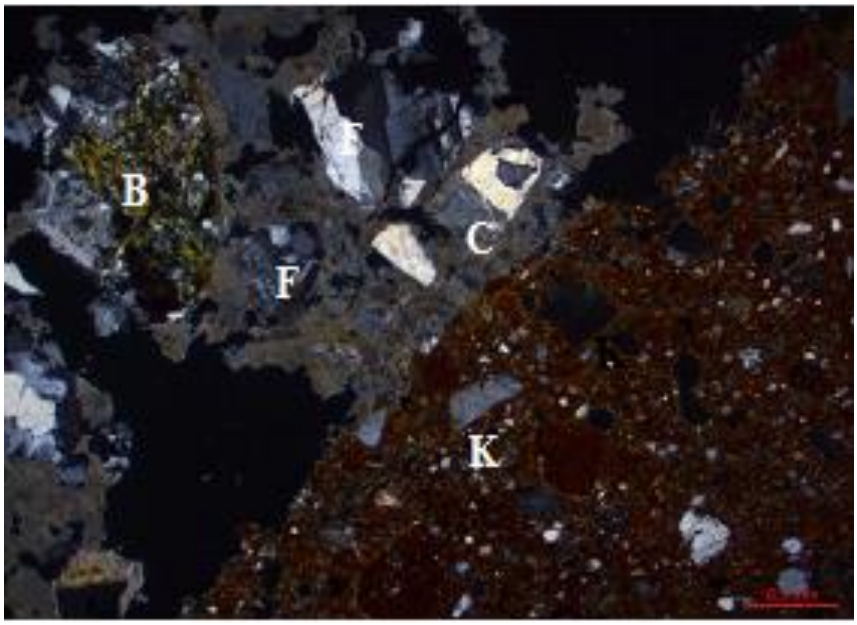
Çizelge 4.4. Özgün örgü harç numunelerinin tuz analizleri

Numune	Cl^-	SO_4	NO_3	CO_3
SIKH	-	+	+	-
SSKH	-	-	+	-

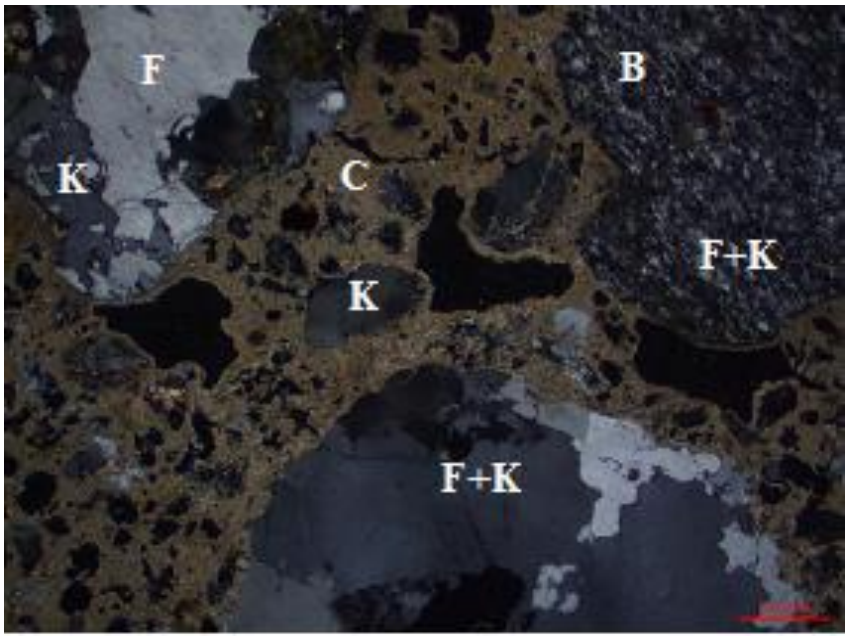
-: yok, +: az derecede, ++: orta derecede

4.1.5. Mikro yapı analizleri

Özgün harç numunelerin çift nikol görüntüleri incelendiğinde; bağlayıcı olarak kullanılan kalsit kristalleri, siyah görünen boşluk kısımlar ile biotit, kuvars ve feldspattan oluşan granit kayaç parçaları olarak değerlendirilebilecek agregalar ile daha küçük boyutta kuvars mineralleri görülmüştür (Resim 4.1, 4.2). Harç numuneleri içinde 1 mm ile 4 mm arasında düzensiz şekilli boşluklar bulunmaktadır. Harç içindeki bu boşluklar harcın yüksek porozitede olduğunu göstermektedir. Ayrıca Resim 4.1'de harç matrisinin bozulmaya uğramamış kompakt bir yapıyla kagir eleman ile aderansı görülmektedir.

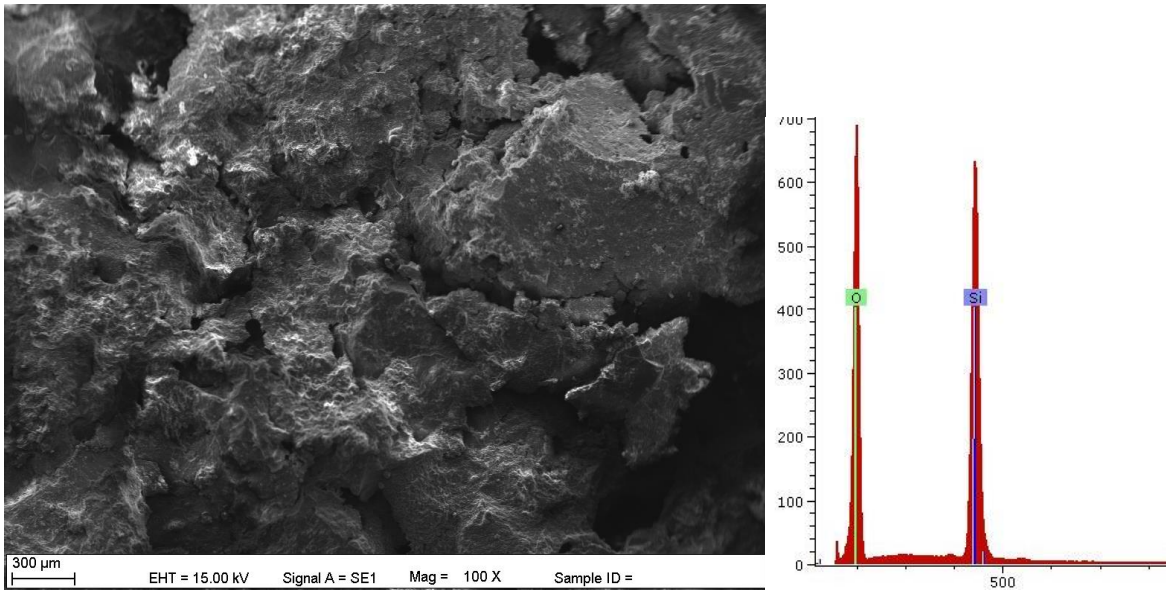


Resim 4.1. SIKH numunesine ait çift nikol görüntüsü (B=Biotit, C=Kalsit, F= Feldspat, K=Kuvars)



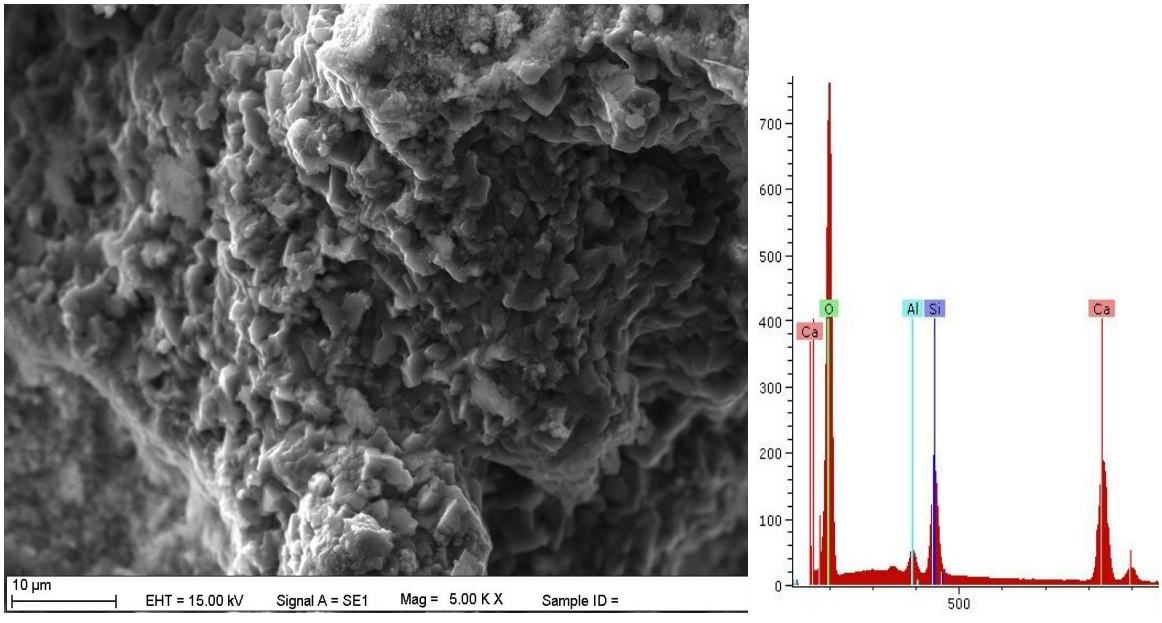
Resim 4.2. SSKH numunesine ait çift nikol görüntü (B=Biotit, C=Kalsit, F= Feldspat, K=Kuvars)

SIKH harç numunesi agrega tanesinin 100 büyütmeli SEM görüntüsü incelendiğinde, agreganın boşluksuz ve kompakt bir yapıda olduğu, ancak tane yüzeyinin kırıklı bir yapıda olduğu gözlenmiştir. Elementel kimyasal kompozisyonunda SiO_2 piki ve yüzde değeri bu agreganın saf silikat esaslı bir kuvars agregası olduğunu göstermektedir.



Resim 4.3. SIKH numunesine ait agreganın x100 büyütmeli SEM-EDS görüntüsü

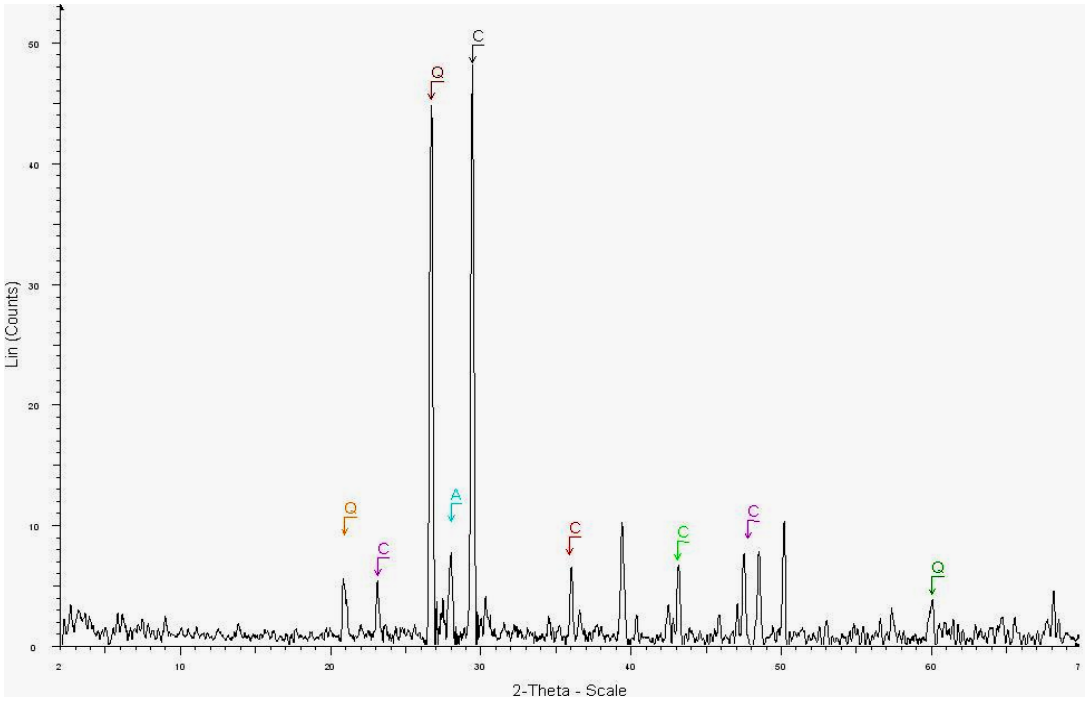
Ilıklık mekanından alınan SIKH harç numunesinin 5000 büyütmeli SEM görüntüsünde agrega tanesini çepeçevre sarmış olan mikritik kalsit kristalleri görülmektedir. EDS spektrumları incelendiğinde harcın kalsiyum alümina silikatlı bir bileşik içerdiğini söyleyebiliriz.



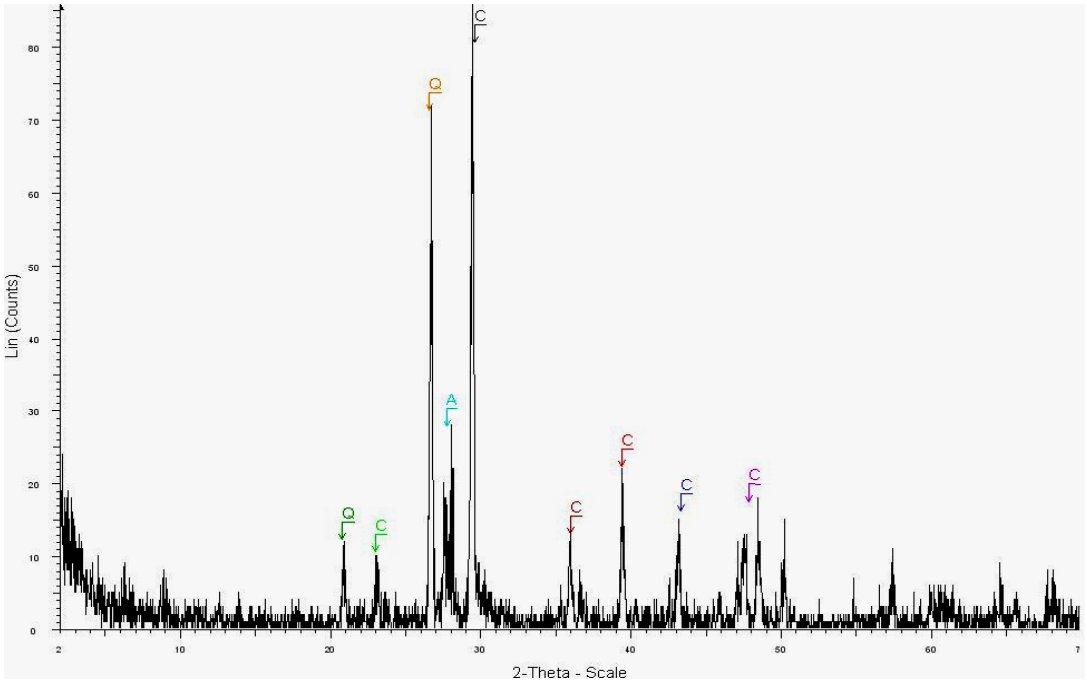
Resim 4.4. SIKH harç numunesi x5 000 büyütmeli SEM-EDS görüntüsü

Harç numunelerine ait XRD kırınım desenleri incelendiğinde, kalsit ($CaCO_3$) ve kuvars (SiO_2) piklerinin daha şiddetli olduğu görülmektedir. Kalsit mineralinin bağlayıcı matris

olan kireç kaynaklı olduğu ve kuvars, feldspat ve anortit piklerinin ise agrega fazına ait olduğunu söyleyebiliriz.



Şekil 4.3. SIKH örgü harç numunesine ait XRD grafiği (Q:Kuvars, C:Kalsit, A:Anortit)

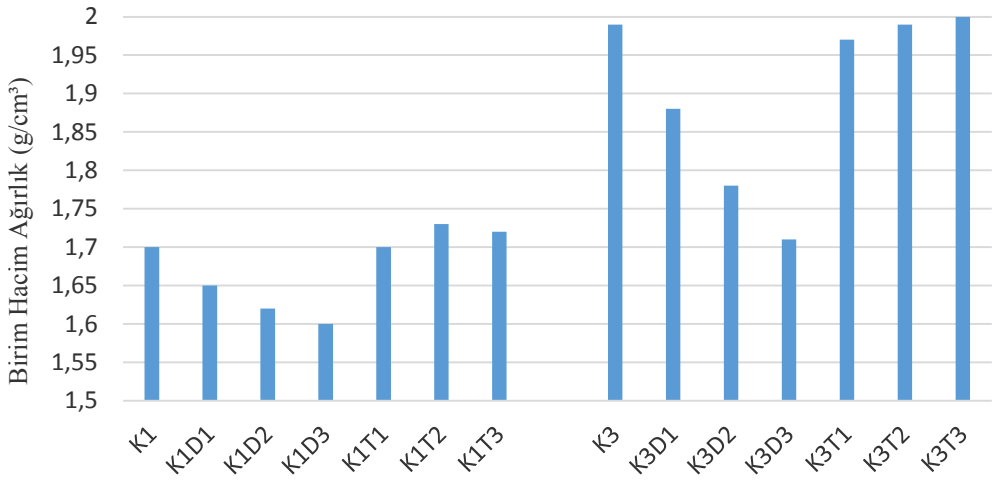


Şekil 4.4. SSKH örgü harç numunesine ait XRD grafiği (Q:Kuvars, C:Kalsit, A:Anortit)

4.2. Alternatif Onarım Harçlarına Ait Bulguların Değerlendirilmesi

4.2.1. Taze onarım harçlarının birim hacim ağırlığı

Laboratuvarda üretilen 14 seri onarım harcı örneğinin yayılma deneyi sonrası taze birim hacim ağırlıkları belirlenmiş ve sonuçları Şekil 4.5'te verilmiştir. K1 ve K3 gruplarına ait deney verileri incelendiğinde, harç karışımına giren agrega miktarındaki artış ile taze onarım harçlarının birim hacim ağırlıklarının da arttığı görülmüştür.



Şekil 4.5. Taze onarım harçlarına ait birim hacim ağırlık grafiği

K1 grubu harçların içinde en düşük ve en yüksek taze birim hacim ağırlık değerleri sırasıyla 1,6 g/cm^3 ile K1D3 ve 1,73 g/cm^3 ile K1T2 serilerinde elde edilmiştir. K1D serilerinde, D oranı arttıkça taze birim hacim ağırlıklarında ters orantılı olarak azaldığı görülmektedir. Bu azalma D'nin harç karışımına giren malzemelerden daha düşük bir yoğunluğa sahip olması ve böylece taze harç ağırlığını azaltmış olmasıyla açıklanabilir.

Şekil 4.5'te T katkılı seriler incelendiğinde, T'nin taze birim hacim ağırlık üzerinde etkisinin D'ye oranla belirgin olmadığı tespit edilmiştir. Bu durumu, T'nin agrega ağırlığına yakın bir yoğunluğa sahip olmasıyla açıklayabiliriz. K1 serisi ile K1T1 serisi aynı değere sahipken, K1T2 ve K1T3 serileri referans onarım harcına göre birim hacim ağırlığını sırasıyla %1,8 ve %1,2 arttırmıştır.

Onarım harçlarının K3 grubunda, b/a oranının daha düşük olması sonucunda hemen hemen tüm serilerin taze birim hacim ağırlıkları K1 grubunu geçmiştir. Ağırlıkça b/a oranı 1/3 olan seriler içinde en düşük ve en yüksek taze birim hacim ağırlık değerleri sırasıyla K3D3 ve K3T3 serilerinde görülmüştür. K3D onarım harcı serileri referans numuneyle kıyaslandığında, sırasıyla %6, %11 ve %15 daha düşük birim hacim ağırlık değerlerine sahip oldukları tespit edilmiştir. K3T serileri taze birim hacim ağırlıkları arasında dikkate değer farkların oluşmadığı belirlenmiştir.

Referans numuneler ile kıyaslandığında, düşük yoğunluğa sahip D katkılı serilerin T katkılı serilerden daha fazla taze birim hacim ağırlık değişimi göstermişlerdir. Bu sonuç, T'nin agrega yoğunluğuna daha yakın bir değerde olması ve D'nin oldukça düşük bir yoğunluğa sahip olmasıyla açıklayabiliriz.

4.2.2. Sertleşmiş onarım harçlarının fiziksel özellikleri

On dört seri sertleşmiş onarım harcının farklı gün yaşlarındaki numuneleri üzerinde birim hacim ağırlık, ağırlıkça su emme, porozite, su buharı geçirimliliği ve rötre deneyleri yapılmış ve sonuçları grafiklerde verilmiştir.

Birim hacim ağırlık

28 gün ve 90 gün yaşlarındaki sertleşmiş onarım harçlarına ait birim hacim ağırlığı (görünür yoğunluk) değerleri Şekil 4.6'da verilmiştir. Taze harç birim hacim ağırlıkları ile sertleşmiş onarım harçlarının birim hacim ağırlıklarında benzer değişimlerin meydana geldiği tespit edilmiştir.

K1 grubu harçların 28 gün yaşları içinde en düşük ve en yüksek birim hacim ağırlığı değerlerini sırasıyla K1 ve K1T3 serileri vermiştir. K1D serileri birim hacim ağırlık ortalaması 1,24 g/cm^3 ve K1T serilerinin ortalaması ise 1,26 g/cm^3 değerlerinde elde edilmiştir.

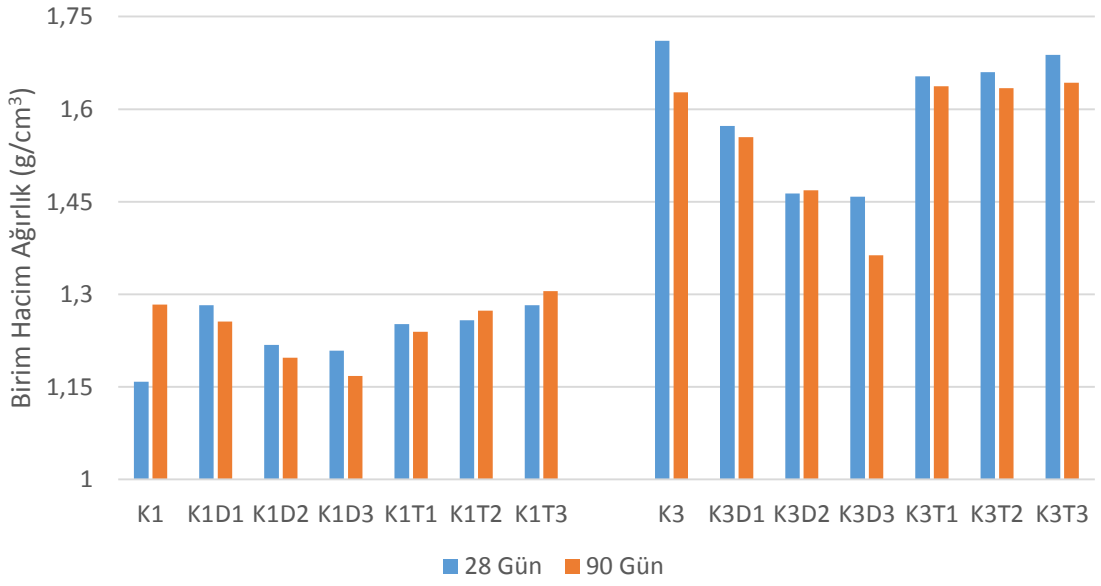
K3 grubu harçların 28 gün yaşlarında en düşük değeri K3D3 serisinde ve en yüksek değeri K3 referans serisinde hesaplanmıştır. K3D serileri birim hacim ağırlık ortalaması 1,50 g/cm^3 ve K3T serilerinin ortalaması ise 1,67 g/cm^3 olarak belirlenmiştir.

On dört seri harcın 90 gün yaşları içinde en düşük ve en yüksek birim hacim ağırlık değerleri, sırasıyla K1D3 ve K1T3 serilerinde tespit edilmiştir. K1D grubu onarım harçlarında ortalama 1,21 g/cm^3 ve K1T serilerinde ortalama 1,27 g/cm^3 birim hacim ağırlık değerleri elde edilmiştir.

K3 grubu harçların 90 gün yaşlarında en düşük değeri K3D3 serisinde ve en yüksek değeri K3T3 serisinde hesaplanmıştır. K3D serileri birim hacim ağırlık ortalaması 1,46 g/cm^3 ve K3T seri ortalaması ise 1,64 g/cm^3 olarak belirlenmiştir.

D katkılı onarım harçlarında, D oranının artması ile birim hacim ağırlığının azaldığı görülmektedir. D katkılı harçların birim hacim değerlerinin azalmasının sebebi ise, diyatomitin karışıma giren malzemelere oranla daha düşük yoğunluklu bir yapıda olmasından kaynaklanmaktadır.

K1 grubunda D oranının artışıyla birim hacim ağırlık değerleri azalırken, T katkılı serilerin değerleri artmıştır. K3 grubunda ise, D katkılı serilerin birim hacim ağırlık değerlerinin daha fazla azaldığı, T katkılı serilerin ise referans numuneyle aynı değerlerde olduğu ve serilerin ağırlığını değiştirmediği belirlenmiştir.



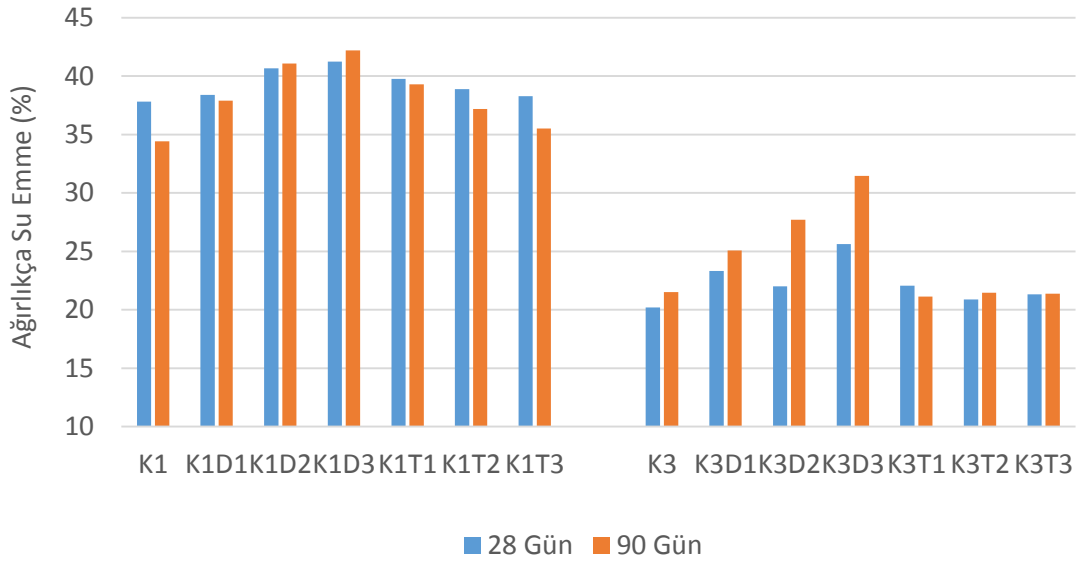
Şekil 4.6. Sertleşmiş onarım harçlarına ait birim hacim ağırlık grafiği

Onarım harçlarına ait 90 gün yaşları birim hacim ağırlık deneyi sonuçları incelendiğinde; K1 grubunun 1,17-1,30 g/cm^3 ve K3 grubunun ise 1,36-1,64 g/cm^3 arasında değişen değerler

aldığı görülmüştür. Tarihi yapılardaki birçok inşanın bir parçası olan tuğla örgülerde kullanılan örgü harçlarının birim hacim ağırlık değerlerinin yapılan farklı çalışmalarda 1,25-1,74 g/cm^3 arasında değerler aldığı bilinmektedir [130]. Onarım harçlarına ait tüm serilerin birim hacim ağırlıklarının da literatürde belirtilen değerler arasında yani düşük yoğunluk değerlerine sahip oldukları görülmektedir.

Su emme oranı

28 ve 90 gün yaşlarında yapılan su emme deneyi verilerine göre, serilerde ağırlıkça su emme oranlarının K1 grubunda %34 ile %42, K3 grubunda ise %21 ile %31 arasında değiştiği tespit edilmiştir. Tarihi yapılarda kullanılan harçların su emme oranları incelendiğinde; Bizans ve Roma dönemi harçların %18 ve %23, Selçuklu dönemi harçlarının %16-29 ve Osmanlı dönemi harçlarının ise %10 ile %24 arasında ağırlıkça su emme oranlarına sahip oldukları bilinmektedir [130, 152, 153]. Onarım harçlarının su emme oranları, tarihi yapı harçlarının değerleri ile karşılaştırıldığında; K1 grubunun üç dönemi kapsayan tarihi yapı harçlarının su emme verilerinin üzerinde olduğu, K3 grubu harçlarının ise tarihi yapıların değerlerine daha yakın sonuçlar verdiği görülmüştür (Şekil 4.7).



Şekil 4.7. Onarım harçlarına ait ağırlıkça su emme oranları

1/1 oranlı b/a grubunun 28 gün ve 90 gün ağırlıkça su emme verileri arasında belirgin bir fark olmadığı tespit edilmiştir. K1 grubu onarım harçlarının 90 gün yaşlarındaki su emme verileri içinde en düşük ve en yüksek değerler sırasıyla %34,4 ile K1 ve %42,2 ile K1D3 serilerinde görülmüştür.

D katkılı harçların su emme oranlarının referans numuneye kıyasla %10, %19 ve %23 daha fazla su emme kapasitesine sahip olduğu belirlenmiştir. T katkılı harçlarda ise, referans numuneyi karşılama oranı grafik sırasıyla %14, %8 ve %3 olarak hesaplanmıştır. K1 grubu onarım harçlarında, D katkı oranının artmasıyla K1D serilerinin su emmesinin arttığı, T katkı oranının artmasıyla K1T serilerinde su emmenin azaldığı tespit edilmiştir.

K3 grubu 28 gün ve 90 gün yaş numunelerinin ağırlıkça su emme yüzdeleri arasında da büyük farkların olmadığı görülmektedir. K3 grubu ağırlıkça su emme verilerine incelendiğinde, en düşük ve en yüksek değerleri %21,1 ile K3T1 ve %31,4 ile K3D3 serileri vermiştir. D katkılı serilerin su emme değerleri referans numuneyle kıyaslandığında, K3D1 %17, K3D2 %29 ve K3D3 %46 daha yüksek değerlerde olduğu belirlenmiştir. Bu sonuç, D'nin bir filtreyi andıran gözenekli yapısıyla ilgili olduğu düşünülmektedir.K3 grubundaki T serilerinin referans olan K3 serisiyle yaklaşık aynı değerlerde olduğu belirlenmiştir.

14 seri onarım harcının su emme oranlarının 28 ve 90 gün yaşları arasında K3D2 ve K3D3 serisi hariç büyük bir fark olmadığı görülmektedir. Ancak diyatomit katkılı onarım harçlarında puzolan oranı arttıkça, su emme oranının da paralel olarak arttığı görülmüştür. Bu artış K3 grubunda daha belirgin olarak ortaya çıkmaktadır. Su emme oranındaki bu artışın, diyatomitin gözenekli yapısı nedeniyle bünyesine daha fazla su absorbe etmesi şeklinde açıklanabilir. Tuğla tozu katkılı onarım harçlarına bakıldığında, K1 grubunda TT artışıyla az miktarda da olsa su emmenin azaldığı, K3 grubunda TT artışının su emme miktarında belirgin bir fark ortaya koymadığı söylenebilir.

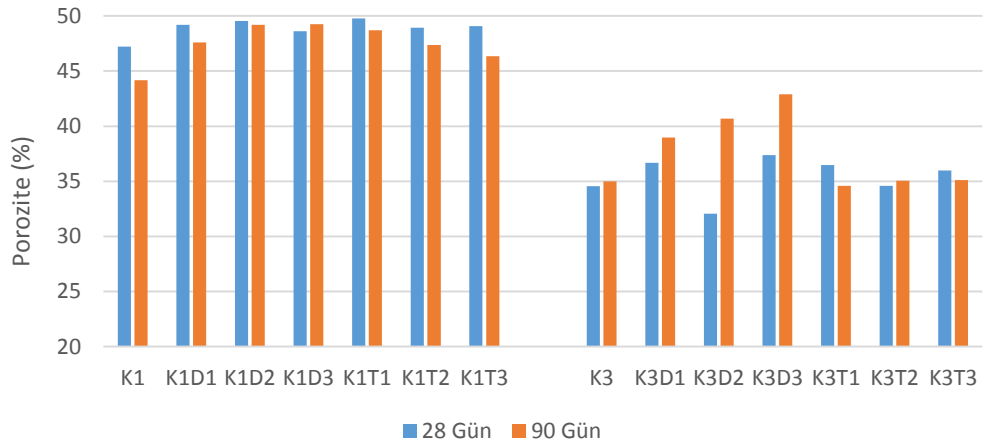
Porozite

Harç ve sıvalarda porozite deneyi; gözenekliliğin mekanik özellikler, su buharı geçirimliliği ve durabilite özellikleri üzerindeki etkisi için her zaman kullanılan bir analizdir [154].

Roma, Selçuklu ve Osmanlı döneminde inşa edilmiş tarihi yapılar üzerinde yapılan çalışmalarda, Roma dönemi harçlarında %30-49, Selçuklu döneminde %30-45 ve Osmanlı döneminde ise %31-54 arası gözeneklilik değerleri elde edilmiştir [130, 155]. 28 ve 90 gün yaşlarındaki onarım harçları üzerinde yapılan porozite (görünür porozite) deneyi verilerine göre, K1 ve K3 harç gruplarında sırasıyla %44-50 ile %35-43 arasında değişen oranlarda yüksek gözeneklilik değerleri hesaplanmıştır (Şekil 4.8). Onarım harçlarının tüm serileri

gözönüne alındığında 28 ve 90 günlerde b/a oranının azalmasıyla porozite değerlerinde de bir azalma olduğu tespit edilmiştir.

Onarım harçlarının 28 gün sonunda en düşük porozitesi %34 ile K3 serisinde ve en yüksek porozitesi %50 ile K1D3 ve K1T1 serisinde olduğu görülmektedir. Onarım harçlarının 90 gün sonunda en düşük porozitesi %35 ile K3 serisinde ve en yüksek porozitesi %50 ile K1D3 serisinde elde edilmiştir.



Şekil 4.8. Onarım harçlarına ait 28 ve 90 gün yaşlarında porozite oranları

b/a oranı 1/1 olan K1 grubu harçlarının 90 gün yaşlarındaki D katkısının porozite değerleri referans numuneyle kıyaslandığında, %10 D katkılı serinin %8, %20 ve %30 katkılı serinin yaklaşık %11 daha fazla poroziteye sahip olduğu tespit edilmiştir. Aynı grubun T katkılı serileri incelendiğinde ise, %10 T katkılı seri %10, %20 T serisi %7 ve %30 T katkılı seride %5 lik porozite artışı elde edilmiştir.

K3 grubu 90 gün yaşlarındaki harçların porozite değerleri referans numuneyle kıyaslandığında, %10 D katkılı serinin %11, %16 ve %30 katkılı serinin yaklaşık %22 porozite değerlerinde artış görülmüştür. Aynı grubun T katkılı onarım harçlarında T katkısının artmasıyla porozite değerlerinin değişmediği belirlenmiştir.

K1 ve K3 grubu seriler incelendiğinde, sönmüş kireç miktarı daha fazla olan K1 grubu porozitesinin karışımında agrega oranı daha fazla olan K3 grubuna kıyasla daha boşluklu bir yapıda olduğunu söyleyebiliriz. Kireç harçlarının boşluklu olması, tarihi yapı harçları için

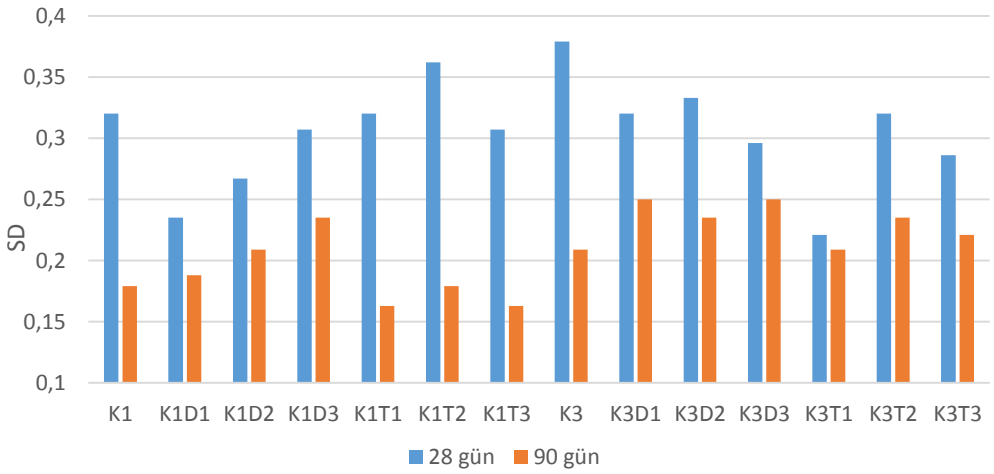
istenen kriterlerden biridir. Ayrıca yüksek porozite, kireç harçlarının karbonatlaşma hızını da olumlu yönde etkileyen bir diğer parametredir.

Su buharı geçirimliliği

Onarım harçları üzerinde 28 ve 90 gün yaşlarında yapılan su buharı geçirimliliği deney sonuçları, su buharı geçirimliliğine eşdeğer hava kalınlığı (SD) olarak Şekil 4.9'da verilmiştir. Onarım harçlarına ait 28 ve 90 gün yaşlarındaki SD değerlerinin arasında belirgin farkların olduğu görülmüştür.

K1 grubu 28 gün yaşlarında SD değerlerine D'nin katkısı incelendiğinde; K1D1, K1D2 ve K3D3'ün referans numuneyi karşılama oranları sırasıyla %73, %83 ve %96 olarak hesaplanmıştır. T katkılı harçların SD değerleri incelendiğinde ise K1T1 ve K1T3 serilerinin referans numuneyle aynı değerde olduğu, ancak K1T2'nin referans numuneyi karşılama oranının %117 olduğu görülmüştür.

K3 grubunun 28 gün yaşları için SD değerlerine D'nin katkısı incelendiğinde; K1D1, K1D2 ve K3D3'ün referans numuneyi karşılama oranlarının %84, %88 ve %78 olduğu görülmüştür. T katkılı harçların SD değerleri referans numuneyle kıyaslandığında ise K3T1'in %42, K3T2'nin %16 ve K3T3'ün %24 daha düşük SD değerleri elde edilmiştir.



Şekil 4.9. Onarım harçlarına ait 28 ve 90 gün yaşlarındaki SD sonuçları

K1 grubu 90 gün yaşında olan harçların SD değerlerinin en düşük ve en yüksek dayanımları sırasıyla, K1T1-K1T3 ile K3D1-K3D3 serileri vermiştir. D katkılı serilerin SD değerlerinin

referans numuneden sırasıyla %5, %17 ve %31 daha yüksek çıktığı belirlenmiştir. T katkılı serilerde ise, K1T2 değeri referans ile aynı, ancak K1T1 ve K1T3'ün referans numuneden %10 daha düşük bir değerde olduğu tespit edilmiştir.

K3 grubu harçların 90 gün SD değeri ortalaması 0,23 olup, hemen hemen tüm serilerin referans numuneden daha yüksek SD değerlerine sahip olduğu tespit edilmiştir. K3D serileri referans numuneyle kıyaslandığında, K3D1 ve K3D3'ün %20 arttığı, ancak K3D2'nin %6 daha düşük seviyede kaldığı görülmüştür. K3T serileri referansla kıyaslandığında ise, K3T1 serisi aynı değerde, K3T2'nin %12, K3T3'ün ise %6 daha fazla olduğu belirlenmiştir.

Onarım harçlarında karışımdaki D oranı artışına paralel olarak buhar difüzyonu değerleri artmaktadır. Ancak karışımda T oranındaki artışla bir azalmanın gerçekleşmediği ve referans numuneye yakın değerlerin elde edildiği tespit edilmiştir. TS EN 1062'ye göre Çizelge 4.5'te verilen su buharı geçirgenliğinin sınıflandırması 28 ve 90 gün yaşlarındaki onarım harçlarında tüm serilerin orta seviyede su buharı geçirimliliğine sahip olduğunu göstermektedir [156].

Çizelge 4.5. Su buharı geçirimliliğine göre malzemelerin sınıflandırılması

Sınıflandırma	SD (m)
Yüksek	<0,14
Orta	0,14-1,4
Düşük	>1,4

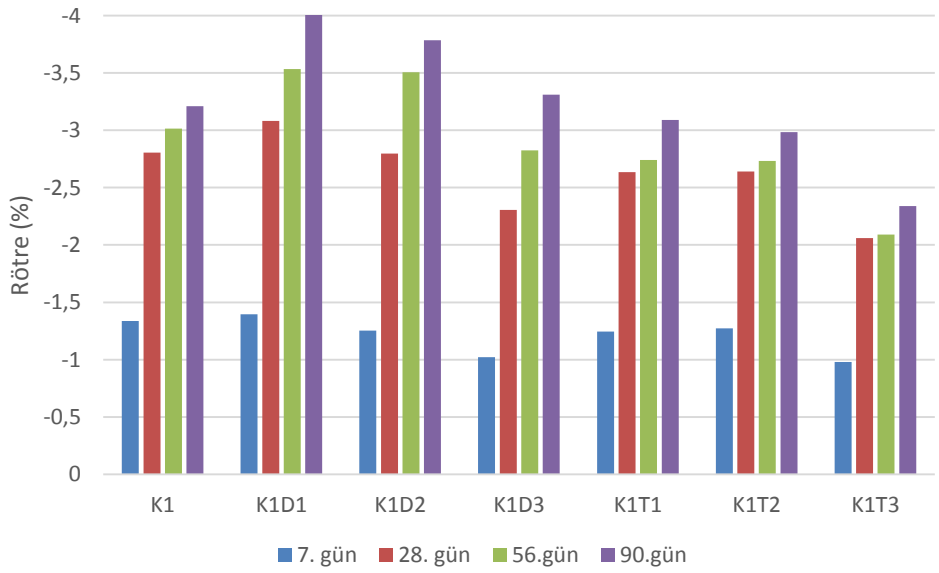
Puzolan katkılı kireç harçları ile ilgili yapılan bir çalışmada tuğla tozu katkılı kireç harçlarında su buharı geçirimliliğinin katkısız referans harçla oldukça yakın su buharı geçirimliliği değerleri aldığı belirtilmiştir [157].

Rötre

Onarım harçlarının 7, 28, 56 ve 90 günlük boy ölçümlerinin ortalamalarıyla elde edilen rötre verileri Şekil 4.10-11'de verilmiştir. K1 ve K3 gruplarının rötre grafikleri incelendiğinde, her iki grupta 28 gün yaşına kadar rötrenin büyük bölümünün meydana geldiği görülmektedir.

Onarım harçlarında b/a oranının azalmasıyla yani harç karışımında agrega miktarının artmasıyla rötrenin azalmış olduğunu söyleyebiliriz. Bu sonuç, farklı oranlardaki b/a oranlı kireç harçlarının rötre sonuçlarıyla paralellik göstermektedir [158]. Ayrıca farklı bir çalışmada 1/1;1/1,5; 1/3 ve 1/6 b/a oranlı 90 günlü harç numuneleri üzerinde büzülme oranları incelemiş ve en yüksek rötrenin 1/1,5 b/a oranlı numunelerde olduğu saptanmıştır [45].

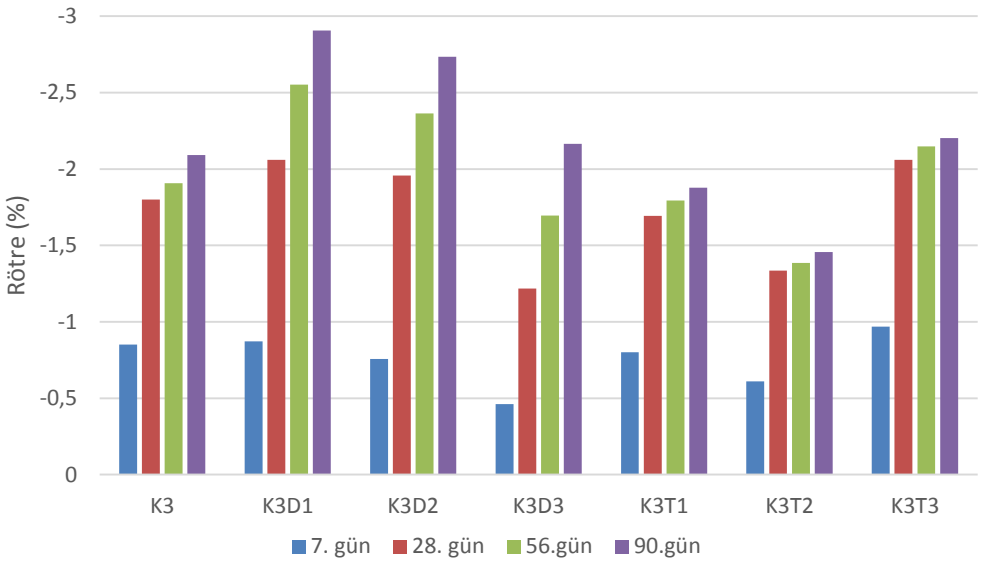
K1 grubu harçların 90 gün yaş rötre değerleri içinde en yüksek rötrenin %4 ile K1D1 ve en düşük rötrenin ise %2,3 ile K1T3 serisinde elde edilmiştir. Bu grupta D katkılı onarım harçlarının 28 gün yaşlarında rötre değerleri referans numune ile kıyaslandığında, K1D1 ve K1D2 serilerinin %15 ve %5 daha yüksek olduğu, K1D3'ün ise %13 daha düşük olduğu belirlenmiştir. K1T serisi harçların referansı karşılama oranları ise grafik sırasıyla %95, %93 ve %73'tür. D katkılı onarım harcı rötrelerinin diğer serilere göre yüksek olması, D'nin mikro yapısal özellikleri nedeniyle daha fazla su tutma kabiliyetiyle ve harcın kuruması sonucunda büzülmenin artması olarak açıklayabiliriz.



Şekil 4.10. K1 grubu onarım harçlarına ait rötre grafiği

K3 grubu 90 günlük hacimsel rötre değerleri ortalama %2,2 olup, en yüksek rötre %2,9 ile K3D1 serisi ve en düşük rötre ise %1,4 ile K3T2 serisinde olduğu tespit edilmiştir. K3 grubunda, D katkılı seriler referans numuneyle kıyaslandığında, K3D1 %39, K3D2 %31 ve K3D3 %3 daha fazla rötre değerine sahiptir. T katkılı seriler referans numuneyle

kıyaslandığında ise, K3T1 ve K3T2 serileri %10 ve %30 daha az rötre yapmasına rağmen K3T3 serisinin %5 artış gösterdiği belirlenmiştir.



Şekil 4.11. K3 grubu onarım harçlarına ait rötre grafiği

Puzolan katkılı kireç harçlarında rötre deney sonuçları incelendiğinde, metakaolin (M) ve uçucu kül (UK) katkısının hacimsel rötreyi referans harcına oranla yarı yarıya azalttığı belirtilmiştir [159].

b/a oranı 1/1 olan D ve T katkılı onarım harçlarının rötre verilerinde T'nin büzülmeyi referans numuneye göre daha düşük seviyede tutabildiği görülmektedir. K1 grubu için %10, %20 ve %30 D katkılı serilerin referans numuneden daha fazla büzülme sergilediği ve büzülme miktarının tüm serilerde 28 günden sonra azaldığı tespit edilmiştir. T katkılı serilerin tümünde meydana gelen büzülme referans numuneden daha düşük bir değerde kalmıştır.

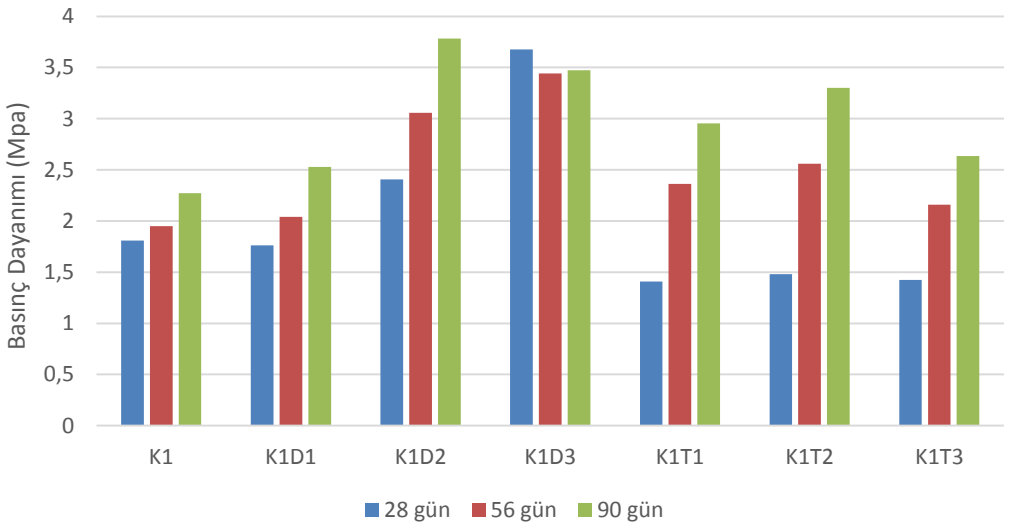
K3 grubu harçlarda agrega oranının artmasıyla referans numunenin K1 referansına göre %35 daha az büzülme gerçekleştirdiği tespit edilmiştir. Aynı grupta puzolan artışıyla büzülmenin azalmış olduğu, ancak K3D serilerinin referans büzülme değerlerinden daha yukarıda kaldığı belirlenmiştir. T katkısının %10 ve %20 oranındaki serilerinin rötreyi azalttığı, ancak %30 T kullanımının rötreyi olumsuz etkilediğini söyleyebiliriz.

4.2.3. Onarım harçlarının fizikomekanik özellikleri

Basınç Dayanımı

D ve TT katkılı onarım harçlarının basınç dayanımı ve Emod deney sonuçları, Şekil 4.12-14'de verilmiştir. Onarım harçlarının tüm serilerinde zamana bağlı olarak basınç dayanımında artış olduğu görülmektedir.

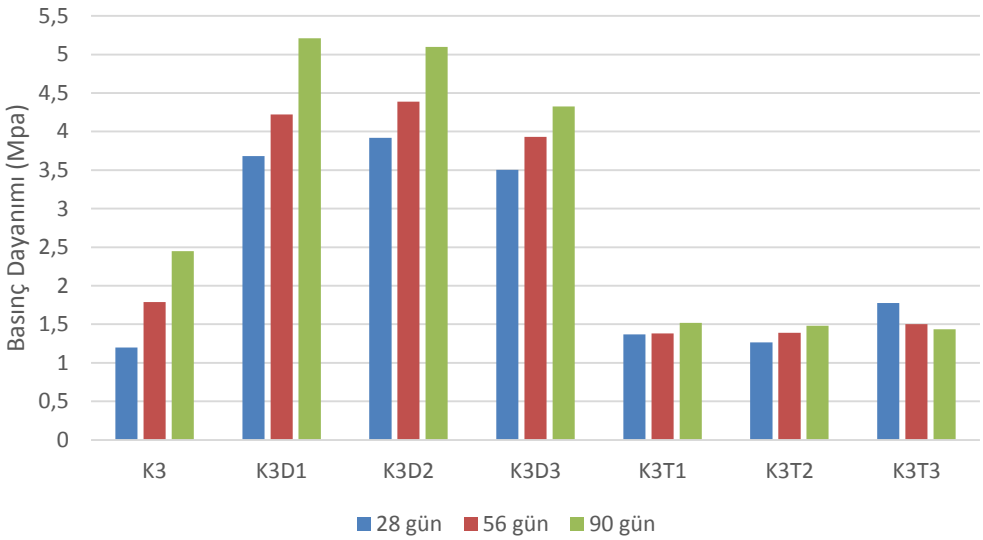
K1 onarım harcı grubu 90 günlük basınç dayanımı verileri incelendiğinde, en düşük değer 2,27 MPa ile K1 serisinde ve en yüksek değer 3,78 MPa ile K1D2 serisinde elde edilmiştir. D katkılı numuneler K1 referans harcıyla kıyaslandığında, K1D2 ve K1D3 serilerinin her yaşta daha yüksek basınç dayanımı verdiği, K1D1 serisinin ise 8 günden sonra K1'den daha yüksek basınç dayanımına ulaştığı belirlenmiştir. TT katkılı harç serileri ise; K1 serisiyle kıyaslandığında ise, 28 günlükte referansın 1,81 MPa ile daha yüksek olduğu, ancak 56 ve 90 gün yaşlarında K1T serilerinin referans basınç dayanımını geçtiği görülmüştür. K1 onarım harcı grubunda yeralan harçlar birbirleri ile kıyaslandığında; D ve T katkılı harçların referans numune olan K1'e göre deney günleri arasındaki dayanım artışı K1D3 serisi hariç daha fazla meydana gelmiştir.



Şekil 4.12. K1 grubu onarım harçlarının basınç dayanımı grafiği

K3 grubu 90 günlük basınç dayanımı değerlerinde, en düşük dayanım 1,44 MPa ile K3T3 serisinde ve en yüksek dayanım 5,21 MPa ile K3D1 serisinde elde edilmiştir. K3 grubunda

D katkılı onarım harçlarının basınç dayanımları 28, 56 ve 90 günlerinde giderek artan bir basınç dayanımı sergilemesine rağmen TT katkılı harçların deney günleri arasında belirgin farklar gözlenmemiştir. D katkılı numuneler K3 referans harcıyla kıyaslandığında, K3D1, K3D2 ve K3D3 serilerinin her yaşta daha yüksek basınç dayanımı verdiği belirlenmiştir. T katkılı onarım harçları K3 serisiyle kıyaslandığında, 28 güne kadar K3T1, K3T2 ve K3T3 serilerinin daha yüksek olduğu ancak 56 ve 90 günlük dayanımlarda K3 serisinin T katkılı onarım harçlarını geçtiği görülmüştür.



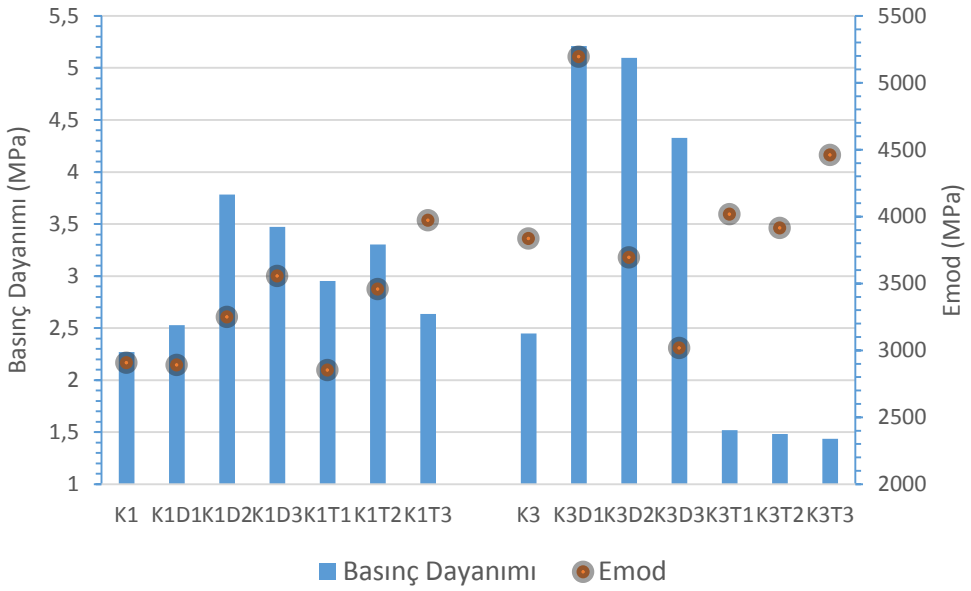
Şekil 4.13. K3 grubu onarım harçlarının basınç dayanımı grafiği

Referans serilerinin basınç dayanım değerleri kıyaslandığında, K1 grubunun 28 ve 56 günlerde yüksek olduğu, ancak K3 serisinin 90 gün sonunda %8 daha fazla dayanıma sahip olduğu belirlenmiştir. Her iki onarım harcı grubu basınç dayanımı verileri incelendiğinde, D katkılı onarım harçlarının K3 grubunda, T katkılı harçların ise K1 grubunda daha olumlu sonuçlar verdiği görülmüştür.

Elastisite modülü

Şekil 4.14'te görülen elastisite modülü verileri değerlendirildiğinde, genel olarak onarım harçlarında puzolan katkı oranı arttıkça elastisite modülü değerlerinin arttığı görülmektedir. K1 grubu onarım harçlarının Emod değerlerinin ortalama 3400 MPa ve K3 grubu harçların yaklaşık 4200 MPa olduğu belirlenmiştir. En yüksek ve en düşük Emod değerleri sırasıyla

K3D1 ve K1T1 serilerinde görülmüştür. K3D serilerinde karışımdaki D artışıyla porozite değerleri artmış ve dolayısıyla Emod değerleri de azalmıştır.



Şekil 4.14. 90 gün yaştaki onarım harçlarının basınç dayanımı-Emod grafiği

Tüm gruplar içinde en yüksek basınç dayanımını K3D2, en düşük dayanımın ise K3T1 serisinde olduğu görülmüştür. Diyatomit katkılı harçlar b/a oranının her serisinde yüksek dayanım göstermiştir. Puzolanik indeksi 1,2 MPa olan tuğla tozu katkılı kireç harçlarının puz. İndeksi 5 MPa olan doğal puzolanlı harçlara oranla daha düşük dayanım gösterdiği bilinmektedir. Ayrıca 0-4, 4-8 ve 8-16 mm grublu agregaların harçlarda dayanımı farklı etkilediği ve 8 mm üstü agreganın kullanılmasının basınç dayanımını %30 lara kadar azalttığını belirtmiştir [159].

Karbonatlaşma derinliği

Harç ve sıvaların sertleşmesi, kirecin havada bulunan CO_2 ile reaksiyonu sonucu oluşur. Karbonatlaşma, gaz-sıvı-katı reaksiyonu ile açıklanabilir. Kirecin karbonatlaşmasına birçok faktör etki eder. Bunlardan en önemlileri; nem miktarı, CO_2 derişimi ve kirecin gaz geçirgenliğidir. CO_2 derişiminin artmasıyla karbonatlaşma artar. Suyun yokluğunda veya aşırı miktarda olmasında karbonatlaşma çok yavaş meydana gelmektedir [37].

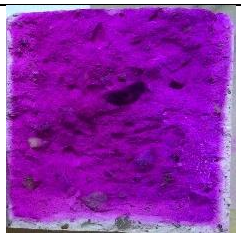
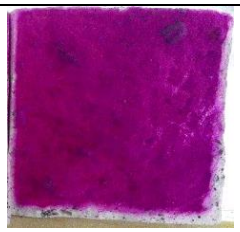
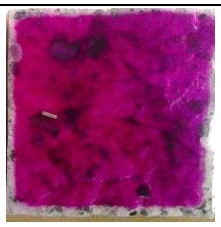
Kireç harçlarında karbonatlaşma mekanizması farklı yöntemler kulllanılarak belirlenebilmektedir. Bu yöntemlerden biride harç numunelerin havayla temas etmeyen kısmında enine tarafından bölmek suretiyle yüzeye feonlftalein püskürtmektir. Harç yüzeyine püskürtülen sıvı, karbonatlaşmanın olduğu bölgelerde (pH-nötr) renksiz kalırken, portlanditin olduğu bölgelerde ise (pH-bazik) pembeleşme meydana gelmektedir.

Alternatif onarım harçlarının karbonatlaşma derinlikleri 28 gün ve 90 gün yaşlarında eğilmede çekme deneyi sonucunda ikiye bölünen numuneler üzerine fenolftalein püskürtülerek gerçekleştirilmiştir. Onarım harçlarına ait karbonatlaşma görselleri K1 grubu için Şekil 4.15 ve K3 grubu için Şekil 4.16'da verilmiştir.

K1 grubu onarım harçlarına ait 28 gün yaş karbonatlaşmaları incelendiğinde, tüm serilerde karbonatlaşmanın başlamış olduğu harcın dış yüzeyinden iç kısmına doğru değişen renk tonuyla net olarak görülmektedir. Bununla birlikte, dış kısımlarda portlanditin kalsite dönüşümünün yanı sıra portlanditin de mevcut olduğu karbonatlaşmanın başladığını ancak halen devam etmekte olduğunu da göstermektedir. Bu durum, onarım harçları üzerinde gerçekleştirilen X-ışınları difraktogramlarında da görülmektedir.

K1 grubunda referans numune olan K1 serisi ve K1D serilerinde karbonatlaşmış bölgenin yaklaşık olarak 2 mm derinliğe ulaştığı belirlenmiştir. K1T serilerinin karbonatlaşması ise 1 mm civarında olduğu görülmüştür.

90 gün yaşındaki K1 grubu karbonatlaşma derinlikleri incelendiğinde; K1 ve K1D1 serilerinin 6 mm, K1D2 ve K1D3 serilerinde ise sırasıyla 5 mm ve 4 mm olarak tespit edilmiştir. K1T serilerinin karbonatlaşmış bölgelerinin ise ortalama 5,5 mm derinliğe ulaştığı görülmektedir.

Seri adı	28 gün	90 gün
K1		
K1D1		
K1D2		
K1D3		
K1T1		
K1T2		
K1T3		

Şekil 4.15. K1 grubu onarım harçlarında fenolftalein uygulaması

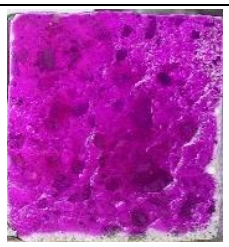
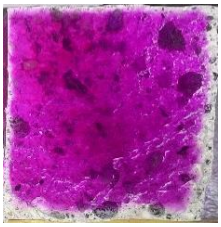
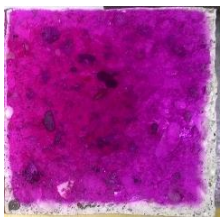
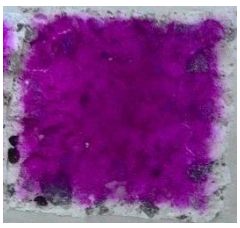
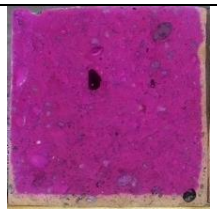
K3 grubu 28 gün yaş onarım harçlarına ait karbonatlaşmalar incelendiğinde, karbonatlaşmanın tüm serilerde başlamış olduğu görülmektedir. Karbonatlaşmanın en fazla görüldüğü seri referans seri olan K3 ve en az görüldüğü seri ise K3D1 olarak belirlenmiştir.

K3D serisi 90 gün yaşlarındaki karbonatlaşmanın 28 gün yaş harçlarına göre çok fazla artış göstermediği belirlenmiştir. Bu sonuç ise, karışıma giren portlanditin diyatomit ile kalsiyum silikatlı bileşikler oluşturması ile açıklanabilir.

K3T grubunda karbonatlaşmanın her iki yaş grubunda meydana getirdiği derinlikler daha açık bir şekilde görülmektedir. 90 gün yaşlarına göre tuğla tozu katkılı serilerin ortalama 2-3 kat karbonatlaşma derinlikleri artmıştır. Karbonatlaşmış bölgeler K3T serileri için karşılaştırıldığında, T miktarındaki artışla karbonatlaşma derinliğininde arttığını söyleyebiliriz. Bu serilerde meydana gelen karbonatlaşma artışı ise, puzolanik özellik göstermeyen tuğla tozunun, kireç ile bir reaksiyon göstermemiş olmasıyla açıklanabilir.

Her iki grubun karbonatlaşma derinlikleri karşılaştırıldığında; b/a oranı 1/1 olan serinin 1/3 olan seriye kıyasla daha fazla kalsite sahip olduğu, ancak referans numuneler kıyaslandığında ise 1/3 oranlı K3 serisinin daha fazla pH nötr bölgeye sahip olduğu görülmüştür. Bununla birlikte K3 serisi karbonatlaşma bölgesinin K1 serisine oranla harcın dış yüzünden daha eşit oranlarda iç kısma doğru ilerlemiş olduğuda belirlenmiştir.

Karbonatlaşmanın harcın dış yüzeyinden iç kısmına doğru eşit oranlarda ilerlemesi kıyaslandığında; diyatomit katkılı serilerin ve özellikle K1D serilerinin tuğla tozu katkılı serilere göre daha eşit derinlikte ilerlediği tespit edilmiştir.

Seri adı	28 gün	90 gün
K3		
K3D1		
K3D2		
K3D3		
K3T1		
K3T2		
K3T3		

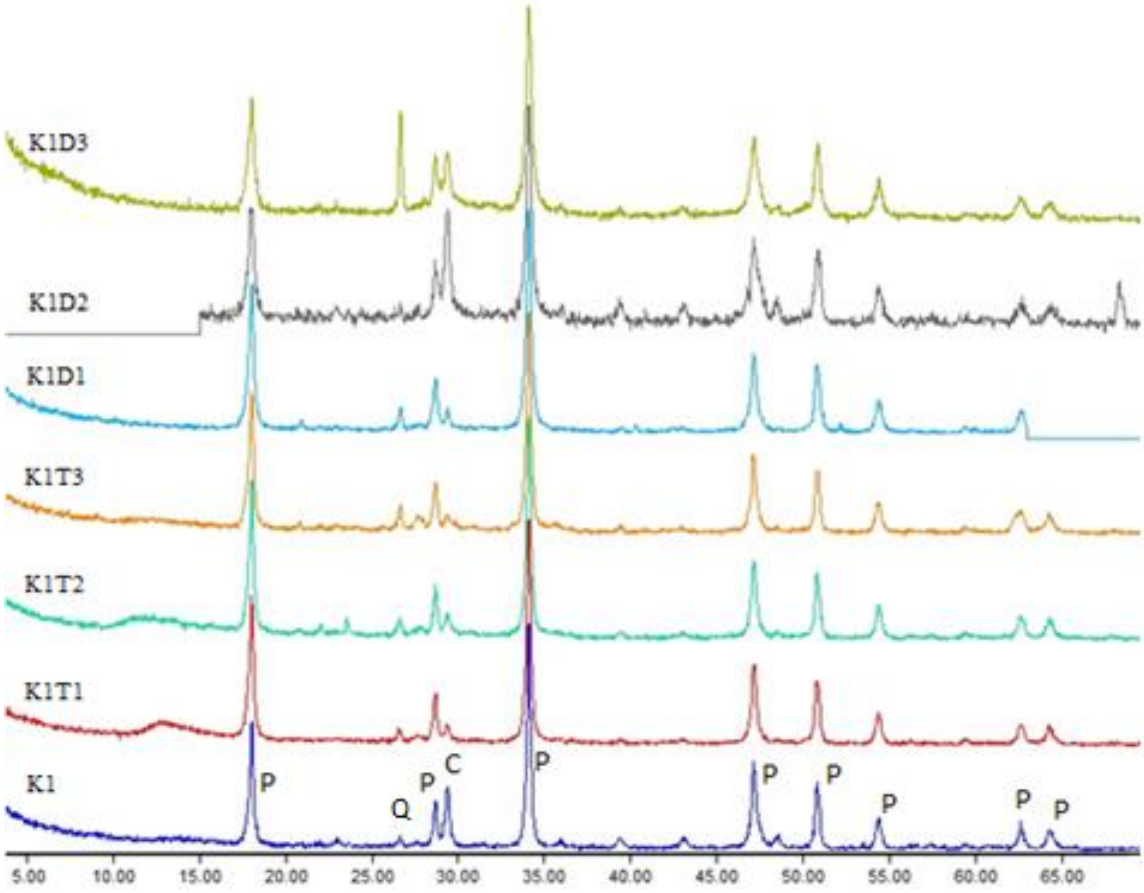
Şekil 4.16. K3 grubu onarım harçlarında fenolftalein uygulaması

4.2.4. Onarım harçlarının mikro yapı özellikleri

XRD analizi

Onarım harçlarının X ışınları analizinde ortaya çıkan piklerin belirlenebilmesi için öncelikle harcı oluşturan hammaddelerin XRD analizleri yapılmış ve üçüncü bölümde bu analizlere yer verilmiştir.

90 gün yaştaki K1 ve K3 serisi numunelerinden alınan parçalar toz haline getirilerek numunelerin mineralojik yapılarının belirlenebilmesi amacıyla X-ışınları analizleri yapılmıştır. Bu analizlere ait XRD difraktogramları Şekil 4.17-4.18'de verilmiştir.

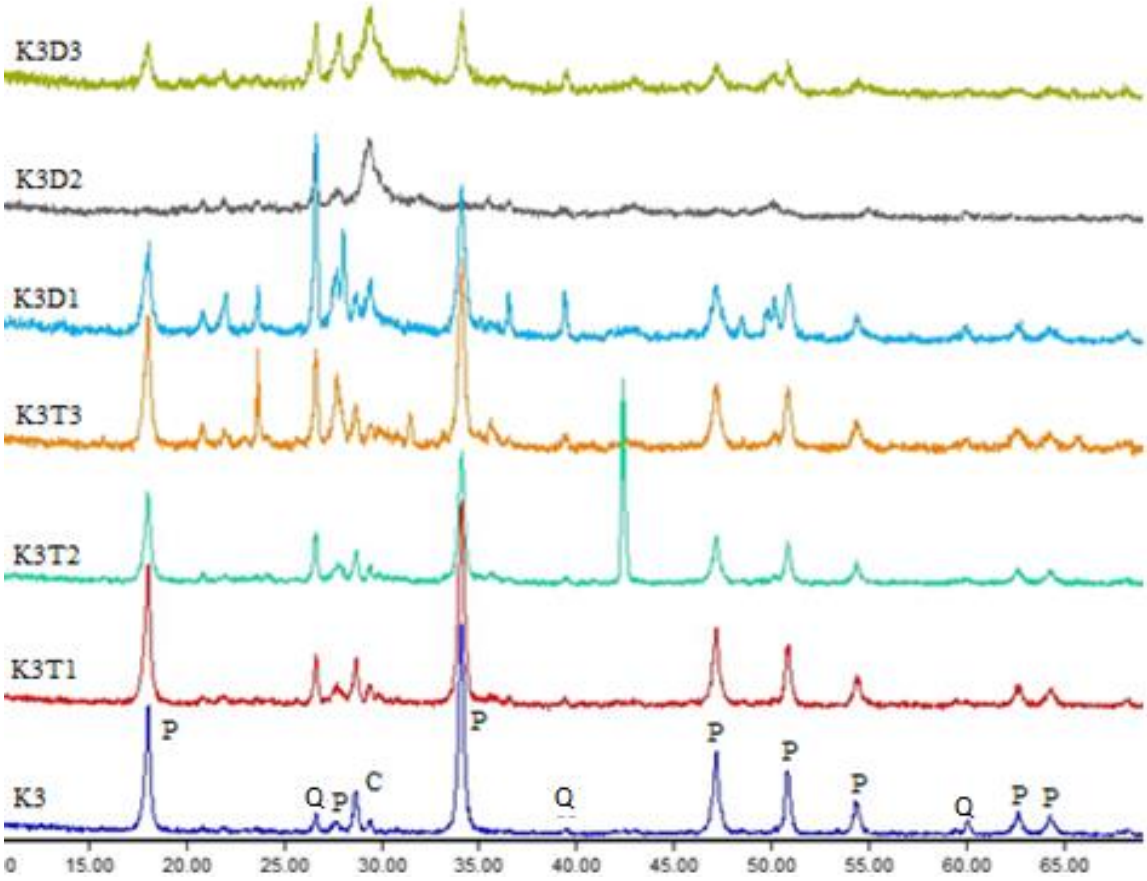


Şekil 4.17. K1 serisi 90 gün yaşlarındaki onarım harçlarına ait XRD grafiği (P:Portlandit, C:Kalsit, Q:Kuvars)

Tüm serilerin XRD kırınım desenlerinde portlandit (P), kalsit (C) ve kuvars(Q) mineralleri tespit edilmiştir. K1 grubuna ait kırınım desenlerinde; kirecin atmosferden aldığı CO_2 ile

reaksiyona girerek oluşturduğu 29°'de yer alan kalsit pikinin D katkılı harç serilerinin T katkılı harç serilerine göre daha yüksek şiddette olduğu belirlenmiştir. Bu sonuçla, D'nin onarım harcı içindeki karbonatlaşma reaksiyonunu olumlu yönde etkilediğini söyleyebiliriz.

D ve T katkılı K1 serilerinin XRD grafiğindeki 34,14°'teki portlandit pikleri incelendiğinde, D oranı arttıkça onarım harcındaki portlandit miktarının azalmış olduğu belirlenmiştir. T katkılı onarım harçlarında ise; en düşük portlandit değeri K1T2 serisinde, ardından K1T3 ve en yüksek portlandit pik şiddetinin K1T1 serisinde olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 4.18. K3 serisi 90 gün yaşlarındaki onarım harçlarına ait XRD grafiği (P:Portlandit, C:Kalsit, Q:Kuvars)

K3 grubu XRD analizleri incelendiğinde; K3 grubu onarım harcı serilerinde portlandit ($Ca(OH)_2$) piklerinin K1 grubuna oranla daha az olduğu tespit edilmiştir. K3 serilerinde portlandit ve kalsit piki şiddetlerinin daha az olmasını, harç karışımına giren kireç miktarının azalmış olmasıyla açıklayabiliriz.

K3T serisi kırınım deseni portlandit piklerinin referans numune pikiyle kıyaslanmasında, portlandit piklerinin T oranındaki artışla azaldığı tespit edilmiştir. K3D serisi portlandit piklerinin ise, D oranındaki artışla ters orantılı olarak azaldığı belirlenmiştir. K3 grubunda D ve T serilerinin portlandit piklerindeki azalmasının sebebi; portlanditin puzolanlar ile reaksiyona girerek yapı değiştirmesi veya karbonatlaşma prosesiyle kalsite dönüşmesi şeklinde gerçekleşmiştir.

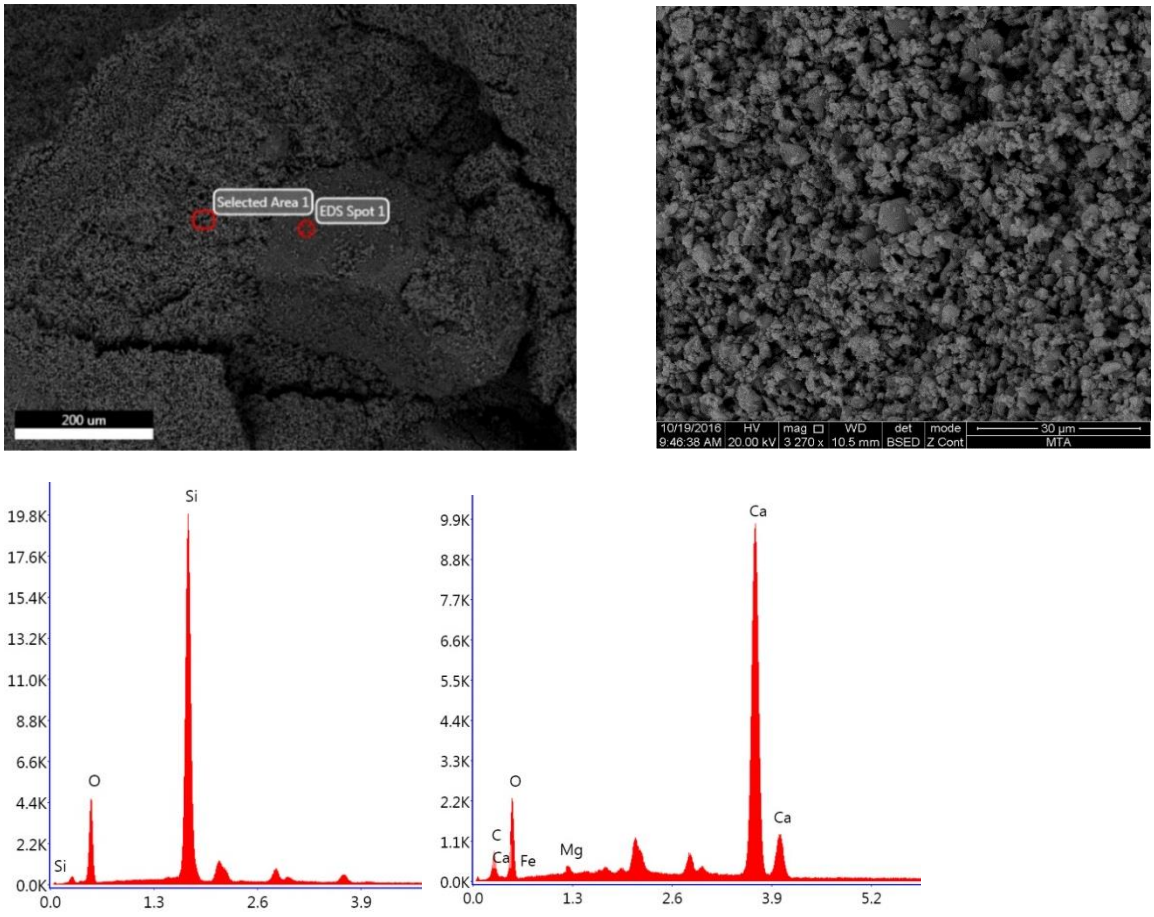
K3 grubu XRD kırınım deseni 29°'de yer alan kalsit pikleri karşılaştırıldığında, D katkılı harç serilerinin T katkılı harç serilerine göre şiddeti daha yüksek piklere sahip olduğunu söyleyebiliriz.

K1 ve K3 grubu XRD kırınım desenlerine göre, portlanditin puzolanda yer alan aktif silisler ile reaksiyona girerek hidrate oldukları ve gittikçe azalmış oldukları tespit edilmiştir. Portlanditin diyatomit katkılı harçlarda daha az miktarda kalmış olması, hem bu harçlarda daha fazla karbonatlaşma olmasından hem de diyatomitin tuğlaya göre daha yüksek puzolanik aktiviteye sahip olması ve bileşimindeki Opal A'nın portandit ile tepkimeye girerek kalsiyum silikat hidratları (C-S-H) oluşturmasındandır. XRD izleri de C-S-H yapısı oluşumuna ait bazı izleri taşımaktadır.

SEM-EDS analizi

Onarım harçları üzerinde taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve SEM'e bağlı elementel kompozisyonun belirlendiği enerji saçınımlı X-ışını spektrometresi (EDS) analizleri yapılmıştır. Analizlere ait görüntüler Resim 4.5-4.10'da ve elementel analiz sonuçları ise Çizelge 4.6-4.11'de verilmiştir.

Resim 4.5'de K1 referans serisine ait SEM görüntüsü ve EDS grafiği incelendiğinde, silisli yapıdaki kuvars agregası ile onu çevreleyen bağlayıcı fazdaki portlandit ve kalsit kristalleri görülmektedir. Mikro yapı görüntüsü, agrega ile bağlayıcı faz ara yüzünde mikro çatlakların olduğunu göstermektedir.

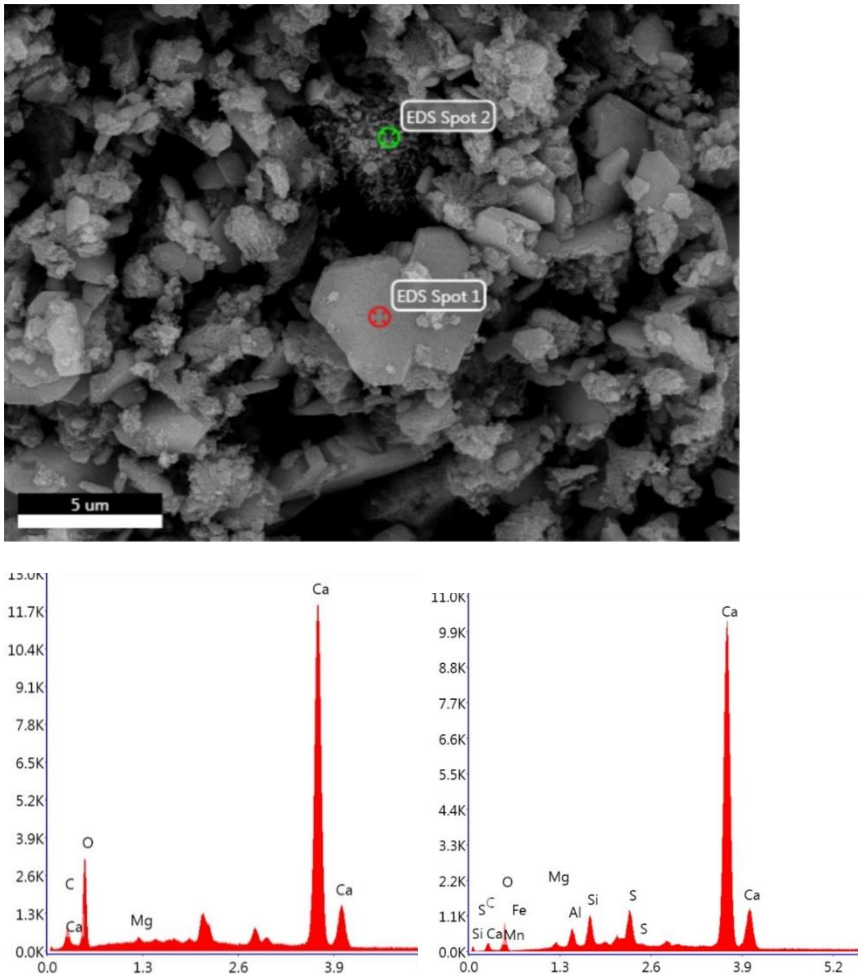


Resim 4.5. K1 onarım harcı serisine ait x400 büyütme SEM ve EDS görüntüsü

Çizelge 4.6. K1 onarım harcı agrega ve bağlayıcı kısmı EDS1-2 analiz sonuçları

Element	C	O	Mg	Ca	Si
Ağırlıkça % (Spot 1)	-	42,47	-	-	57,53
Ağırlıkça % (Area 1)	6,23	42,67	0,78	49,86	-

K1T1 serisi onarım harcının Resim 4.6'da ki SEM-EDS analizlerinde, yaklaşık 5 mikron boyutlarında Ca, C, ve O ve Mg elementlerini içeren mikritik kalsit kristalleri görülmektedir. Mikro yapı incelendiğinde, hekzagonal yapıdaki portlanditlerin daha küçük boyutlardaki kalsite dönüşmüş olduklarınıda söyleyebiliriz. Ayrıca 2 nolu EDS nokta analizinde, Ca, Si ve Al elementlerinden oluşan ve puzolanik reaksiyon ürünü olduğu düşünülen bir iğnemsi yapıda kristaller grubu tespit edilmiştir.

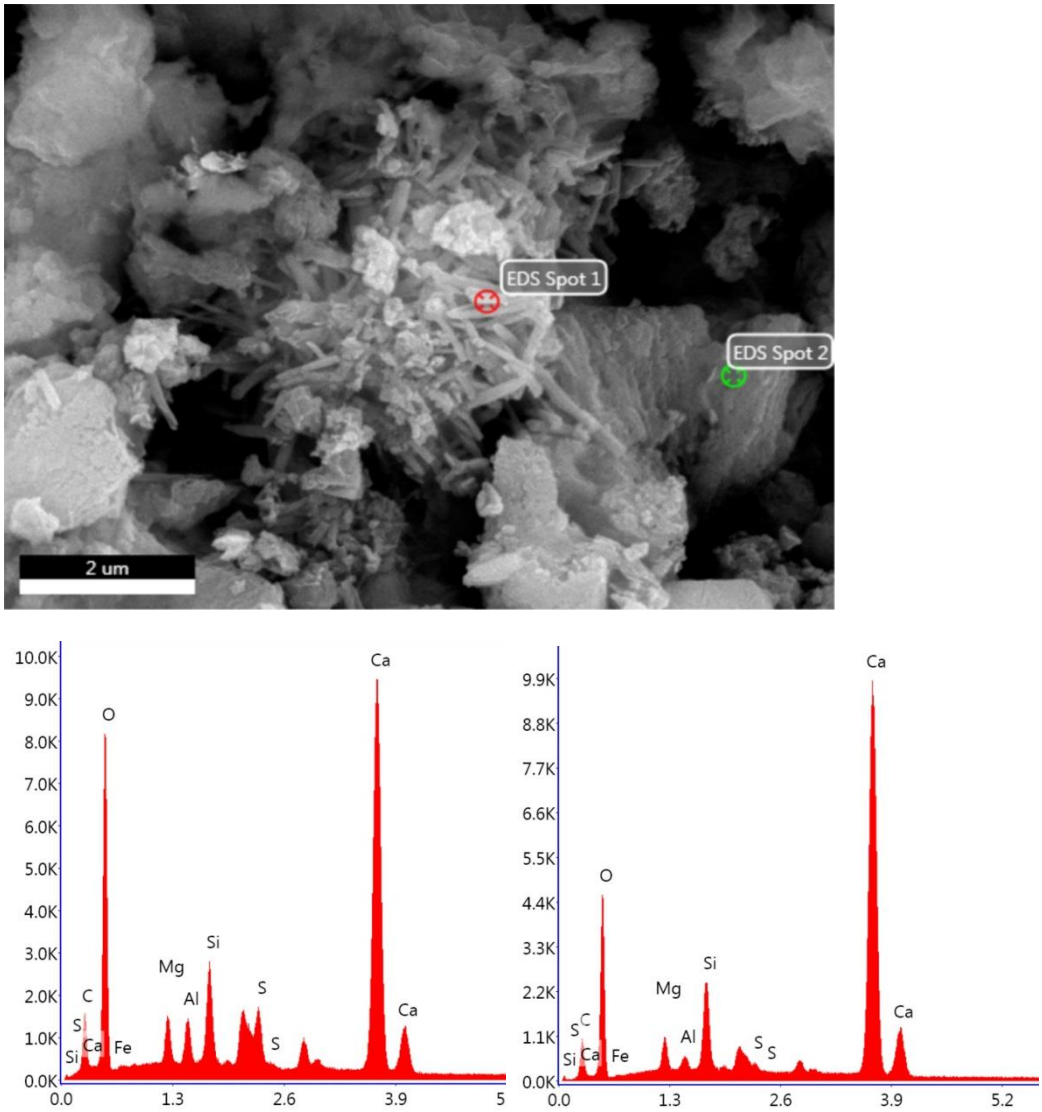


Resim 4.6. K1T1 onarım harcı serisi x13 000 büyütmeli SEM ve EDS görüntüsü

Çizelge 4.7. K1T1 onarım harcına ait EDS1-2 noktalarının analiz sonuçları

Element	C	O	Mg	Ca	Al	Si	S	Mn	Fe
Ağırlıkça % (EDS1)	5,34	46,79	0,60	47,27	-	-	-	-	-
Ağırlıkça % (EDS2)	3,08	23,01	0,72	61,63	2,02	3,04	4,99	0,68	0,83

K1D1 serisi onarım harcına ait Resim 4.7'de ki SEM-EDS analizi incelendiğinde ise, K1T serisine göre daha grift bir yapı gözlenmektedir. 1 nolu noktanın mikro yapı görüntüsü ve EDS analizi, iğnemsi bir yapının oluşumuna işaret etmektedir. 1 ve 2 nolu noktada izlenen Ca, Si, Al elementlerinin varlığı ve iğnemsi yapılar portlandit kristallerinin diyatomitle reaksiyonu sonucu oluşan ve oluşmaya devam eden bir ürün olduğuna işaret etmektedir.

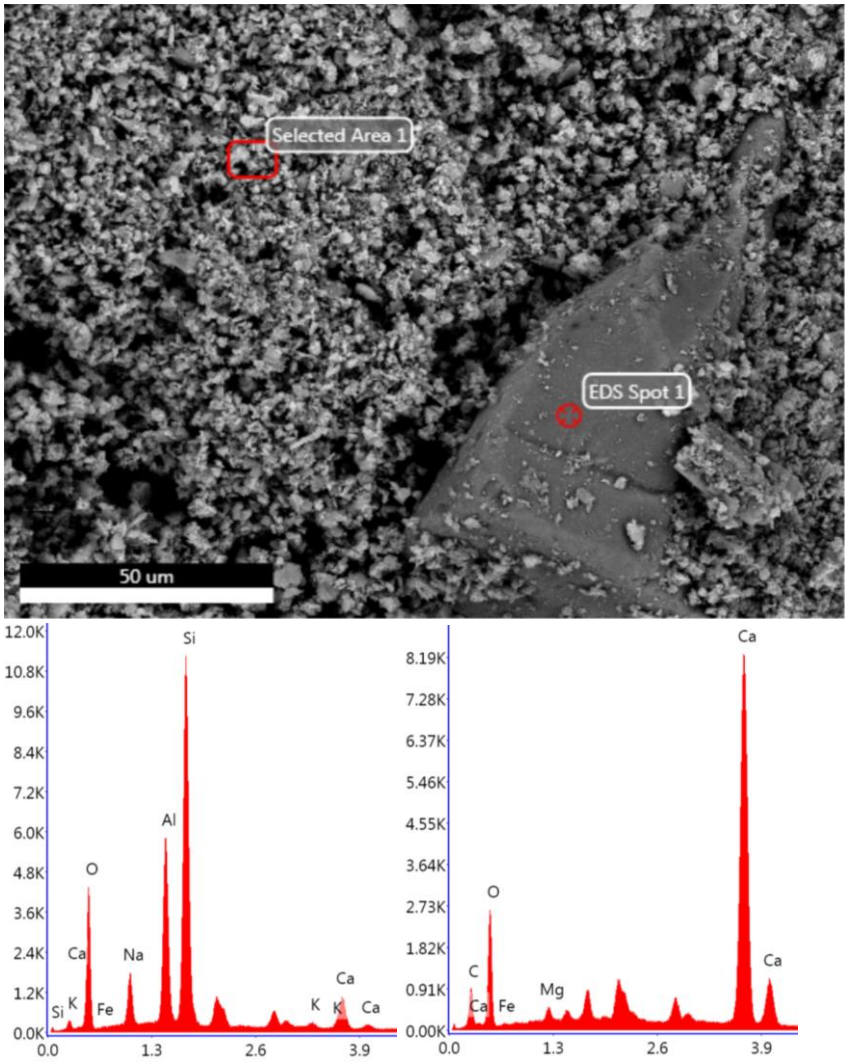


Resim 4.7. K1D1 onarım harcı serisi x35 000 büyütmeli SEM ve EDS görüntüsü

Çizelge 4.8. K1D1 onarım harcına ait EDS1-2 noktalarının analiz sonuçları

Element	C	O	Mg	Ca	Al	Si	S	Fe
Ağırlıkça % (EDS1)	8,06	54,21	2,53	25,58	1,78	3,31	4,15	0,37
Ağırlıkça % (EDS2)	6,80	48,16	2,32	35,59	0,83	4,20	1,63	0,47

Resim 4.8'de K3 referans serisi harca ait mikroyapı ve EDS analizleri verilmiştir. Mikroyapı görüntüsünde bağlayıcı kireç fazı içine gömülü plajiyoklas feldspat türü agrega görülmektedir. Bağlayıcı fazda daha baskın olarak Ca ve az miktarda Mg ve C elementlerine rastlanmıştır.

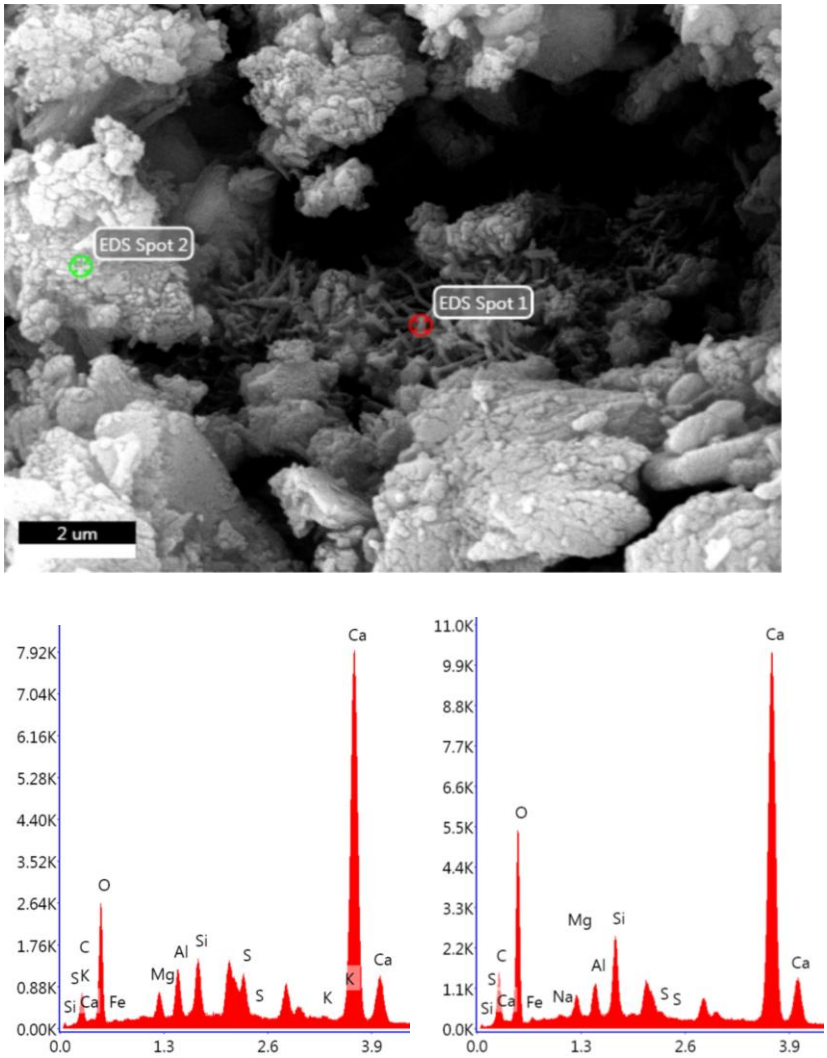


Resim 4.8. K3 onarım harcı serisi x2 000 büyütmeli SEM ve EDS görüntüsü

Çizelge 4.9. K3 onarım harcına ait EDS1-2 noktalarının analiz sonuçları

Element	C	O	Na	Mg	Ca	Al	Si	Fe
Ağırlıkça % (EDS1)	-	35,8	7,57	-	5,54	15,67	33,92	0,48
Ağırlıkça % (Area 1)	7,63	47,23	-	1,21	43,34	-	-	0,58

K3T2 onarım harcına ait mikroyapı görüntüsü Rsim 4.9'da ve EDS analiz sonuçarı ise Çizelge 4.10'da verilmiştir. K3T2 serisi x25 000 büyütmeli mikroyapı görüntüsünde, D katkılı serilere göre daha küçük boyutta kalsit kristallerinin oluştuğunu söyleyebiliriz. Kalsit kristalleri ile birlikte ortamda kalsiyum, alüminyum, silisyum ve kükürt içeren iğnemsi yeni bileşiklerin oluştuğunu söyleyebiliriz.

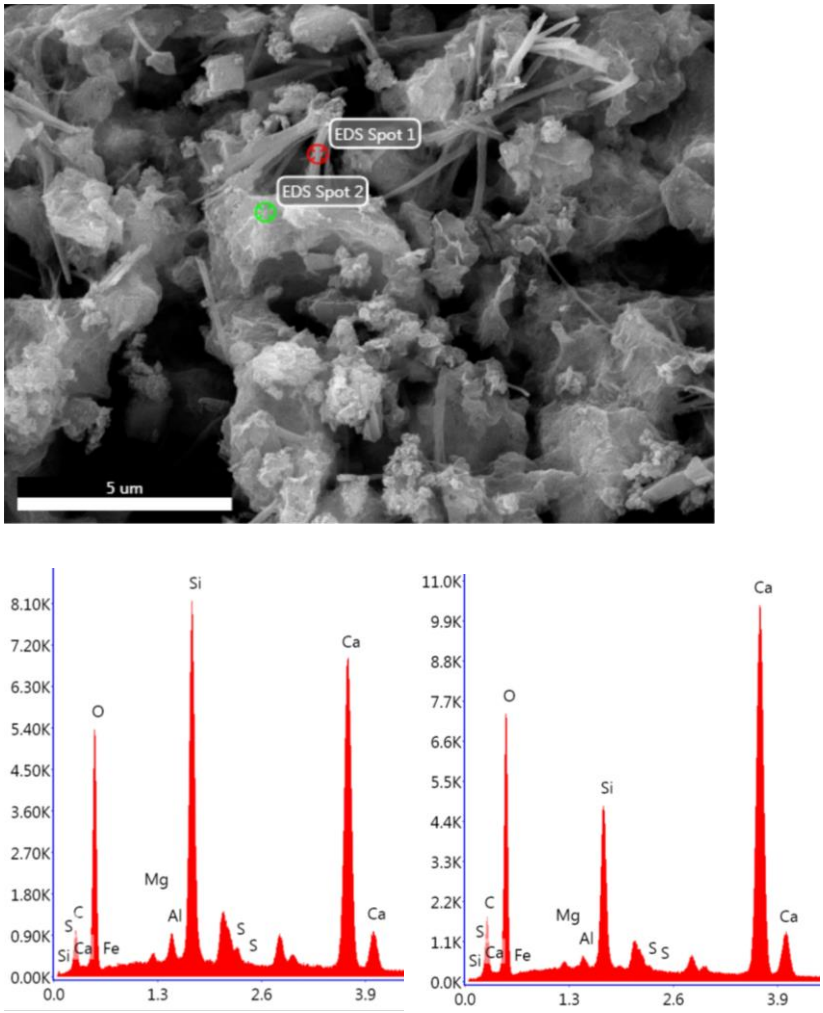


Resim 4.9. K3T2 onarım harcı serisi x25 000 büyütme SEM ve EDS görüntüsü

Çizelge 4.10 K3T2 onarım harcına ait EDS1-2 noktalarının analiz sonuçları

Element	C	O	Na	Mg	Ca	Al	Si	S	Fe
Ağırlıkça % (EDS1)	6,98	41,42	-	1,50	38,21	2,33	2,80	5,22	1,15
Ağırlıkça % (EDS2)	8,78	47,35	1,40	1,62	32,15	1,77	3,49	1,99	1,44

K3D2 serisinin mikroyapı görüntüsü incelendiğinde (Resim 4.10), diyatomit yapısının portlanditler ile kimyasal reaksiyona girerek faz değiştirmekte olduğu görülmektedir. Reaksiyon ürünü iğnemsi yapının kalsiyum silikatlı bir bileşik olduğu EDS nokta analizi ile de desteklenmektedir.



Resim 4.10. K3D2 onarım harcı serisi x20 000 büyütme SEM ve EDS görüntüsü

Çizelge 4.11 K3D2 onarım harcına ait EDS1-2 noktalarının analiz sonuçları

Element	C	O	Mg	Ca	Al	Si	S	Fe
Ağırlıkça % (EDS1)	8,82	48,90	0,32	24,49	1,00	13,23	2,99	0,26
Ağırlıkça % (EDS2)	8,85	53,16	0,81	28,34	0,68	6,34	1,49	0,32

Onarım harçlarının SEM görüntülerinde, bağlayıcı faz ile agregaların iyi bir şekilde bağlandığı ve ara yüzlerde reaksiyon ürünü olma olasılığı olan ağsı ve iğnemsi yapıların bulunduğu gözlenmiştir. Ara yüzlerde yapılan EDS analizlerinde de kalsiyum, silisyum ve alüminyum elementleri tespit edilmiştir. Bağlayıcı kireç fazında kalsiyum, agrega fazında ise silisyumun ara yüzeydekilerden daha fazladır. Bu sonuçlar, arayüzde puzolan ile kirecin reaksiyonu sonucu C-S-H ve C-A-S-H oluşumunu göstermektedir.

TGA-DTA analizleri

TGA; sıcaklığa bağlı olarak ağırlık değişimlerini ölçerken, DTA; enerji değişimlerini ölçerek, endotermik ve ekzotermik eğrileri piklerle göstermektedir.

Kirecin karbonatlaşması sonucu oluşan kalsit kristalleri ve portlanditin puzolanlar ile oluşturduğu kalsiyum silikat ve kalsiyum alüminatlı hidratlar (C-S-H, C-A-H vd.) harcın bağlayıcı kısmını oluşturmaktadır. Termogravimetrik analizlerde, 200-600°C ve 600°C üstündeki sıcaklıklardaki yüzdece kütle kayıpları hesaplanabilir. 200-600°C sıcaklıklar arasında kütlece ağırlık kayıplarının kalsiyum silikat ve kalsiyum alüminatlı hidratlar gibi reaksiyon ürünlerinin kimyasal bağ suyuna işaret etmektedir. 600°C ve daha üst sıcaklıklardaki ağırlık kayıpları ise, kalsiyum karbonatın dekompozisyonu sonucu CO_2 gazının salınımına işaret etmektedir [64,160]. Termal analizlerde 100-350°C arasındaki kütle kayıplarının silikat ve alümina hidratların dehidratasyon reaksiyonları olarak görülebileceği de belirtilmektedir [123].

Onarım harçlarına ait TGA ve DTA grafikleri Şekil 4.19-4.26'da verilmiştir. Harçların DTA grafikleri incelendiğinde, farklı sıcaklıklar arasında meydana gelen endotermik pikler gözlenmiştir. Onarım harçlarının termogravimetrik grafikleri üzerinde pikleri içine alan dört farklı sıcaklık aralığı belirlenmiş ve kütle kayıpları bu bölgeler göz önünde bulundurularak hesaplanmıştır.

Birinci bölgedeki endotermik pik deneyin başlangıç sıcaklığı ile 120°C arasındaki reaksiyondur. Bu pik, harçlarda bulunan adsorplanmış fiziksel suyun buharlaşma reaksiyonu sonucu meydana gelmektedir. İkinci bölge olan 120-350ºC sıcaklıkları arası, silikat ve alüminat hidrat ürünlerinin endotermik reaksiyonudur. Üçüncü bölge ise 390-520°C arası, $Ca(OH)_2$'de ayrılan –OH iyonlarının dehidroksilasyonu ile gerçekleşmektedir. Grafiğin dördüncü bölgesi, 520-800°C de $CaCO_3$'ın dekarboksilasyonu sonucu oluşan endotermik reaksiyonun pikidir. Belirlenen dört sıcaklık aralığı göz önünde bulundurularak yapılan kütle kayıpları Çizelge 4.12 ve 4.13'te verilmiştir.

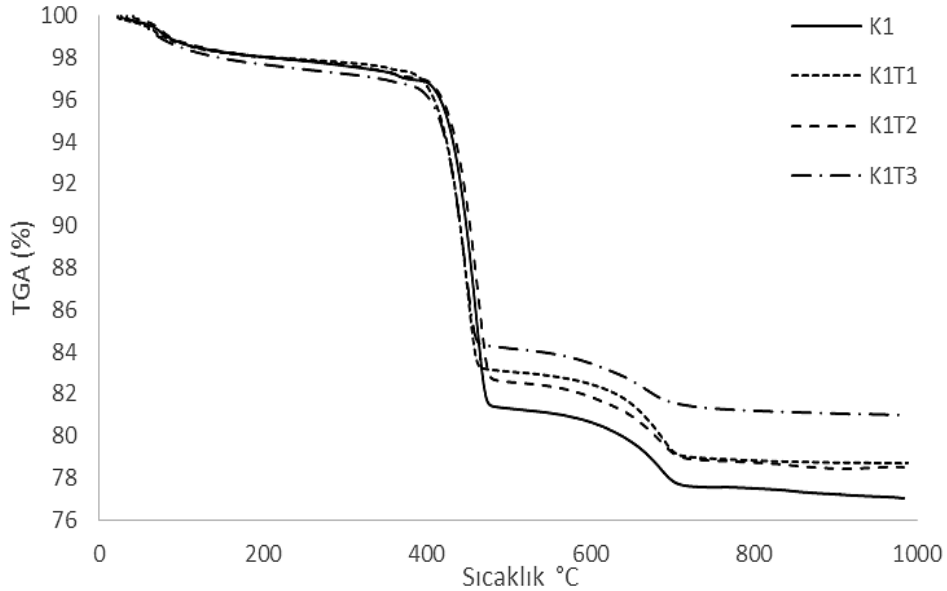
K1T ve K1D grubu harçların termogramları incelendiğinde, harçlarda D ve TT artışıyla $Ca(OH)_2$ miktarının K1 referans harcına oranla azaldığı görülmektedir. K1 grubunda, portlanditin dekompozisyonundaki en yüksek kütle kaybı %8,92 ile K1D3 serisinde

görülmüştür. Portlanditin dehidroksilasyon pikinin sıcaklığı yaklaşık 460°C olarak kaydedilmiştir.

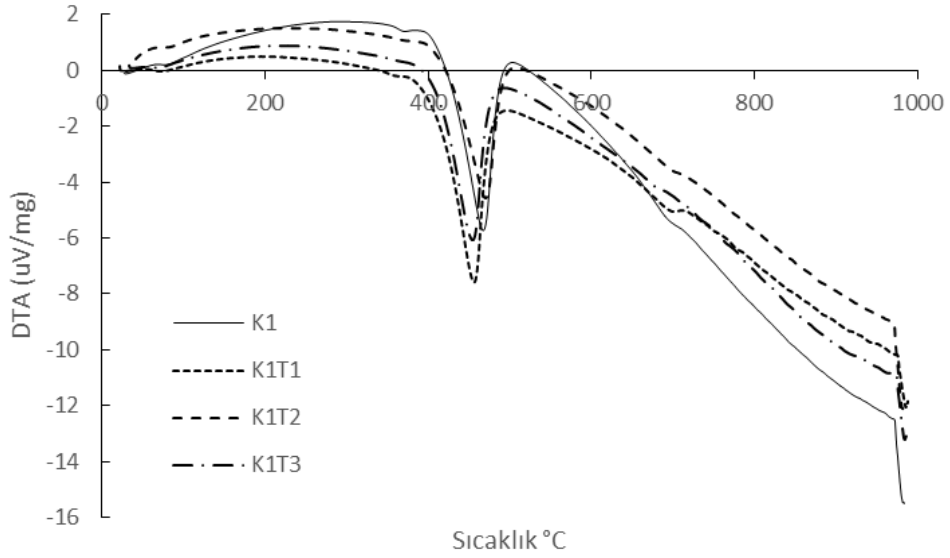
Çizelge 4.12. K1 grubu onarım harçlarına ait yüzdece ağırlık kayıpları

Numune Tipi	<120°C	120-350°C	390-520°C	520-800°C
K1	1,51	1,16	15,7	3,72
K1T1	1,53	0,91	14,09	4,16
K1T2	1,44	1,19	14,53	3,77
K1T3	1,73	1,3	12,48	2,9
K1D1	2,91	2,34	13,86	3,75
K1D2	4,47	3,19	10,02	2,92
K1D3	5,76	4,77	8,92	3,19

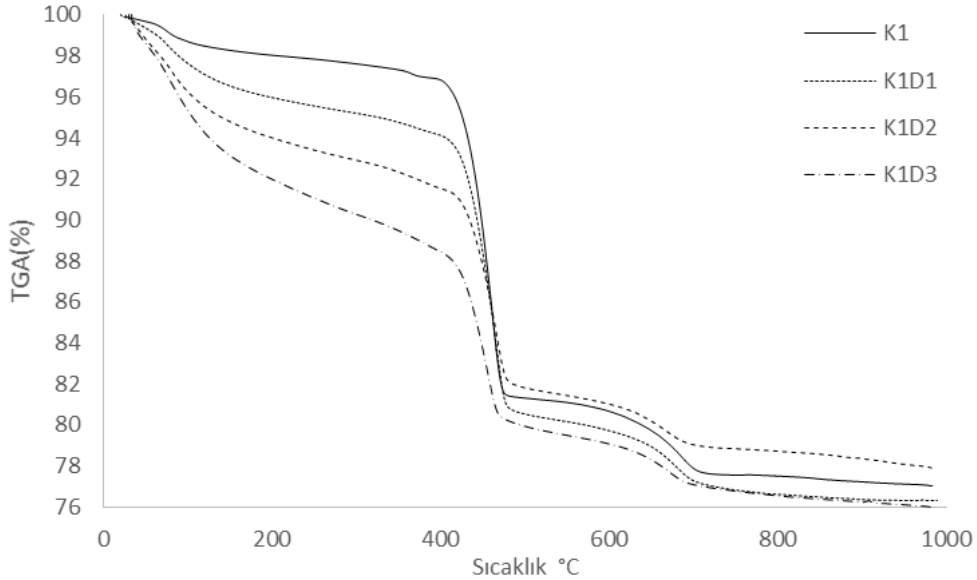
K1 grubu harçların termogramlarında $CaCO_3$ dekompozisyonu-bozunumuyla CO_2'in bileşikten ayrılması sonucu ortaya çıkan kütle kayıpları TT ve D artışıyla azalmaktadır. Bu azalma Şekil 4.17 ve Şekil 4.18'de verilen XRD difraktogramlarında da belirgin bir şekilde görülmektedir. Buradaki kütle kaybı iki şekilde açıklanabilir; (i) puzolanların portlandit ile reaksiyona girerek hidrate ürünlerin oluşması, (ii) porozitenin azalmasıyla karbonatlaşma miktarının düşük seviyede kalması olarak açıklanabilir. Termogramlar incelendiğinde, dördüncü bölgedeki eğri çizginin puzolan miktarındaki artışla beraber parabolün daha doğrusal bir çizgiye yaklaştığı yani harç içinde kalsit miktarının daha az yer aldığı görülmektedir.



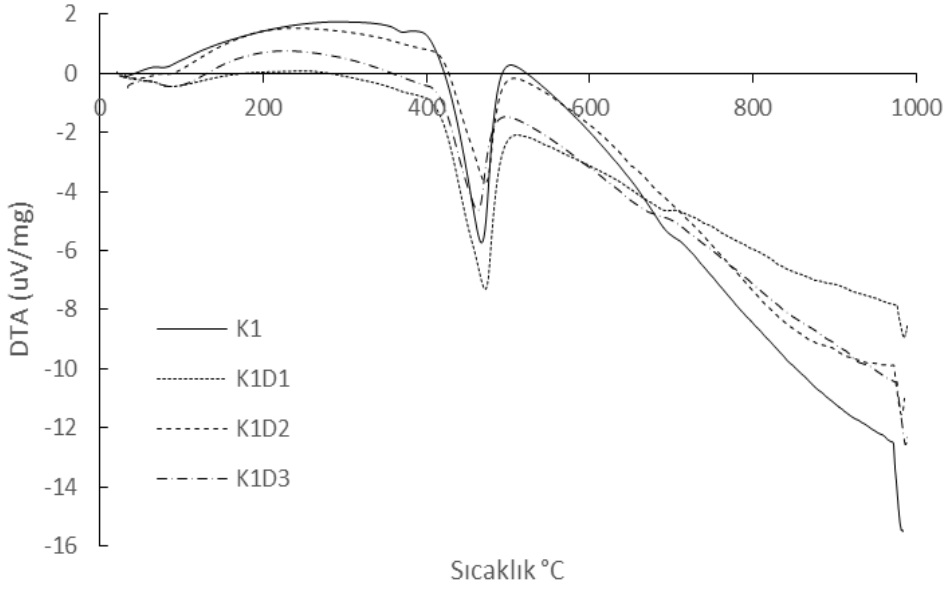
Şekil 4.19. K1T grubu onarım harçlarına ait TGA grafiği



Şekil 4.20. K1T grubu onarım harçlarına ait DTA grafiği



Şekil 4.21. K1D grubu onarım harçlarına ait TGA grafiği



Şekil 4.22. K1D grubu onarım harçlarına ait DTA grafiği

K3T ve K3D grubu harçların birinci bölgede meydana gelen fiziksel su kayıplarının K3 referans serisine oranla daha yüksek olduğu görülmektedir. Aynı zamanda D katkılı harçların bu bölgedeki kütle kayıplarının T katkılı harçlara oranla daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Bu kütle kayıplarındaki artışın diyatomitin higroskopik özelliğinden kaynaklandığı düşünülmekte ve bunun diğer araştırmacılar tarafından da tespit edildiği görülmektedir [137].

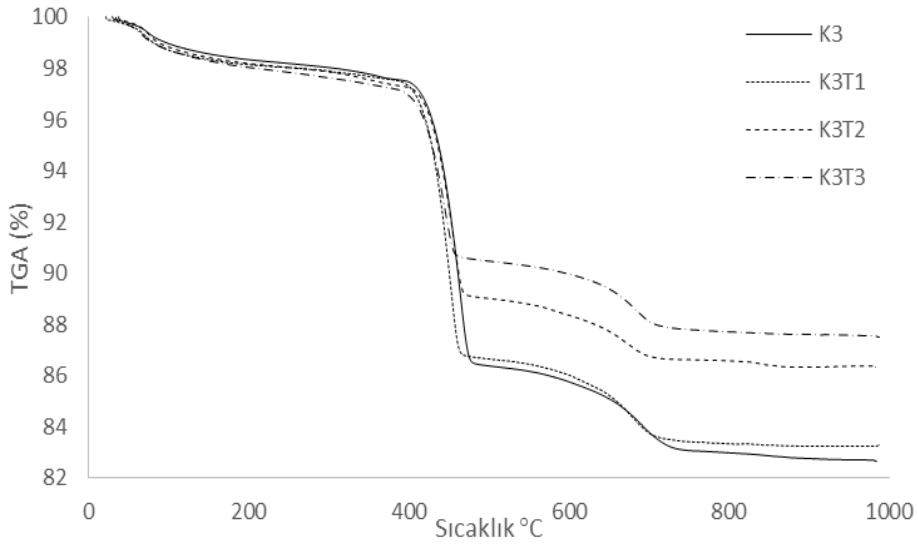
Çizelge 4.13. K3 grubu onarım harçlarına ait yüzdece ağırlık kayıpları

Numune Tipi	<120°C	120-350°C	390-520°C	520-800°C
K3	1,22	0,99	11,24	3,32
K3T1	1,48	0,85	10,89	3,23
K3T2	1,38	1,07	8,36	2,36
K3T3	1,49	1,14	6,72	2,69
K3D1	3,82	3,3	7,31	2,89
K3D2	7,09	5,54	4,25	2,76
K3D3	9,47	6,19	2,09	2,25

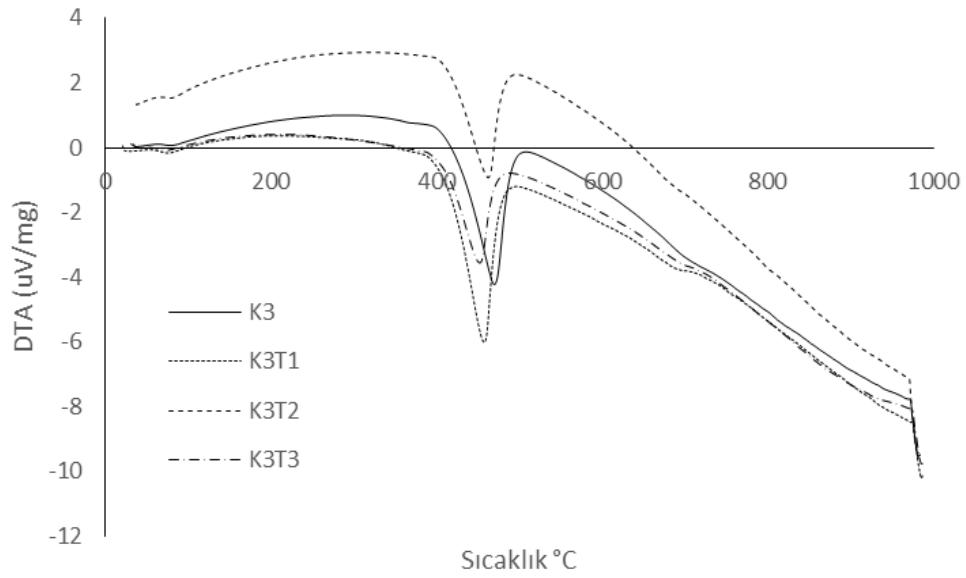
Termogramların ikinci bölgesi olan 120-200°C arasındaki endotermik pik incelendiğinde, K3D serilerinde piklerinin gittikçe büyüdüğü görülmektedir. 120-200°C aralığındaki kütle kayıpları, hidrolik ürünlerin kimayasal bağ suyunu serbest bıraktıkları bölgedir. Termogramdaki piklere bakıldığında, diyatomit katkılı numunelerde silikatlı ve alüminatlı

ürünlerin daha çok oluştuğu kütle kayıplarından anlaşılmakta ve diğer çalışmalarlada desteklenmektedir [114].

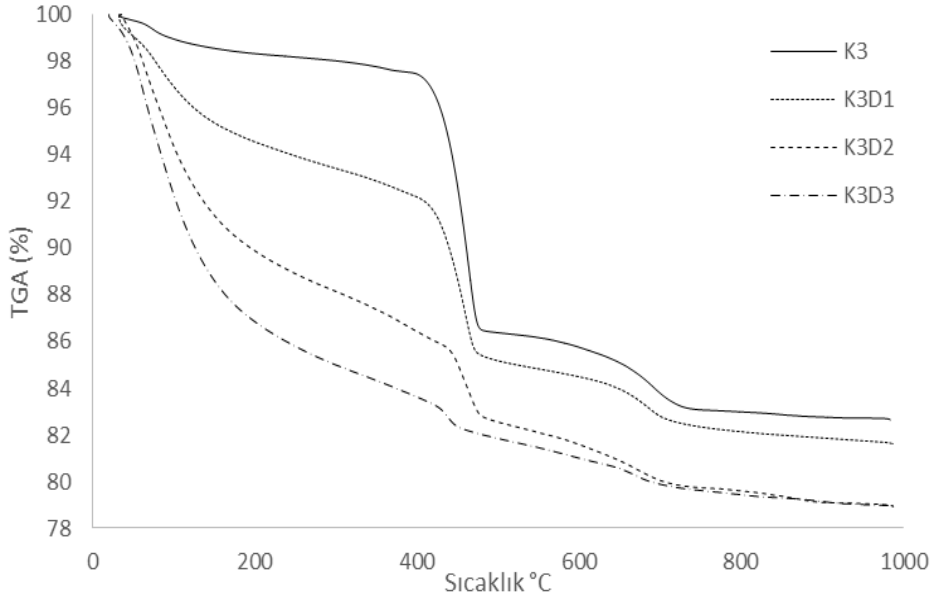
K3 grubu harçların K1'e oranla $Ca(OH)_2$ içeriği daha az olduğu için, portlanditin dehidroksilasyon piklerinin daha düşük seviyede kaldığı tespit edilmiştir. Toplam kütle kayıpları incelendiğinde, en düşük kütle kaybı K3T3 serisinde %12,5 ve en yüksek kütle kaybının ise K3D3 serisinde %24 olarak hesaplanmıştır. Aynı grubun dehidroksilasyon ve dekarboksilasyon bölgelerinde de TT'ye oranla daha düşük değerler elde edilmiştir.



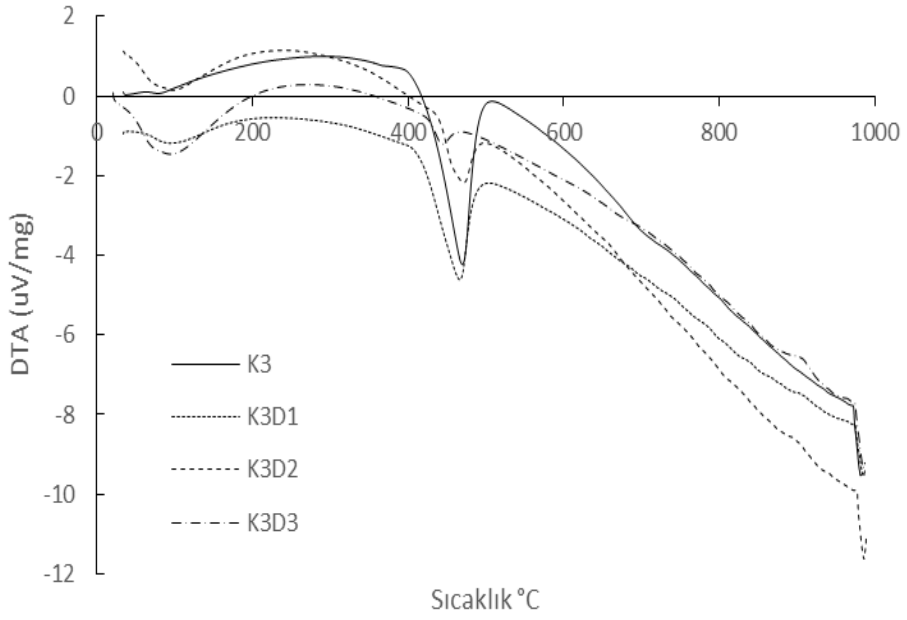
Şekil 4.23. K3T grubu onarım harçlarına ait TGA grafiği



Şekil 4.24. K3T grubu onarım harçlarına ait DTA grafiği



Şekil 4.25. K3D grubu onarım harçlarına ait TGA grafiği



Şekil 4.26. K3D grubu onarım harçlarına ait DTA grafiği

Tüm onarım harçları göz önüne alındığında, en büyük endotermik pikin 390-520ºC sıcaklıkları arasında portlanditin dehidroksilasyonu ile oluştuğu tespit edilmiştir. Ayrıca referans harçların toplam kütle kayıplarına bakıldığında, K1 ve K3 serilerinde sırasıyla %23,5 ve %17,5 değerleri elde edilmiştir. Kütle kayıplarındaki bu azalmanın, harç matrisinde bağlayıcı olarak bulunan portlanditin gerek karbonatlaşma gerekse C-S-H oluşumu tepkimeleri ile faz değiştirip azalması sebebiyle meydana geldiği düşünülmektedir. Bununla birlikte onarım harçlarının XRD pikleri ile TGA termogramlarında 90 günlük

numunelerde bile halen $Ca(OH)_2$ varlığı görülmekte, dolayısıyla karbonatlaşmanın devam ettiği düşünülmektedir.

Puzolanların onarım harcının fiziksel özelliklerine etkisi

Onarım harçlarında tüm serilerde işlenebilme sabit tutularak karışım suyu belirlenmiştir. Dolayısıyla puzolan katkılı onarım harçlarında karışım suyu miktarları değişkenlik göstermiştir. Onarım harçlarında b/a oranının azalması karışım içerisindeki ince agrega miktarının arttığını göstermektedir. Harç karışımındaki agrega miktarının artmasıyla yüzey alanı da arttığından karma suyu miktarı da artmaktadır. Bu nedenle karışımdaki agrega oranı daha fazla olan K3 serilerinin karışım suyu miktarı K1 serilerine oranla daha fazladır. D serili onarım harçlarının karışım suyu miktarları da, T katkılı serilere göre daha yüksektir. Bu durum, D puzolanının gözenekli yapıya sahip olması dolayısıyla bünyesinde daha çok su tutmasıyla açıklanabilir.

D serili onarım harçlarında K3D2 serisi dışında numune yaşı arttıkça birim hacim ağırlığı değerleri azalmaktadır. T serili onarım harçlarında da, K1T2 ve K1T3 serileri hariç D serilerine benzer şekilde birim hacim ağırlık değerleri azalmıştır. Onarım harçlarında birim hacim ağırlık değerleri azaldıkça, su emme oranları artış göstermektedir. Diğer bir deyişle harçlarda birim hacim ağırlık değerleri arttıkça, su emme oranı değerleri de azalmaktadır. Buna neden olarak, onarım harçlarının porozite değerlerinin artmasının yanı sıra puzolan olarak karışıma katılan diyatomit ve tuğla tozunun bünyesine su emmesi de gösterilebilir.

Onarım harçlarının rötre verileri irdelendiğinde, tüm serilerde rötrenin meydana geldiği belirlenmiştir. Rötre ölçümlerinin bütün yaşlarda K3 serisi rötre değerlerinin K1 serisine göre azaldığı gözlenmiştir. Bu sonuç beklenildiği gibi agrega miktarındaki artışla harçtaki büzülmenin kısıtlanması şeklinde açıklanmıştır. K3T3 serisi dışında D ve T puzolan katkılı harçlar rötreyi azaltma yönünde bir eğilim göstermiştir. D'nin mikro yapı özelliğinden yola çıkarak tahmin edilenin tersine D katkı oranı artıkça rötre miktarı referans serisini yakalamıştır. D serisi harçlarda rötrenin azalması diyatomitin $Ca(OH)_2$ ile girdiği reaksiyon sonucuyla silikatlı bileşiklerin artması ve sönmüş kirecin tüketilmesi ile açıklanabilir.

Onarım harçlarında K3 referans serilerinin 28 ve 90 günlük karbonatlaşma derinlikleri K1 referans serisinden fazladır. Bu sonuç karışımda agrega miktarının artması dolayısıyla

bağlayıcı miktarının azalmasıyla açıklanabilir. D serilerinde 28 günlük karbonatlaşmaların T serilerine göre daha hızlı olduğu görülmüş ve bu durum D'nin gözenekli yapısı sebebiyle CO_2'nin harca daha hızlı nüfuz ederek portlanditi kalsite dönüştürmesi olarak açıklanmıştır. Aynı durumu K3 serilerinin T katkılı numunlerinde de görmek mümkündür.

Puzolanların onarım harcının fiziko-mekanik ve mekanik özelliklerine etkisi

Harçların b/a oranı 1/1 olan K1 grubunda hem D hem de T katkılı harçlarda basınç dayanımları referans harca göre artmıştır. b/a oranı 1/3 olan K3 grubunda ise, D katkılı serilerin dayanımları referans harca göre artarken, T katkılı harçlarda herhangi bir artış görülmemiştir. Buna neden olarak, yüksek puzolanik aktiviteye sahip olan D'nin portlandit ile daha fazla hidrolik reaksiyon ürünü olan kalsiyum silikatlı bileşik oluşturması gösterilebilir. Onarım harçları üzerinde yapılan SEM-EDS analiz sonuçları da bu sonucu desteklemektedir.

Onarım harçlarında kullanılan puzolanik malzemelerin basınç dayanıımlarına direkt etki ettiği, harç karışımında puzolan kullanımıyla basınç dayanımlarının yeterli portlandit olması koşuluyla arttığı, ancak karışımda yeterli portlandit olmaması durumunda dayanımın yetersiz düzeyde kaldığı tespit edilmiştir.

TS EN 998-2'ye göre b/a oranı 1/1 ve 1/3 olan onarım harçlarının 28 günlük basınç dayanımı değerlerine göre referans harç numuneleri M1 kagir harcı sınıfına girmektedir. D katkılı harç serilerinin K1D1 serisi dışında M2,5; T katkılı serilerin ise M1 kagir harcı sınıfında olduğu belirlenmiştir. 90 günlük basınç dayanımı değerleri dikkate alındığında, TS EN 998-2'ye göre K1, K3 ve K3T serilerinin M1, K1D serileri ile K3D3'ün M2,5 ve K3D1, K3D2'nin M5 harç sınıfına dahil olduğu görülmüştür. Bu sonuçlara göre, en yüksek dayanıma sahip harçlar K3D1 ve K3D2 olarak belirlenmiştir.

Puzolanların onarım harçlarında kullanma oranı arttıkça harcın elastisite modülü değerleri de artmaktadır. b/a oranı 1/3 olan K3 grubu Emod değerlerinin b/a oranı 1/1 olan K1 grubuna kıyasla daha yüksektir. K3 grubunda K1 grubunun tersine D oranı arttıkça Emod değerleri azalmaktadır. Bu azalma, K3D serilerinde harç yapısında porozitenin artmasıyla açıklanmıştır.

Puzolanların onarım harcının mikro yapılarına etkileri

SEM görüntüleri ile termal analizlerin 520-800°C aralığındaki ağırlık kayıplarından, D katkılı harçların T katkılı harçlara göre karışımdaki portlanditi daha fazla tükettiği görülmüştür. Bu durum D'nin aktivitesi yüksek bir puzolan olduğunu göstermektedir.

XRD kırınım eğrilerinde referans harcına göre puzolan katkılı onarım harçlarında portlandit pikinin azalması, portlanditin D ile etkili bir şekilde ve T ile az da olsa reaksiyona girerek karbonatlaşmaya ek olarak C-S-H oluşturması ve harcın basınç dayanımının artmasıyla açıklanabilir. Puzolan katkılı onarım harçlarının TG analizi 120-200°C aralığındaki hidrolik ürünlerden kaynaklı ağırlık kayıpları da bu durumu desteklemektedir.

b/a oranının onarım harcının fiziksel özelliklerine etkisi

Sırasıyla b/a oranı 1/1 ve 1/3 olan onarım harçlarının birim hacim ağırlık değerleri azaldıkça, su emme oranları puzolanlarda olduğu gibi artış göstermektedir. Diğer bir deyişle harçlarda birim hacim ağırlık değerleri arttıkça, su emme oranı değerleri de azalma eğilimi göstermektedir. Karışımdaki ince agrega miktarı artan 1/3 grubunda 1/1 grubuna göre birim hacim ağırlık değerlerindeki artış, yaklaşık olarak D serilerinde %20 ve T serilerinde ise %30 dolayındadır.

b/a oranının onarım harcının mekanik özelliklerine etkisi

Laboratuvarda üretilen onarım harcı karışımlarında b/a oranının basınç dayanımına etkisi, karışıma giren puzolana bağlı olarak değişiklik göstermektedir. D katkılı ve b/a oranı 1/3 olan K3 grubunun basınç dayanımı değerleri b/a oranı 1/1 olan K1 grubu değerlerinden daha yüksek elde edilmiştir. Diğer taraftan T katkılı onarım harçlarında tersine bir durum söz konusudur. b/a oranı 1/1 olan veya diğer bir ifadeyle karışımda kireç miktarı fazla olan T katkılı K1 grubu onarım harçlarında ileri yaşlarda basınç dayanım değerlerinin K3'e göre oldukça yüksektir. Bu sonuç, harç karışımında çok miktarda kireç olması durumunda T'nin az da olsa puzolanik özellik göstermesiyle açıklanabilir.

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu deneysel tez çalışmasında, Tarihi Sungurpaşa hamam yapısında alınan özgün örgü harç numuneleri ile alternatif onarım harç numunelerinden elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir:

5.1. Sonuçlar

5.1.1. Tarihi Sungurpaşa hamamı özgün örgü harçları

Tarihi Sungurpaşa hamam yapısı kubbesinde bulunan tuğla örgü harçlarının incelenmesi, hammadde özelliklerinin ile fiziksel ve mekanik özelliklerin belirlenmesi sonucunda Osmanlı dönemi harç teknolojisi hakkında bilgiler edinilmiştir. Harç bileşenlerinin hammadde özelliklerinin, harcın durabilite, fiziksel ve fizikomekanik özellikleri üzerinde oldukça etkili olduğu düşünülmektedir.

Tarihi hamam yapısının tuğladan yapılmış kubbe bölümünde kullanılan özgün örgü harç numunelerinin birim hacim ağırlığının düşük (1,65 g/cm^3), görünür porozitesinin yüksek (%35-40) ve basınç dayanımının yeterli düzeyde olduğu belirlenmiştir.

Agregaların tane boyu dağılımında birçok tarihi yapıda olduğu gibi ince agrega miktarının daha fazla olduğu ve agregaların kuvars, feldspat ve biotit gibi metamorfik kayaç parçalarından oluştuğu tespit edilmiştir. Bağlayıcı matrisin saf kireç olduğu XRD ve SEM-EDS analizleriyle saptanmıştır. Bu sonuca göre özgün örgü harçlarının puzolanik kireç harçları olduğu söylenebilir.

Özgün örgü harç numunelerinin ağırlıkça yaklaşık 1/1 ile 1/1,5 bağlayıcı/agrega (b/a) oranlarına sahip olduğu asit kaybı analizi ve ince kesit analizleri üzerinden belirlenmiştir. Harcın en önemli bileşenlerinin saf bağlayıcı kireç, puzolanik madde ve tane boyu dağılımı uygun agrega olduğu saptanmıştır.

5.1.2. Alternatif onarım harçları

- Onarım harçlarında kullanılan diyatomitin (D) puzolanik aktivitesinin mekanik dayanım ve elektriksel iletkenlik deneyleri sonucunda yüksek puzolanik malzeme sınıfına girdiği, ancak tuğla tozunun (T) her iki yöntem kullanılarak yapılan deneyden elde edilen sonuçlara göre daha düşük seviyede aktivite gösteren bir puzolan olduğu tespit edilmiştir.

- Onarım harçlarına ait taze ve sertleşmiş birim hacim ağırlık değerleri benzer sonuçlara sahiptir. K1 grubu harçların sertleşmiş birim hacim ağırlık ortalaması 1,24 g/cm^3, K3 grubunun ise 1,56 g/cm^3 olarak elde edilmiştir. K1 ve K3 grubunda D katkı oranı arttıkça birim hacim ağırlık değerleri azalırken, T katkısı ile değerin arttığı belirlenmiştir.

- Ağırlıkça su emme verilerine göre, kireç oranı daha fazla olan K1 grubunun K3 grubuna göre su emme oranı daha yüksektir. K1 serisi harçlarda D oranı arttıkça 28 ve 90 gün su emme değerleri artmaktadır. T katkılı harçların su emme değerleri K1 grubunda azalırken, K3 serisinde değişim göstermemiştir.

- Onarım harçlarının gözeneklilik değerleri K1 ve K3 harç gruplarında sırasıyla %44-50 ve %35-43 arasında değişmektedir. K1 ve K3 grubunda D miktarı arttıkça porozitenin doğrusal olarak arttığı görülmüştür. K1 grubunda T miktarı arttıkça porozitenin azaldığı, K3 grubunda seriler arasında farkın olmadığı tespit edilmiştir. K1 ve K3 grubu onarım harcı görünür porozite değerlerinin tarihi yapıların örgü harcı porozite değerlerine yakın olduğu söylenebilir.

- Su buharı geçirgenliği değerleri, beklenildiği gibi 90 gün yaşlarında 28 gün yaş numunelerine göre daha düşüktür. K3 grubu SD (Su buharı geçirimliliğine eşdeğer hava kalınlığı) değerleri K1 grubu ile kıyaslandığında, K1 grubunda diyatomit artışıyla SD değeri artış gösterirken, K3 grubunda tersi yönde bir eğilim ortaya çıkmıştır. Standartta belirtilen SD değerleri tablosuna göre onarım harçlarında tüm serilerin orta seviyede su buharı geçirimliliğine sahip olduğu söylenebilir.

- Onarım harçlarında b/a oranının azalmasıyla rötre değerleri de azalmıştır. K1 ve K3 referans harçları karşılaştırıldığında, toplam agrega miktarının %25 arttırılmasıyla rötre değerinin ~%30 azalacağı belirlenmiştir.

- Diyatomitin onarım harçlarında rötre miktarını arttırdığı ancak %30 D katkısının 90 gün sonunda hem K1 hem de K3 gruplarındaki referans serilerinin rötre değerlerine eşit olduğu tespit edilmiştir. Harç karışımına giren T miktarı arttıkça rötre değerlerinin olumlu yönde azaldığı belirlenmiştir.

- Onarım harcı basınç dayanımlarının tüm serilerde 28, 56 ve 90 gün yaşlarında arttığı tespit edilmiştir. K1 ve K3 gruplarında en yüksek basınç dayanımı sırasıyla 3,78 MPa ile K1D2 serisinde ve 5,21 MPa ile K3D1 serisinde elde edilmiştir.

- D katkılı onarım harçlarının basınç dayanımları bütün yaşlarda K1 ve K3 referans serilerinden daha yüksektir. T katkılı onarım harçlarında ise, K1 grubunda referans seriyi geçerken K3 grubunda referans seri basınç dayanımı değerinin altında kalmıştır.

- K1 grubunda kireç oranının yüksek olması sebebiyle karbonatlaşma derinliklerinin K3 grubuna göre daha fazla olduğu belirlenmiştir. 90 gün yaşındaki bütün serilerin karbonatlaşma derinliklerinin birbirine yakın değerler aldığı görülmüştür.

- Tüm seriler içinde en yüksek karbonatlaşma derinliği K3 referans serisinde elde edilmiştir. K3 grubu içinde K3T serisinin, K3D serilerine oranla daha fazla karbonatlaşma gösterdiği belirlenmiştir.

- Tüm serilerin XRD izlerinde portlanditin CO_2 ile yaptığı reaksiyon sonucu olarak kalsit ve ayrıca agregadan gelen kuvars mineralleri tespit edilmiştir. XRD desenlerinde portlandit piklerinin K3 grubunda diyatomit miktarı arttıkça azaldığı, tuğla tozu arttıkça ise çok az bir azalma görüldüğü tespit edilmiştir.

- D katkılı onarım harçlarının SEM-EDS analizlerinde puzolan ile portlanditin reaksiyonu sonucunda kalsiyum silikatlı bileşiklerin oluştuğu, ayrıca T katkılı serilerde ise Ca, Si, Al ve S elementlerini içeren ince tüp şeklinde yapılar görülmüştür.

- TGA-DTA eğrilerinde 390-520°C aralığındaki endotermik reaksiyon sonucunda, D ve T katkılı harçların referans numunelerden daha az $Ca(OH)_2$ içerdiği tespit edilmiştir.

- On dört seri onarım harcı üzerinde yapılan deneyler sonucunda, D katkılı harçlarda K1D2 ve T katkılı harçlarda K1T3 serisinin Tarihi Sungurpaşa hamam yapısına ait özgün örgü harcının fiziksel ve fizikomekanik özelliklerini karşıladığı belirlenmiştir.

Yapılan bu çalışmadan elde edilen sonuçlar; ülkemizdeki somut kültürel mirasımız olan tarihi yapıların malzeme karakterizasyonu literatürüne bir katkı sağlayacağı, tarihi yapıların restorasyon çalışmaları için bir veri olacağı ve elde edilen verilerin tarihi yapıların koruma ve onarım çalışmalarında kullanılabileceği sonucuna varılmıştır.

5.2. Öneriler

- Tarihi Sungurpaşa hamam yapısının onarılması durumunda, D katkılı harçlarda K1D2 ve T katkılı harçlarda K1T3 serisinin kullanılması uygun görülmektedir.

- K1D1 ve K1T1 kodlu onarım harçları yüksek gözeneklilik, düşük birim hacim ağırlık, yeterli basınç dayanımı ve yüksek elastisite modülü değerlerine sahip olduğundan, Türkiye'de bulunan birçok tarihi yapının restorasyonunda onarım harcı olarak kullanılabilir.

- Kireç harçlarına değişik puzolanik katkılar ilavesiyle üretilen puzolanlı kireç harçlarının priz süreleri ve harçların reolojisi incelenebilir.

- Onarım harçlarının, deney gününe kadar ortam sıcaklığı ve karbondioksiti ölçülebilen ortamda bekletilerek incelenmesi yararlı olabilir.

- Sönmüş toz kireç ve kaymak kirecin çeşitli puzolanik katkılar ilavesi ile oluşan karbonatlaşma ve C-S-H tepkimeleri incelenebilir.

KAYNAKLAR

1. Akman, S. (2003). Yapı malzemelerinin tarihsel gelişimi. *Türkiye Mühendislik Haberleri*, 426, 30-36.

2. Caner-Saltık, E.N. (2005). Koruma uygulamalarında uyum ve dayanıklılık tanımları: Yapının tahribatsız yöntemlerle analizi ve malzeme araştırmaları. *Korumada 50 Yıl*, 293-305.

3. European Research Councils Chemistry Comittee. (2006). *Characterization of ancient mortars: Present methodology and future perspectives.* Evora University: National Laboratory of Civil Engineering (LNEC).

4. Gürdal, E. ve Ersen, A. (2000). Tarihi yapılarda duvar onarımları ve tarihsel otantikliğin korunması. Eyüp Sokullu Mehmet Paşa medresesi örneği, *5. Eyüp Sempozyumu*, İstanbul.

5. Artel, T. (1969). *Yapı Malzemesi* (Birinci baskı). İstanbul: Osman Yalçın Matbaası, 181-210.

6. Singer, C.A. (1977). *History of Technology* (First edition). London: The Johns Hopkins University Press.

7. Klemm, A.V. (1989). Cementitious materials: Historical notes. The *American Ceramic Society*, 1, 1-26.

8. Marotto, T.W. (2002). *Basic Construction Materials*. Upper Saddle River, New Jersey: Prentice Hall.

9. Erdoğan, S. ve Erdoğan, T. (2007). *Bağlayıcı Malzemelerin ve Betonun On bin Yıllık Tarihi*. Ankara: ODTÜ Geliştirme Vakfı.

10. Debes, G. (1949), *Kagir, Beton, Betonarme Cilt I-Kireç ve Çimentolar Harçlar-Beton* (çev. Akil Muhtar Şuvak). İstanbul Teknik Üniversitesi Matbaası, 11-67.

11. Oss, G.H. (2005). Background facts and issues concerning cement and cement data, *Open-File Report 1152*, U.S. Geological Survey, 2-20.

12. Cowper, A. D. (2000). *Lime and Lime Mortars*. (First edition 1927). London: Donhead Press.

13. Swallow, P. and Carrington, D. (1995). Limes and lime mortars: part one. *Journal of Architectural Conservation*, 1 (3), 2-25.

14. İnternet: Akbulut, U. Çimento ve Betonun Tarih İçinde Gelişimi. URL: http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Fwww.uralakbulut.com.tr%2Fwp-content%2Fuploads%2F2012%2F12%2Fcimeto.pdf&date=2017-08-15, Son Erişim Tarihi: 15.08.2017.

15. Sabbioni, C. and Zappia, G. (1997). *Sulphur and carbon compounds on damaged mortars in ancient masonry*. 4th International Symposium on the Conservation of Monuments in the Mediterranean, Rodos.

16. Chiari G., Santarelli, M. and Toracca G. (1992). Charatterizzazione delle malte antiche mediante l' analisi di campioni non frazionati. *Materiali e Strutture*, 3(2), 111-137.

17. Livingston, AR., Stuzman, EP., Mark R. and Erdik M. (1992). Preliminary analysis of the masonry of Hagia Sophia basilica. *Materials Research Society*, 267, 721-736.

18. Binda, L. and Baronio, G. (1986). Indagine sull'aderenza tra legante e laterizio in malte ed intonaci di 'cocciopesto'. *Bolettino d'Arte*, 35-36, 109-115.

19. Blaeuer, C. and Kueng, A. (2007). Examples of microscopic analysis of historic mortars by means of polarising light microscopy of dispersions and thin sections. *Materials Characterization*, 58, 1199-1207.

20. Boynton, R. (1980). *Chemistry and Technology of Lime and Limestone*. New York: John Wiley and Sons.

21. Oates, J.A. (1998). *Lime and Limestone Chemistry and Technology*. Germany: Wiley-VCH Press.

22. Pavı´a, S. and 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.

23. Faria, P., Henriques, F. and Rato, F. (2008). Comparative evaluation of lime mortars for architectural conservation. *Journal of Cultural Heritage*, 9, 338-346.

24. Ashurst, J. (2003). *Mortars, Plasters and Renders in Conservation* (Second edition). London: Eclesiastical Architects and Surveyors Association Press.

25. Griffin, I. (2005). Grouts for the conservation of architectural surfaces. *Getty Conservation Institute*, 5, 1-17.

26. Kılıç, Ö. (2005). *Klasik Eberhart tipi kireç fırınları ile paralel akışlı Maerz fırınlarındaki kalsinasyon parametrelerinin karşılaştırılması ve Çukurova bölgesi kireçtaşları üzerine uygulamalar*. Doktora Tezi, Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana.

27. Song, H. S. and Kim, C. H. (1990). The effect of surface carbonation on the hydration of the CaO. *Cement and Concrete Research*, 20, 815-823.

28. Lokman, L. (2000). *Kireç*. İstanbul: Kireç Üreticileri Birliği Yayınları.

29. Böke, H., Akkurt, S. ve İpekoğlu, B. (2004). Tarihi yapılarda kullanılan Horasan harcı ve sıvalarının özellikleri. *Yapı Dergisi*, 269, 90-94.

30. Kılıç, Ö. ve Anıl, M. (2006). Kireç söndürme şartlarının söndürülmüş kireç kalitesine etkisi. *Madencilik*, 45(1), 15-22.

31. Mellaart, J. (1967). *Çatal Höyük: A Neolithic town in Anatolia.* London: Thames & Hudson Press.

32. Von Landsberg, D. (1992). The history of lime productionand use from early times to the ındustrial revolution. *Zement Kalk Gips, 45*, 199-203.

33. Kingery, W.D., Vandiver, P.B. and Prickett, M. (1988). The beginnings of pyrotechnology, part II: production and use of lime and gypsum plaster in the pre-pottery neolithic Near East. *Journal Field Archaeology*, 15, 219-244.

34. Davey, N. (1961). *A History of Building Materials*. London: Phoenix House.

35. Mertens, G., Snellings R., Van Balen K., Bicer-Simsir B., Verlooy P. and Elsen J. (2009). Pozzolanic reactions of common natural zeolites with lime and parameters affecting their reactivity. *Cement Concrete Research*, 39, 233–240.

36. Moorehead, D. (1986). Cementation by carbonation of hydrated lime. *Cement and Concrete Research*, 16, 700-708.

37. Van Balen, K. and Van Gemert, D. (1994). Modelling lime mortar carbonation, *Materials and Structures*, 27, 393-398.

38. Callebaut, K. (2000). *Characterization of historical lime mortars in Belgium: ımplications for restoration mortars*. PhD Thesis, Katholieke University, Leuven.

39. Lanas, J. and A´ lvarez-Galindo J.I. (2003). Masonry repair lime-based mortars: factors affecting the mechanical behavior. *Cement and Concrete Research*, 33(11), 1867-1876.

40. Dheilly, R.M., Tudo, J., Sebai bi, Y. and Que´neudec, M. (2002). Influence of storage conditions on the carbonation of powdered $Ca(OH)_2$. *Construction and Buildings Materials*, 16, 155-161.

41. Martınez Ramırez, S., Sanchez Cortes, S., Garcıa Ramos, J.V. et. al. (2003). Micro-Raman spectroscopy applied to depth profiles of carbonates formed in lime mortar. *Cement and Concrete Research*, 33, 2063-2068.

42. De Buergo Ballester, M.A. and Gonzalez Limon T. (1994). Restauracio´n de edificios monumentales. *Monografıas del Ministerio de Obras Publicas*, Madrid.

43. Radonjic, M., Hallam, K.R., Allen, G.C. and Hayward, R. (2001). *Mechanism of carbonation in lime-based materials.* Proceedings of the 8th Euroseminar on Microscopy Applied to Building Materials, Athens.

44. Jackson, N. and Dhir, R.K. (1996). *Concrete-aggregate in Civil Engineering Materials (Fifth edition).* UK: Macmillan, Basingstoke, 179-181.

45. Stefanidou, M. and Papayianni, I. (2005). The role of aggregates on the structure and properties of lime mortars. *Cement and Concrete Composites*, 27, 914-919.

46. Tasong, W.A., Lynsdale, C.J. and Cripps, J.C. (1998). Aggregate-cement paste interface: Influence of aggregate physical properties. *Cement and Concrete Research*, 28, 1453-1465.

47. Neville, A.M. (1995). *Admixtures in Properties of Concrete (Fourth edition)*. Washington DC: Prentice Hall Pearson Education, 244-248.

48. Kwan, A.K. and Fung, W.W. (2009). Packing density measurement and modeling of fine aggregate and mortar. *Cement and Concrete Composites*, 31, 349-357.

49. Stefanidou, M. and Papayianni, I. (2005). *Inclusion of Ancient Technology in Selected Mortars*. Proceeding of the 10th Euroseminar on Microscopy Applied to Buildng Materials, Paisley, Scotland.

50. Elsen, J. (2006). Microscopy of historic mortars-a review. *Cement and Concrete Research*, 36, 1416-1424.

51. Degryse, P., Elsen, J. and Waelkens, M. (2002). Study of ancient mortars from Sagalassos (Turkey) in view of their conservation. *Cement and Concrete Research*, 32(9), 1457-1463.

52. Tunçoku, S. S. and Saltık, E. N. (2006). Opal-A rich additives used in ancient lime mortars. *Cement and Concrete Research*, 36(10), 1886-1893.

53. Moropoulou, A. et. al. (2002). Advanced Byzantine cement based composites resisting earthquake stresses: the crushed brick/lime mortars of Justinian's Hagia Sophia. *Construction and Building Materials*, 16(8), 543-552.

54. Altaş, G.K., Özgünler, S.A. ve Güldal, E. (2012), İstanbul'daki Roma dönemi saray yapılarındaki Horasan harçlarının incelenmesi. *Vakıf Restorasyon Yıllığı*, 4, 41-49.

55. Postacıoğlu, B. (1986). *Bağlayıcı Maddeler, Agregalar, Beton; Cilt I1: Agregalar-Beton*. İstanbul: Matbaa Teknisyenleri Basımevi.

56. Hewlett, P.C. (1998). *Lea's Chemistry of Cement and Concrete* (Fourth Edition). New York: John Wiley and Sons Inc.

57. Takemeto, K. et al. (1980). *Hydration of pozzolanic cements*. Proceeding of 7th International Congress on Chemistry of Cements, Paris, 1-28.

58. Sersale, R. and Rebuffat, P. (1970). *Microscopic Investigations of Hardened Lime-Pozzolana Pastes, Zement, Kalk, Gips*, 23 (4), 182-184.

59. Massazza, F. (1974). *Chemistry of pozzolanic additions and mixed cements*. Proceeding of 6th International Congress on Chemistry of Cements, Moscow.

60. Erdoğdu, K. vd. (2009). *Traslar ve Traslı Çimentolar*. Ankara: Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği Yayınları 99.2.

61. Boffey, G. and Hirst, E. (1999). The use of pozzolans in lime mortar. *Journal of Architectural Conservation*, 5 (3), 34-36.

62. Moropoulou, A. Bakolas, A. and Anagnostopoulou, S. (2005). Composite materials in ancient structures. *Cement and Concrete Composites*, 27, 295-300.

63. Ashall, G., Butlin, R. N., Teutonico, J. M. and Martin, W. (1996). *Development of Lime Mortar Formulations for Use in Historic Buildings (Smeaton Project)*. Proceedings of the Seventh International Conference on Durability of Building Materials and Components.

64. Moropoulou, A., Bakolas, A. and Bisbikou, K. (2000). Investigation of the technology of historic mortars. *Journal of Cultural Heritage*, 1, 45-58.

65. Budak, M., Akkurt, S. and Böke, H. (2010). Evaluation of heat treated clay for potential use in intervention mortars. *Applied Clay Science*, 49, 414-419.

66. Schueremans, L., Cizer, Ö., Janssens, E., Serre, G. and Van Balen K. (2011). Characterization of repair mortars for the assessment of their compatibility in restoration project: Research and Practice. *Construction and Building Materials, 25(12), 4338-4350.*

67. Dayı, M., Aruntaş, H.Y., Çavuş, M. ve Şimşek, O. (2013). Zeolit, uçucu kül ve atık cam malzemelerin Portland kompoze çimento üretiminde kullanılabilirliğinin araştırılması. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 28 (3), 491-499.

68. Baronio, G., Binda, L. and Lombardini, N. (1997). The role of brick pebbles and dust in conglomerates based on hydrated lime and crushed bricks, *Construction and Building Materials*, 11(I), 33-40.

69. Naumann, R. (2007). *Eski Anadolu Mimarlığı* (çev. Beral Madra). Ankara: Türk Tarih Kurumu.

70. Sickels, L.B. (1981). Organic additives in mortars. *Edinburgh Architecture Research*, 8, 7-20.

71. Medici, F., Pıga, L., Rinaldi, G., et al. (2000). Behaviour of polyaminophenolic additives in the granulation of lime and fly ash. *Waste Management*, 20, 491-498.

72. Jedrzejewska, H. (1960). Old mortars in Poland: a new method of investigation. *Studies in Conservation*, 5, 132-138.

73. Frizot, M. (1981).*L'analyse des mortiers antiques; problèmes et résultats*. Proceedings of the Symposium, Mortars, Cements and Grouts used in the Conservation of Historic Buildings, Rome.

74. Dupas, M. (1981). *L'analyse des mortiers et enduits des peintures murales et des bâtiments anciens*. Proceedings of the Symposium, Mortars, Cements and Grouts used in the Conservation of Historic Buildings, Rome.

75. Cliver, E.B. (1974). Tests for analysis of mortar samples. *Bulletin-Association for Preservation Technology*, 6, 68-73.

76. Furlan, V. and Bissegger, P. (1975). Les mortiers anciens, histoire et essais d'analyse scientifique, *Revue suisse d'art et d'archéologie*, 32, 2-14.

77. Stewart, J. and Moore, J. (1981). *Chemical techniques of historic mortar analysis*. Proceedings of the Symposium, Mortars, Cements and Grouts used in the Conservation of Historic Buildings, Rome.

78. Palazzo-Bertholon, B. (1999). Archéologie et Archéométrie des mortiers et des enduits médiévaux, Etude critique de la bibliographie. *Archéologie Médiévale,* 29, 191-216.

79. Middendorf, B., Baronio, G., Callebaut, K. and Hughes, J.J. (2000). *Chemical Mineralogical and Physical-Mechanical Investigations of Old Mortars.* Proceedings of the International RILEM-workshop, Historic mortars: characteristics and tests, Paisley: 53–61.

80. Van Balen, K. Toumbakari, E.E. Blanco-Varela, M.T. Aguilera, J. Puertas, F. Sabbioni, C. Zappia, G. Riontino, C. Gobbi, G. (2000). *Procedure for a Mortar Type Identification: a Proposal*. Proceedings of the International RILEM-workshop, Historic mortars: characteristics and tests, Paisley.

81. Martinet, G. and Quenée, B. (2000). *Proposal for a useful methodology for the study of ancient mortars*. Proceedings of the International Rilem workshop, Paisley.

82. Van Balen, K., Toumbakari, E.E., Blanco-Varela, M.T., Aguilera, J., Puertas, F., Palomo, A., Sabbioni, C., Riontino, C. and Zappia, G. (2003). *Environmental deterioration of ancient and modern hydraulic mortar*. Protection and Conservation of European Cultural Heritage, Research Report European Commission.

83. Elert, K., Rodriguez-Navarro, C., Sebastian Pardo, E., Hansen, E. and Cazallo, O. (2002). Lime mortars for the conservation of historic buildings. *Studies in Conservation*, 47, 62-75.

84. Henriques, F.A. (2004). *Replacement Mortars in Conservation: an Overview*. Proceedings of the 10th Int. Congress on Deterioration and Conservation of Stone, ICOMOS, Stockholm: 1-11.

85. Papayianni, I. (2005). *Design and manufacture of repair mortars for interventions on monuments and historical buildings*. Proceedings of the International Rilem-workshop, Paisley.

86. Mark, R. and Çakmak, A. Ş. (1994). *Mechanical tests of material from the Hagia Sophia*. New Jersey: Princeton University Press.

87. Yuzugullu, O., Durukal, E. and Beyen, K. (1998). *Assessment of mortar and brick properties of Hagia Sophia by nondestructive testing techniques conversation*. İstanbul: Bogazici University.

88. Çakmak, A.S., Davidson, R., Mullen, C.L. and Erdik, M. (1993). *Structural Repair and Maintenance of Historical Buildings*-III. Boston: Computational Mechanics Publications, 67-84.

89. Çakmak, A.S., Moropoulou, A and Mullen, C.L. (1995). Interdisciplinary study of dynamic behavior and earthquake response of Hagia Sophia. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 14,125-133

90. Baronio. G. and Binda, L. (1991). *Experimental approach to a procedure for the investigation of historic mortars.* International Historical BricBlock Masonry Conference, Berlino.

91. Baronio, G., Binda, L., Saisi, A. and Squarcma. T. (1994). *Borgo di Castevoli: proposta per un metodo d'indagine de1 degrado*. Vulnerabilita dell'edijicato e culture sismiche locali, Italy.

92. Oğuz C., Türker F., Koçkal N.U. (2015). *Myra ve Andriake limanı'nda Roma dönemi harç, tuğla ve taşların özellikleri*. 5. Tarihi Yapıların Güçlendirilmesi ve Geleceğe Güvenle Devredilmesi Sempozyumu, Erzurum.

93. Denel, S. (1982). *Batılılaşma Sürecinde İstanbul'da Tasarım ve Dış Mekanlarda Değişim ve Nedenleri*. Ankara: Ebniye Beyannamesi, 40-45.

94. Moropoulou, A., Cakmak, A.S., Biscontin, G., Bakolas, A. and Zendri, E. (2002), Advanced byzantine cement based composites resisting earthquake stresses the crushed brick/lime mortars of Justinian's Hagia Sophia. *Construction and Building Materials*, 16(8), 543-552.

95. Ashurst, J. and Ashurst, N. (1990). *Practical Building Conservation: English Heritage Technical Book*. London: Gower Technical Press.

96. Lynch, G. (1994). *Brickwork 1*. Shaftesbury: Donhead Publishing.

97. Böke, H. and Akkurt, S. (2003). Ettringite formation in historic bath brick lime plasters. *Cement and Concrete Research*, 33(9), 1457-1464.

98. Böke H, Akkurt S, İpekoğlu, B., Uğurlu, E. (2006). Characteristics of brick used as aggregate in historic brick-lime mortars and plasters. *Cement Concrete Research*, 36(6), 1115-1122.

99. Orbaşlı, A. (2004). *Architectural Conservation: Princeples and Practice*. UK: Blackwell Publishing.

100. Croci, G. (2000). *The Conservation and Structural Restoration of Architectural Heritage*. Southampton: WIT Press.

101. Küçükkaya, A.G. (2014). *Yapı Taşlarının Restorasyonu*, İstanbul: Özlem Matbaacılık.

102. Caner, E. (1984). *Tarihi Anıt Taşların Bozulmaları ve Koruma Sorunları*. 4. Arkeometri Sempozyumu, Ankara.

103. Torraca, G. (1982). *Porous building materials, materials science for architectural conservation*. International Centre for The Study of The Preservation and The Restoration of Cultural Property, Italy.

104. Leslie, A.B. and Gibbons, P. (2000). M*ortar analysis and repair specification in the conservation of scottish historic buildings*. Proceedings of the International Rilem workshop, Historic mortars: characteristics and tests, Paisley.

105. Moropoulou, A., Bakolas, A. and Agelakopoulou, E. (2004). Evaluation of pozzolanic activity of natural and artificial pozzolans by thermal analysis. *Thermochimica*, 420(1-2), 135-140.

106. Ersen, A., Karagüler, M. and Güleç, A. (1995). *Possible Substitutes for Khorasan Mortar in Byzantine and Otoman Monuments*. International Colloquium Methods of Evaluating Products for the Conservation of Porous Building Materials in Monuments, Rome.

107. Berlucchı, N. and Ginanni Corradini, R. (1995). *Experimentation of a Chemical-Physical Methodology for the Reconstruction of Historic Mortars*. International Colloquium Methods of Evaluating Products for the Conservation of Porous Building Materials in Monuments, Rome.

108. Tuncoku S. S., Caner-Saltık E. N. and Böke H., (1993). *Definition of the Materials and Related Problems of a XIIIthCentury Anatolian Seljuk 'Mesjid': A Case Study in Konya City*. Proceedings of the International UNESCO-RILEM Congress, Paris.

109. Caner, E., Göze Akoğlu, K., Caner-Saltık, E.N., Demirci, Ş. ve Yaşar, T. (2005). *Bazı Ortaçağ çatı örtüsü sıvalarının hammadde özellikleri*. 21.Arkeometri Sonuçları Toplantısı Bildiri Kitabı, Antalya.

110. Van Balen, K., Papayianni, I., Van Hees, R., Binda, L. and Waldum, A. (2005). Characterisation of old mortars with respect to their repair ıntroduction to requirements for and functions and properties of repair mortars. *Rilem TC 167-COM*, 781-785.

111. Henriques, F. and Charola, E. (1996). *Comparative study of standard test procedures for mortars*. Proceeding 8th International Congress on Deterioration and Conservation of Stone, Berlin.

112. Rota Rossi-Doria, P. (1986). Mortars for restoration: basic requirements and quality control. *Materials and Structures*, 19(6), 445-448.

113. Holmstrom, I. (1981). *Mortars, cements and grouts for conservation and repair, some urgent needs of research.* Mortars. Cements and grouts for Conservation of Historic Buildings Symposium 3, Rome.

114. Moropoulou, A., Bakolas, A. et al. (2005). Strength Development and Lime Reaction in Mortars for Repairing Historic Masonries, *Cement Concrete Composites*, 27(2), 289-294.

115. Caner Saltık, E.N., Güney, B.A., et al. (2011). *Development of Repair Mortars for The Ruined Stone Towers in Perge Archaeological Park Site*. Jardins de Pierres, Conservation of Stone in Parks, Gardens and Cemeteries, Paris.

116. Tosun, Y. ve Oltulu, M. (2015). *Hidrolik kireçli harçlarda uçucu kül kullanımı*. 5. Tarihi Eserlerin Güçlendirilmesi ve Geleceğe Güvenle Devredilmesi Sempozyumu-1, Erzurum, 103-111.

117. Veiga, M.R., Velosa, A. and Magalhaes, A. (2009). Experimental applications of mortars with pozzolanic additions: Charecterization and performance evaluation. *Construction and Building Materials*, 23(1), 318-327.

118. Caner, E., Demirci, Ş. and Türkmenoğlu, A.G. (1985). *Deterioration of Dolomite by Soluble Salts in Divriği Great Mosque*. 5th International Congress on Deterioration and Conservation of Stone, Lausanne, 453-464.

119. Canbaz, M. ve Topçu, İ. (2009). *Restorasyon harçlarının özellikleri*, Uluslararası Katılımlı Tarihi Eserlerin Güçlendirilmesi ve Geleceğe Güvenle Devredilmesi Sempozyumu, Diyarbakır, 759-772.

120. Fragata, A., Pavia, H., et al. (2007). *Application of crushed glass residues in mortars.* Sustainable Construction Symposium, Portugal.

121. Cazalla, O., Rodriguez-Navarro, C., et al. (2002). Aging of Lime Putty: Effects on Traditional Lime Mortar Carbonation, *Journal of American Seramic Society*, 83(5), 1070-1076.

122. Pavia, S. and Treacy, E. (2006). A comparative study of the durability and behaviour of fat lime and feebly-hydraulic lime mortars. *Materials and Structures*, 39(3), 391-398.

123. Falchi, L., Müller, U., Fontana, P., Izzo, F. and Zendri, E. (2013). Influence and effectiveness of water-repellent admixtures on pozzolana-lime mortars for restoration application. *Construction and Building Materials*, 49, 272-280.

124. Margalha, M. et al. (2013). Microstructural changes of lime putty during aging. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 25, 1524-1532.

125. Cerny, R., Kunca, A., Tydlitat, V., Drchalova, J. and Rovnanikova, P. (2006). Effect of pozzolanic admixtures on mechanical, thermal and hygric properties of lime plasters. *Construction and Building Materials*, 20, 849-857.

126. Ötüken, Y. vd. (1986). *Türkiye'de Vakıf Abideler ve Eski Eserler Cilt IV*. Ankara: Vakıflar Genel Müdürlüğü Yayınları.

127. Peroni, S., Tersigni, C. and Torraca, G. (1981). *Lime Based Mortars for the Repair of Ancient Masonry and Possible Substitutes*. In Mortars, Cements And Grouts Used İn The Conservation Of Historic Buildings, Rome.

128. Réunion Internationale des Laboratoires et Experts des Matériaux. (1980). *Recommended tests to measure the deterioration of stone and to assess the effectiviness of treatment methods* (*tentative recommendations)*, 173-253.

129. American Society for Testing and Materials Standards. (1994). *Standard test method for determination of the point load strength index of rock and application to rock strength classifications (ASTM D 5731-08)*. Philadelphia: ASTM.

130. Tunçoku, S.S. (2001). *Characterization of masonry mortars used in some Anatolian Seljuk monuments in Konya, Beyşehir and Akşehir*. Ph. D., Middle East Technical University Graduate School of Natural and Applied Sciences, Ankara.

131. Brook, N. (1985). The equivalent core diameter method of size and shape correction in point-load testing, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science & Geomechanics*, 22(2), 61-70.

132. American Society for Testing and Materials Standards. (1990). *Standard test method for laboratory determination of pulse velocitis and ultrasonic elastic constants for rock. (ASTM D 2845-90)*. Philadelphia: ASTM.

133. Topal T. (1995). *Formation and deterioration of fairy chimneys of kavak tuff in Ürgüp Göreme area (Nevşehir-Turkey)*. Doktora Tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

134. Middendorf, B. and Knöfel, D. (1990). U*se of old and modern analtical methods for the determination of ancient mortars in Northern Germany*. Proceedings of the 3rd Expert Meeting, Berlin: 75-92.

135. Teutonico, J.M. (1988). *Porous Building Materials, in A Laboratory Manual for Architectural Conservators*, Rome: ICCROM Publishing, 35-68.

136. Demirer, A. ve Alaygut, D.(1993). *Magmatik Kayalar*. Ankara: TPAO Araştırma Merkezi Grubu Başkanlığı Eğitim Yayınları.

137. Aruntaş, H.Y., Albayrak, M., Saka, H.A. ve Tokyay, M. (1998), Ankara Kızılcahamam ve Çankırı Çerkeş yöresi diyatomitlerinin özelliklerinin araştırılması. *Turkish Journal of Engineering and Environmental Science*, 22(4), 337-343.

138. Sujeong, L., Kim, Y.J. and Moon, H. (1999). Phase transformation sequence from kaolinite to mullite ınvestigated by an energy-filtering transmission electron microscope. *American Ceramic Society*, 82(10-5), 2841-2848.

139. Türk Standartları Enstitüsü. (2002). *Çimento deney metotları-bölüm1: dayanım tayini (TS EN 196-1)*. Ankara: TSE.

140. Luxan, M.P., Madruga, F. and Saavedra, J. (1989). Rapid evaluation of pozzolanic activity of natural products by conductivity measurements. *Cement and Concrete Research*, 19, 63-68.

141. Kılıç, Ö., Böke, H., Akkurt, S. ve İpekoğlu, B. (2004). *Tarihi St. Jean Kilisesi'nde kullanılan Horasan harçlarının özellikleri*. 2.Ulusal Yapı Malzemesi ve Kongresi, Ankara.

142. Türk Standartları Enstitüsü. (1997). *Agregaların genel özellikleri için deneyler-kısım 1 numune alma metotları (TS EN 932-1)*. Ankara: TSE.

143. Türk Standartları Enstitüsü. (2000). *Kagir harcı-deney metotlar-bölüm 3: taze harç kıvamının tayini (yayılma tablası ile) (TS EN 1015-3)*. Ankara: TSE.

144. Türk Standartları Enstitüsü. (2001). *Kâgir harcı-deney metotları-bölüm 10: sertleşmiş harcın boşluklu kuru birim hacim kütlesinin tayini (TS EN 1015-10)*. Ankara: TSE.

145. Türk Standartları Enstitüsü. (2007). *Doğal taşlar deney yöntemleri-gerçek yoğunluk, görünür yoğunluk, toplam ve açık gözeneklilik tayini (TS EN 1936)*. Ankara: TSE.

146. Teutonico, J.M. (1986). *A Laboratory Manual for Architectural Conservators*. International Centre for the Study of the Preservation and Restoration of Cultural Property, Italy, 32-122.

147. Postacıoğlu, B. (1986). *Bağlayıcı Maddeler, Agregalar, Beton; Cilt 1: Bağlayıcı Maddeler*. İstanbul: Matbaa Teknisyenleri Basımevi.

148. Lawrence, R.M.H. (2005). *A critical review of techniques used for the assessment of carbonation in lime mortars.* Proceedings of the 2005 International Building Lime Symposium, Florida/Washington DC: National Lime Association.

149. Elenı, D., Thomas, S., Aurela, S. and Frederık, V. (2014). *Literature study on the rate and mechanism of carbonation of lime in mortars*. 9th International Masonry Conference at Guimaraes, Portugal.

150. Lawrence R. (2006). *A study of carbonation in non-hydraulic lime mortars*, Ph.D. Thesis, University of Bath, Claverton.

151. Kozlu, H. (2010). *Kayseri yöresindeki tarihi harçların karakterizasyonu ve onarım harçlarının özellikleri*. Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

152. Gordana, A. Topličić, Ć., et al. (2014). Characterızatıon of roman mortar from the medıana archeologıcal sıte. *Tehnički Vjesnik* 21(1), 191-197.

153. Ulukaya, S., Yüzer, N., Yoruç, A. ve Hazar, B. (2013). *Kireç harçlarının tanımlanmasında uygulanan deney yöntemlerinin Bizans, Selçuklu ve Osmanlı yapı örneklerinde irdelenmesi*, 4. Tarihi Yapıların Güçlendirilmesi Ve Geleceğe Güvenle Devredilmesi Sempozyumu, İstanbul.

154. Thomson, M., Lindqvist, J.E. and Elsen, C. (2004). *Groot, porosity of historic mortars*. Proceedings of the 13th International Brick and Block Masonry Conference, Amsterdam.

155. Uğurlu Sağın E. (2012). *Characteristics of roman mortars produced from natural and artificial pozzolans in Aigai and Nysa*. Ph.D., İzmir Institute of Technology Graduate School of Natural and Applied Sciences, İzmir.

156. Türk Standartları Enstitüsü. (2006). *Boyalar ve vernikler - kâgir ve beton dış cepheler için kaplama malzemeleri ve sistemleri-bölüm1:sınıflandırma (TS EN 1062-1)*. Ankara: TSE.

157. Carr, J.G. (1995). *An investigation on the effect of brick dust on lime-based mortars*. M.Sc. Thesis, University of Pennsylvania, Harrisburg.

158. Papayianni, I. (2004). C*reep deformation of lime-based repair mortars. the effect of aggregate size*. 13th International Brick and Block Masonry Conference, Amsterdam.

159. Güney, B. A. (2012), *Development of pozzolanıc lıme mortars for the repaır of hıstorıc masonry*. Ph. D., Middle East Technical University Graduate School of Natural and Applied Sciences, Ankara.

160. Bakolas, A., Biscontin, G., Moropoulou, A. and Zendri, E. (1998). Characterization of structural Byzantine mortars by thermogravimetric analysis. *Thermochima Acta*, 321 (1-2), 151–160.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : DAYI, Mustafa
Uyruğu : T.C.
Doğum tarihi ve yeri : 02.12.1979, İzmir
Medeni hali : Evli
Telefon : 0 (312) 202 88 60
Faks : 0 (312) 202 89 47
e-mail : mustafadayi@gazi.edu.tr



Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet Tarihi
Doktora	Gazi Üniversitesi / Yapı Eğitimi	Devam ediyor
Yüksek lisans	Gazi Üniversitesi / Yapı Eğitimi	2006
Lisans	Abant İzzet Baysal Üniversitesi / Yapı Öğretmenliği	2011
Lise	Çınarlı Teknik Lisesi-İnşaat	1997

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2003-Halen	Gazi Üniversitesi	Araştırma Görevlisi
2001-2003	Abant İzzet Baysal Üniversitesi	Araştırma Görevlisi
2000-2001	Erkon Çelik Konstrüksiyon	Saha Şefi

Yabancı Dil

İngilizce

Hobiler

Basketbol, Yüzme, Koordinasyon.



GAZİ GELECEKTİR..