T.C.
İSTANBUL ÜNİVERSİTESİ-CERRAHPAŞA
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

DOKTORA TEZİ

Yüksek Sıcaklık Etkisine Maruz Kalmış Metakaolin Esaslı Geopolimerin Bakterilerle Otonom ve Otojen İyileştirilmesi

Mahmoud ZIADA

DANIŞMAN
Prof. Dr. Savaş ERDEM

II. DANIŞMAN
Prof. Dr. Harun TANYILDIZI

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

İnşaat Mühendisliği Programı

Ekim, 2022

TEZ KABUL VE ONAYI

Mahmoud ZIADA tarafından, **Prof. Dr. Savaş ERDEM** danışmanlığında hazırlanan **" Yüksek Sıcaklık Etkisine Maruz Kalmış Metakaolin Esaslı Geopolimerin Bakterilerle Otonom ve Otojen İyileştirilmesi "** başlıklı bu çalışma, jürimiz tarafından **24/10/2022** tarihinde yapılan sınav sonucunda **oy birliği** ile başarılı bulunarak **Doktora Tezi** olarak kabul edilmiştir.

Tez Jürisi

		İmza	**Sonuç**
DANIŞMAN	Prof. Dr. Savaş ERDEM İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı		☒ Kabul ☐ Ret
ÜYE	Prof. Dr. Özlem SOLA İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı		☒ Kabul ☐ Ret
ÜYE	Prof. Dr. Mücteba UYSAL Yıldız Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı		☒ Kabul ☐ Ret
ÜYE	Prof. Dr. Orhan CANPOLAT Yıldız Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı		☒ Kabul ☐ Ret
ÜYE	Doç. Dr. Anıl NİŞ İstanbul Gelişim Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı		☒ Kabul ☐ Ret

Aileme ithaf ediyorum…

BÜTÇE DESTEKLERİ

Yüksek Sıcaklık Etkisine Maruz Kalmış Metakaolin Esaslı Geopolimerin Bakterilerle Otonom ve Otojen İyileştirilmesi

Bu tez çalışması, Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu'nun (TÜBİTAK) 119M063 numaralı projesi ile desteklenmiştir.

TEŞEKKÜR

Doktora süresi boyunca her alanda değerli tecrübelerini ve desteklerini esirgemeyen ve sürekli yol gösteren danışman hocalarım Sayın Prof. Dr. Savaş ERDEM ve Sayın Prof. Dr. Harun TANYILDIZI'a sonsuz şükranlarımı sunarım.

Tezimin tüm aşamalarında desteklerini ve zamanlarını esirgemeyen Sayın Prof. Dr. Mücteba UYSAL başta olmak üzere tüm 119M063 numaralı projesinin ekibine sonsuz teşekkürlerimi bildiririm.

Ayrıca Tez İzleme Komitesi'ndeki muhterem Hocalarım Sayın Prof. Dr. Özlem SOLA ve Sayın Doç. Dr. Anıl NİŞ'e öneri ve tavsiyeleriyle yapmış oldukları kıymetli katkıları için teşekkürü borç bilirim.

Son olarak, Doktora süresi boyunca eğitim ve özel hayatımda yanımda duran meslektaşım ve sevgili eşim Dr. Öğr. Üyesi Yosra TAMMAM'a sevgilerimi sunarım.

Ekim 2022 Mahmoud ZIADA

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

TEZ KABUL VE ONAYI ..... **iii**
BEYAN ..... **iv**
BÜTÇE DESTEKLERİ ..... **vi**
TEŞEKKÜR ..... **vii**
İÇİNDEKİLER ..... **viii**
ŞEKİL LİSTESİ ..... **x**
TABLO LİSTESİ ..... **xv**
SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ ..... **xvi**
ÖZET ..... **xviii**
SUMMARY ..... **xx**
1. GİRİŞ **1**
2. GENEL KISIMLAR **3**
2.1. GEOPOLİMER VE GEOPOLİMERİZASYON 3
2.2. GEOPOLİMER İLE İLGİLİ GENEL ÇALIŞMALAR 4
2.3. GEOPOLİMER KOMPOZİTLERİN DURABİLİTE ÇALIŞMALARI 5
2.4. ÇEŞİTLİ KOMPOZİTLERDE BAKTERİ KULLANIMI İLE İLGİLİ ÇALIŞMALAR 7
3. MALZEME VE YÖNTEM **9**
3.1. GEOPOLİMER ÜREİTMİNDE KULLANILAN MALZEMELER 9
3.1.1. Metakaolin 9
3.1.2. Kolemanit 10
3.1.3. Alüminyum Çamuru 11
3.1.4. Kimyasal Aktivatörler 12
3.1.5. Agrega 13
3.1.6. Kalsiyum Laktat Pentahidrat 15
3.2. BAKTERİ ÜRETİMİ 16
3.2.1. Kültür Ortamı Hazırlanması ve Bakteri Suşu 16
3.2.2. İnokulumun Hazırlanması ve Bakterinin Çoğaltılması 18

3.3. EMDİRME PROSEDÜRÜ VE ÖN DENEME NUMUNELERİNİN ÜRETİMİ 21
3.4. ÖN DENEME NUMUNELERİNDE ÇATLAK OLUŞTURMASI VE İYİLEŞTİRME YÖNTEMLERİNİN ARAŞTIRILMASI 25
3.5. DENEYSEL ÇALIŞMA 27
3.5.1. Geopolimer Beton Numunelerinin Üretimi 27
3.5.2. Yüksek Sıcaklık Testi 31
3.5.3. Basınç Dayanımı Testi 31
3.5.4. Eğilme Dayanımı Testi 32
3.5.5. Ağırlık Ölçümleri 33
3.5.6. Yarma Çekme Dayanımı Testi ve Çatlaklar oluşturma İşlemleri 34
3.5.7. Ultrasonik Ses Geçirgenliği 35
3.5.8. Kılcal Su Emme Testi 37
3.5.9. Mikroyapısal Analizleri 38
3.5.10. Numunelerin Çatlaması ve Bakteriyel İyileştirilmesinin Metodolojisi 39
4. ARAŞTIRMA BULGULARI 41
4.1. ÖN DENEYİN BULGULARI 41
4.1.1. Mekanik Özellikler 42
4.1.2. Ultrasonik Ses Geçirgenliği 44
4.1.3. Görsel İnceleme 45
4.2. YÜKSEK SICAKLIK DENEYİN BULGULARI 62
4.2.1. Yarmada Çekme Deneyin Sonuçları 62
4.2.2. Ultrasonik Ses Geçirgenliği 64
4.2.3. Ağırlık Kaybı Sonuçları 67
4.2.4. Kılcal Su Emme Testi Sonuçları 68
4.2.5. Görsel İnceleme 72
4.2.6. Mikroyapısal Analizlerin Sonuçları 75
5. TARTIŞMA VE SONUÇ 85
KAYNAKLAR 87
ETİK KURUL İZİN YAZISI 94
KURUM İZNİ YAZILARI 95
ÖZGEÇMİŞ 96

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 3.1: Karışımlarda kullanılan metakaolin. 10

Şekil 3.2: Karışımlarda kullanılan kolemanit. 11

Şekil 3.3: Karışımlarda kullanılan kırmızı çamur. 12

Şekil 3.4: Karışımlarda kullanılan sodyum silikat..... 13

Şekil 3.5: Karışımlarda kullanılan sodyum hidroksitin a) peletleri b) 12 molarite çözeltisi.... 13

Şekil 3.6: Karışımlarda kullanılan ince agrega..... 14

Şekil 3.7: Karışımlarda kullanılan kaba agrega..... 14

Şekil 3.8: Elek Analiz cihazı 15

Şekil 3.9: Karışımlarda kullanılan kalsiyum laktat pentahidrat 16

Şekil 3.10: Besiyerinin hazırlama işlemi..... 17

Şekil 3.11: Katı ortamda üreyen S. pasteurii..... 17

Şekil 3.12: Steril işlemlerinde kullanılan otoklav 18

Şekil 3.13: Çalışmada kullanılan a) çalkalamalı etüv ve b) pipet. 19

Şekil 3.14: Santrifüj tüpleri bakterili solüsyonu doldurma işlemi..... 20

Şekil 3.15: Santrifüj işlemi (a) santrifüj cihazı, (b) santrifüj edilmiş bakterili solüsyonu 20

Şekil 3.16: Bakterinin hassas bir terazi ile tartılması 21

Şekil 3.17: Emdirme prosedüründe kullanılan filtreleme düzeneği 22

Şekil 3.18: Ön deneme numunelerin karıştırma işlemi 23

Şekil 3.19: Ön deneme numunelerin vibrasyon işlemi..... 24

Şekil 3.20: Ön deneme küp ve prizma numuneleri 24

Şekil 3.21: Steril şırınga ile bakterili solüsyonun a) çekilmesi b) numunenin çatlağına enjekte edilmesi..... 25

Şekil 3.22: Steril bir sprey şişesi ile bakterili solüsyonun numunenin yüzeyine spreylemesi .26

Şekil 3.23: Çatlaklı numunelerin steril kap içinde batırma yöntemiyle iyileştirilmesi 26

Şekil 3.24: Geopolimer betonun karıştırma prosedürü (a) kalıpların vibrasyon masasına sabitlenmesi, (b) miksere metakaolin eklenmesi (c) mikserde malzemelerin karıştırılması. ...28

Şekil 3.25: Geopolimer betonun 100x100x100 mm'lik küp numuneler.....29

Şekil 3.26: Geopolimer betonun Ø100x200 mm'lik silindir numuneler. 29

Şekil 3.27: Silindir beton numunelerin kesme işlemi (a) taş kesme makinesi (b) kesilmemiş silindir numuneler (c) kesilmiş Ø100x50 mm'lik numuneler. 30

Şekil 3.28: Silindir beton numunelerin üzerinde yapılan yüksek sıcaklık testi.....31

Şekil 3.29: Basınç dayanımı testine tabi tutulan (a) 50x50x50 mm küp harç numuneler, (b) 100x100x100 mm küp geopolimer beton numuneler.....32

Şekil 3.30: Eğilme dayanımı testine tabi tutulan 40x40x160mm'lik prizmatik harç numuneler. 33

Şekil 3.31: Ağırlık ölçümlerini gerçekleştirmek üzere yapılan (a) numunelerin kurutma işlemi, (b) terazi ile tartma işlemi.....34

Şekil 3.32: Yarmada çekme dayanımı testine tabi tutulan (a) 400°C etkisine maruz kalan numune, (b) %70 yükleme ile çatlak oluşumu. 35

Şekil 3.33: UPV testine tabi tutulan (a) Ön deneme harç prizma, (b) ve (c) beton silindir numunelerin tam temaslı ve kısmen temaslı uygulamaları. 36

Şekil 3.34: Kılcal su emme testine tabi tutulan geopolimer beton silinir numuneler.....38

Şekil 3.35: SEM/EDS analizinin işlemleri: (a) numunelerin sırayla yapıştırarak yerleştirilmesi, (b) numuneler kaplama cihazına yerleştirilmesi, (c) kaplama cihazından kaplanmış numunelerin çıkarılması, (d) kaplanmış numunelerin SEM/EDS cihazındaki yerine yerleştirilmesi. 39

Şekil 4.1: Geopolimer harç numunelerin ilk eğilme ve basınç dayanımları 42

Şekil 4.2: İyileştirme işleminden sonra numunelerin eğilme dayanımları 43

Şekil 4.3: Numunelerin UPV sonuçları 44

Şekil 4.4: a) Sprey yöntemi ile iyileştirilecek olan Z grubun 1. numunesinin 200 µm'lik çatlak görüntüsü, b) 2 ay sonunda iyileştirilmiş çatlağın görüntüsü, c) Çatlağın 2 ay önceki mikroskop altındaki görüntüsü, d) 2 ay sonunda iyileştirilmiş çatlağın mikroskop altındaki görüntüsü 46

Şekil 4.5: a) Batırma yöntemi ile iyileştirilecek olan Z grubun 2. numunesinin 100 µm'lik çatlak görüntüsü, b) 2 ay sonunda iyileştirilmiş çatlağın görüntüsü, c) Çatlağın 2 ay önceki

mikroskop altındaki görüntüsü, d) 2 ay sonunda iyileştirilmiş çatlağın mikroskop altındaki görüntüsü 46

Şekil 4.6: a) Enjeksiyon yöntemi ile iyileştirilecek olan Z grubun 3. numunesinin 100 µm'lik çatlak görüntüsü, b) 1 ay sonunda iyileştirilmiş çatlağın görüntüsü, c) Çatlağın 1 ay önceki mikroskop altındaki görüntüsü, d) 1 ay sonunda iyileştirilmiş çatlağın mikroskop altındaki görüntüsü 47

Şekil 4.7: a) Sprey yöntemi ile iyileştirilecek M grubun 1. numunesinin 200 µm'lik çatlak görüntüsü, b) 2 ay sonunda iyileştirilmiş çatlağın görüntüsü, c) Çatlağın 2 ay önceki mikroskop altındaki görüntüsü, d) 2 ay sonunda iyileştirilmiş çatlağın mikroskop altındaki görüntüsü 48

Şekil 4.8: a) Batırma yöntemi ile iyileştirilecek olan M grubun 2. numunesinin 300 µm'lik çatlak görüntüsü, b) 2 ay sonunda iyileştirilmiş çatlağın görüntüsü, c) Çatlağın 2 ay önceki mikroskop altındaki görüntüsü, d) 2 ay sonunda iyileştirilmiş çatlağın mikroskop altındaki görüntüsü 49

Şekil 4.9: a) Batırma yöntemi ile iyileştirilecek olan M grubun 3. numunesinin 120 µm'lik çatlak görüntüsü, b) 2 ay sonunda iyileştirilmiş çatlağın görüntüsü, c) Çatlağın 2 ay önceki mikroskop altındaki görüntüsü, d) 2 ay sonunda iyileştirilmiş çatlağın mikroskop altındaki görüntüsü 50

Şekil 4.10: a) Batırma yöntemi ile iyileştirilecek olan M grubun 4. numunesinin 100 µm'lik çatlak görüntüsü, b) 2 ay sonunda iyileştirilmiş çatlağın görüntüsü, c) Çatlağın 2 ay önceki mikroskop altındaki görüntüsü, d) 2 ay sonunda iyileştirilmiş çatlağın mikroskop altındaki görüntüsü 51

Şekil 4.11: a) Enjeksiyon yöntemi ile iyileştirilecek olan M grubun 5. numunesinin 100 µm'lik çatlak görüntüsü, b) 1 ay sonunda iyileştirilmiş çatlağın görüntüsü, c) Çatlağın 1 ay önceki mikroskop altındaki görüntüsü, d) 1 ay sonunda iyileştirilmiş çatlağın mikroskop altındaki görüntüsü 52

Şekil 4.12: a) Enjeksiyon yöntemi ile iyileştirilecek olan M grubun 6. numunesinin 100 µm'lik çatlak görüntüsü, b) 1 ay sonunda iyileştirilmiş çatlağın görüntüsü, c) Çatlağın 1 ay önceki mikroskop altındaki görüntüsü, d) 1 ay sonunda iyileştirilmiş çatlağın mikroskop altındaki görüntüsü 53

Şekil 4.13: a) Enjeksiyon yöntemi ile iyileştirilecek olan M grubun 7. numunesinin 100 µm'lik çatlak görüntüsü, b) 1 ay sonunda iyileştirilmiş çatlağın görüntüsü, c) Çatlağın 1 ay önceki mikroskop altındaki görüntüsü, d) 1 ay sonunda iyileştirilmiş çatlağın mikroskop altındaki görüntüsü 54

Şekil 4.14: a) Enjeksiyon yöntemi ile iyileştirilecek M grubun 8. numunesinin 200 µm'lik çatlak görüntüsü, b) 1 ay sonunda iyileştirilmiş çatlağın görüntüsü, c) Çatlağın 1 ay önceki mikroskop altındaki görüntüsü, d) 1 sonunda içinde iyileştirilmiş çatlağın mikroskop altındaki görüntüsü 55

Şekil 4.15: a) Enjeksiyon yöntemi ile iyileştirilecek M grubun 9. numunesinin 150 µm'lik çatlak görüntüsü, b) 1 ay sonunda iyileştirilmiş çatlağın görüntüsü, c) Çatlağın 1 ay önceki

mikroskop altındaki görüntüsü, d) 1 ay sonunda iyileştirilmiş çatlağın mikroskop altındaki görüntüsü 56

Şekil 4.16: a) Enjeksiyon yöntemi ile iyileştirilecek olan H grubun 1. numunesinin 100 µm'lik çatlak görüntüsü, b) 1 ay sonunda iyileştirilmiş çatlağın görüntüsü, c) Çatlağın 1 ay önceki mikroskop altındaki görüntüsü, d) 1 ay sonunda iyileştirilmiş çatlağın mikroskop altındaki görüntüsü 57

Şekil 4.17: a) Enjeksiyon yöntemi ile iyileştirilecek olan H grubun 2. numunesinin 200 µm'lik çatlak görüntüsü, b) 1 ay sonunda iyileştirilmiş çatlağın görüntüsü, c) Çatlağın 1 ay önceki mikroskop altındaki görüntüsü, d) 1 ay sonunda iyileştirilmiş çatlağın mikroskop altındaki görüntüsü 58

Şekil 4.18: a) Sprey yöntemi ile iyileştirilecek olan H grubun 3. numunesinin 120 µm'lik çatlak görüntüsü, b) 2 ay sonunda iyileştirilmiş çatlağın görüntüsü, c) Çatlağın 2 ay önceki mikroskop altındaki görüntüsü, d) 2 ay sonunda iyileştirilmiş çatlağın mikroskop altındaki görüntüsü 59

Şekil 4.19: a) Batırma yöntemi ile iyileştirilecek olan H grubun 4. numunesinin 200 µm'lik çatlak görüntüsü, b) 2 ay sonunda iyileştirilmiş çatlağın görüntüsü, c) Çatlağın 2 ay önceki mikroskop altındaki görüntüsü, d) 2 ay sonunda iyileştirilmiş çatlağın mikroskop altındaki görüntüsü 60

Şekil 4.20: a) Kontrol (C) numunenin 250 µm'lik çatlak görüntüsü, b) 2 ay sonunda iyileştirilmiş çatlağın görüntüsü, c) Çatlağın 2 ay önceki mikroskop altındaki görüntüsü, d) 2 ay sonunda iyileştirilmiş çatlağın mikroskop altındaki görüntüsü 61

Şekil 4.21: İyileştirilmiş ve iyileştirilmemiş numunelerin yarmada çekme dayanımları. 63

Şekil 4.22: İyileştirilmiş geopolimer beton numunelerinin yarmada çekme dayanımının geri kazanım yüzdeleri. 64

Şekil 4.23: Yüksek sıcaklık etkilerine maruz kalan numunelerin UPV değerleri. 65

Şekil 4.24: Geopolimer beton numunelerinin iyileşme ve hasar dereceleri. 66

Şekil 4.25: Yüksek sıcaklık etkisine maruz kalan numunelerinin ağırlık kayıpları. 67

Şekil 4.26: 28 günlük geopolimer beton numunelerin kılcal su emme eğrileri. 68

Şekil 4.27: Yüksek sıcaklıklara maruz kalan M (YS+Y) ve M (İYS+Y) numunelerinin kılcal su emme eğrileri. 69

Şekil 4.28: Yüksek sıcaklıklara maruz kalan KM (YS+Y) ve KM (İYS+Y) numunelerinin kılcal su emme eğrileri. 69

Şekil 4.29: Yüksek sıcaklıklara maruz kalan KÇM (YS+Y) ve KÇM (İYS+Y) numunelerinin kılcal su emme eğrileri. 70

Şekil 4.30: İyileştirilmemiş ve iyileştirilmiş M, KM ve KÇM geopolimer numunelerin Kc değerleri. 71

Şekil 4.31: İyileştirme işleminden önceki ve sonraki geopolimer beton numunelerinin 40X büyütülmüş görüntüleri 74

Şekil 4.32: 200°C maruz kalan a) iyileştirilmemiş M numuneleri b) iyileştirilmiş M numuneleri c) iyileştirilmemiş KM numuneleri d) iyileştirilmiş KM numuneleri e) iyileştirilmemiş KÇM numuneleri f) iyileştirilmiş KÇM numunelerinin SEM mikrografları. 76

Şekil 4.33: 800°C maruz kalan a) iyileştirilmemiş M numuneleri b) iyileştirilmiş M numuneleri c) iyileştirilmemiş KM numuneleri d) iyileştirilmiş KM numuneleri e) iyileştirilmemiş KÇM numuneleri f) iyileştirilmiş KÇM numunelerinin SEM mikrografları. 77

Şekil 4.34: 200°C'ye maruz kalan KM numunelerinin içindeki lifi gösteren (a) 1000x, (b) 5000x ve 1000x büyütmeli SEM mikrografları. 77

Şekil 4.35: 200°C'ye maruz kalan a) iyileştirilmemiş M numuneleri b) iyileştirilmiş M numuneleri c) iyileştirilmemiş KM numuneleri d) iyileştirilmiş KM numuneleri e) iyileştirilmemiş KÇM numuneleri f) iyileştirilmiş KÇM numunelerinin EDS'leri. 79

Şekil 4.36: 800°C'ye maruz kalan a) iyileştirilmemiş M numuneleri b) iyileştirilmiş M numuneleri c) iyileştirilmemiş KM numuneleri d) iyileştirilmiş KM numuneleri e) iyileştirilmemiş KÇM numuneleri f) iyileştirilmiş KÇM numunelerinin EDS'leri. 80

Şekil 4.37: İyileştirme işleminden sonra 200°C ve 800°C M, KM ve KÇM numunelerinin XRD grafikleri. 81

Şekil 4.38: İyileştirme işleminden önce ve sonra 200°C ve 800°C'ye maruz kalan M numunelerinin XRD grafikleri. 81

Şekil 4.39: 200°C ve 800°C'ye maruz kalan M, KM ve KÇM numunelerin iyileştirme sürecinden sonraki FTIR analizleri. 83

Şekil 4.40: 200°C ve 800°C'ye maruz kalan M numunelerinin iyileştirme işleminden önceki ve sonraki FTIR analizleri. 83

Şekil 4.41: 200 °C maruz kalmış KÇM numunenin microCT görüntüsü 84

TABLO LİSTESİ

Sayfa No

Tablo 3.1: Metakaolinin (Mk) kimyasal özellikleri (%).....9

Tablo 3.2: Kolemanitin (K) kimyasal özellikleri.....10

Tablo 3.3: Kırmızı çamurun (KÇ) kimyasal özellikleri. 11

Tablo 3.4: Sodyum silikatın (SS) kimyasal özellikleri.....12

Tablo 3.5: Sodyum hidroksidin (SH) kimyasal özellikleri.....12

Tablo 3.6: İnce ve kaba agreganın granülometrisi. 14

Tablo 3.7: Kalsiyum Laktat Pentahidratın kimyasal bileşimi (%) 15

Tablo 3.8: Mk kütlesine göre karışımların oranları.....23

Tablo 3.9: Karışım miktarları (kg/m^3).....27

Tablo 3.10: Yüksek sıcaklık etkisine maruz kalan çatlaklı ve iyileştirilmiş numunelerin kodlanması.....40

Tablo 4.1: Numunelerin iyileşme prosedürü. 41

SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ

Simgeler	Açıklama
$CaCO_3$	: Kalsiyum karbonat
SiO_2	: Silikat
Fe_2O_3	: Demir oksit
Al_2O_3	: Alüminyum oksit
TiO_2	: Titanyum dioksit
MgO	: Magnezyum oksit
CaO	: Kalsiyum oksit
K_2O	: Potasyum oksit
Na_2O	: Sodyum oksit
Pb	: Ağır Metaller
µm	: Mikrometre
PBS	: Fosfat Tamponlu Salin
W_k	: Ağırlık kaybı
W_i	: İlk ağırlık
W_d	: Durbilite sonrası ağırlıklar
G	: Geri kazanım yüzdesi
G_i	: İlk dayanım değerleri
Gh	: İyileşmeden sonra dayanmlar
HD	: Hasar derecesi
Vç	: Çatlamadan sonra UPV değeri
Vi	: Çatlamadan önce ilk UPV değeri
V_h	: İyileşmeden sonra UPV değeri
İD	: İyileşme derecesi
Q	: Emilen su kütlesi
Kc	: Kılcal su emme katsayısı
t	: Zaman

Kısaltmalar	Açıklama
UPV	: Ultrasonik ses geçirgenliği
SEM	: Taramalı elektron mikroskobu
EDS	: Enerji dağılımlı spektrometri
XRD	: X-Işınları Difraktometresi
FTIR	: Fourier dönüşümlü kızılötesi
Mk	: Metakaolin
KÇ	: Kırmızı çamur
K	: Kolemanit
SS	: Sodyum silikat
SH	: Sodyum hidroksit
M	: Metakaolin esaslı geopolimer
KM	: Kolemanit katkılı metakaolin esaslı geopolimer
KÇM	: Kırmızı çamur katkılı metakaolin esaslı geopolimer
DMSZ	: Deutsche Sammlung von Mikroorganisem und Zellkulturen
YS	: Yüksek sıcaklık çatlakları içeren numuneler
YS+Y	: Yüksek sıcaklık çatlakları ve yarmada çekme çatlakları içeren numuneler
İYS	: Yüksek sıcaklık çatlaklarına sahip iyileştirilmiş numuneler
İYS+Y	: İyileştirilmiş yüksek sıcaklık çatlakları ve yarmada çekme çatlakları
H	: Bakteri içermeyen numuneler
M	: Bakteri içeren numuneler
Z	: Hem bakteri hem besiyeri içeren numuneler
C	: Kontrol numuneler
GP	: Geopolimer
İÖ	: İyileştirme işleminden önce
İS	: İyileştirme işleminden sonra

ÖZET

DOKTORA TEZİ

Yüksek Sıcaklık Etkisine Maruz Kalmış Metakaolin Esaslı Geopolimerin Bakterilerle Otonom ve Otojen İyileştirilmesi

Mahmoud ZIADA

İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

İnşaat Mühendisliği Programı

Danışman : Prof. Dr. Savaş ERDEM

II. Danışman : Prof. Dr. Harun TANYILDIZI

Çimentonun üretimi esansında atmosfere büyük miktarda karbondioksit salınımı olur. Ayrıca, çimentolu kompozitlerin yüksek maliyetler ve yüksek kaynak tüketimi gibi çeşitli dezavantajları vardır. Dolayısıyla, son yıllarda çimento kullanmadan farlı bağlayıcı ve aktivatörler kullanarak çeşitli geopolimer beton ve harçlar üzerinde çalışmalar yapılmıştır. Ayrıca, önceki çalışmalarda geopolimerlerin sülfat direnci, donma-çözülme direnci ve yüksek erken dayanım gibi sayısız avantajları nedeniyle çimentolu kompozitlerin yerine kullanılabileceğini bulunmuştur. Genel olarak, kompozitlerde farklı nedenlerden dolayı çatlaklar oluşabilmektedir. Son yıllarda, çimentolu kompozitlerde oluşan çatlakları iyileştirmek üzere bakteriyel iyileştirmesi üzerinde çalışılmış ve önemli ölçüde sonuçlar elde edilmiştir. Dolayısıyla, son birkaç yılda ekolojik olan geopolimerlerde oluşabilecek çatlakların iyileştirmesi ile ilgili çalışmalar yapılması gerektiğini fark edilmiştir.

Bu tez kapsamında, metakaolin esaslı kolemanit ve kırmızı çamur ikameli geopolimer beton hazırlanmıştır. Hazırlanan geopolimer numunelerde çatlak oluşturmak için numuneler yüksek sıcaklık etkisine maruz bırakılmıştır. Bu tez kapsamında, geopolimer beton numunelerinde

oluşan çatlakların Sporosarcina pasteurii bakterisi kullanılarak iyileştirilmesi amaçlanmıştır. Yüksek sıcaklık etkisine maruz kalan numunelerinin iyileştirme işleminden önce ve sonra fiziksel, mekanik ve mikro yapısal analizleri yapılmıştır. Ayrıca, iyileşmiş ve iyileşmemiş numunelerin çatlakları 40x büyütmeli mikroskop ile incelenmiştir. Bu çalışmanın sonuçlarına dayanarak, geopolimer beton numunelerin çatlaklarını $CaCO_3$ çökeltileri ile doldurarak S. pasteurii'nin iyileşme performansı başarılı olmuştur. Ayrıca, $CaCO_3$ çökeltileri, iyileşmiş numunelerin fiziksel ve mekanik özelliklerini iyileştirmiştir.

Ekim 2022 , 118 sayfa.

Anahtar kelimeler: Yüksek sıcaklık, Geopolimer beton, Metakaolin, İyileştirme, Sporosarcina pasteurii

SUMMARY

Ph.D. THESIS

Autonomous and Autogenous Healing By Bacteria of Metakaolin Based Geopolymer Exposed to High Temperature Effects

Mahmoud ZIADA

İstanbul University-Cerrahpaşa

Institute of Graduate Studies

Department of Civil Engineering

Programme of Civil Engineering

Supervisor : Prof. Dr. Savaş ERDEM

Co-Supervisor: Prof. Dr. Harun TANYILDIZI

During cement production, a large amount of carbon dioxide is released into the atmosphere. In addition, cementitious composites have several disadvantages, such as high costs and high resource consumption. Therefore, studies have recently been carried out on various geopolymer concrete and mortars using different binders and activators without cement. In addition, the previous studies found that the geopolymers can be used instead of cementitious composites due to their numerous advantages, such as sulfate resistance, freeze-thaw resistance, and high early strength. In general, cracks can occur in composites due to different reasons. In recent years, bacterial healing has been examined to heal cracks in cementitious composites, and significant results have been obtained. Therefore, in the last few years, it has been realized that studies on the healing of cracks that may occur in ecological geopolymers should be carried out.

In this thesis, metakaolin-based colemanite and red mud substituted geopolymer concrete was prepared. The geopolymer samples were exposed to high temperatures effects to form cracks

in the samples. This thesis is aimed to heal cracks formed in geopolymer concrete samples by using Sporosarcina pasteurii bacteria. Thus, before and after the healing process, physical, mechanical, and microstructural analyses of the samples exposed to the durability effects were performed. Also, cracks of healed and non-healed samples were examined with a 40x magnification microscope. According to the results of this study, the healing performance of S. pasteurii was successfully evaluated by filling the cracks of geopolymer concrete samples with $CaCO_3$ precipitates. In addition, $CaCO_3$ precipitates improved the physical and mechanical properties of the healed samples.

October 2022, 118 pages.

Keywords: High-temperature, Geopolymer concrete, Metakaolin, Healing, Sporosarcina pasteurii

1. GİRİŞ

Dünyada kentleşme ve nüfus artışı nedeniyle atmosfere salınan sera gazı emisyonları son yıllarda ciddi derecede artmıştır. Tüm dünya bu durumdan olumsuz etkilendiği için çevre dostu beton üretimi ve beton dayanıklılığı ile ilgili yapılan çalışmalar artmıştır. Bu kapsamda 1 ton Portland çimentosu üretimi 1 ton CO_2 salınımına neden olmaktadır. Bununla birlikte, endüstriyel yan ürünler olan uçucu kül ve cüruf çevreye çimentodan yaklaşık yüzde 80-90 daha az sera gazı salmaktadır (Van Deventer ve diğ., 2012). Geopolimer, son yıllarda malzeme üretiminde çimento esaslı bağlayıcıların yerine kullanılabilen sentetik bir alüminosilikat malzemedir (Davidovits, 1994). Metakaolin ve düşük kalsiyumlu uçucu kül esaslı geopolimerler düşük kalsiyum konsantrasyonuna sahip olması nedeniyle sülfat ortamlarında direnç gösterirler (Chen ve diğ., 2020). Ayrıca bu tez çalışmasında kullanılan kırmızı çamur, alüminyum üretimi sırasında oluşan atıktır ve üretim arttıkça depolanması çevresel zorluklar yaratmaktadır. Üretilen her bir ton alümina veya 0.5 ton alüminyum metali için yaklaşık 1 ton kırmızı çamur atığı oluşmaktadır (Senff ve diğ., 2011). Ayrıca, geopolimerde kolemanit atığı kullanılması çevreye atılacak atıkların azalmasına neden olmaktadır. Bu tez kapsamında metakaolin esaslı kırmızı çamur ve kolemanit katkılı geopolimer üretilmiştir. Böylece, çimento yerine endüstriyel atıkları kullanarak ekolojik ve sürdürülebilir bir geopolimer üretilmesiyle bu tez çalışmasının ilk amacına ulaşılmıştır.

Tezin bir diğer amacı ise, üretilen geopolimerin mekanik özelliklerinin araştırılmasının yanı sıra geopolimer dayanıklılığı araştırmasıdır. Yüksek sıcaklık etkisine maruz kalan betonun yüksek sıcaklık etkisine maruz kalma süresine ve sıcaklığa bağlı olarak dayanım kaybı ve çatlama nedeniyle beton yapılarında ciddi hasarlar oluşabilir (Kodur, 2014, Zhao ve diğ., 2017). Beton yapıların önemli hasarları, özellikle yangını fark etmenin zor olduğu durumlarda, örneğin yeraltı yapılarında, öngörülemeyen can ve mal kayıplarına neden olabilir (Maevski, 2011). Bu nedenle, yüksek sıcaklık direncine sahip gelişmiş malzemeler geliştirerek bu sorunların üstesinden gelmek veya azaltmak için birçok çaba sarf edilmiştir. Bu tez kapsamında geopolimer numuneleri, 200, 400, 600, 800°C sıcaklıklarına maruz bırakarak yüksek sıcaklık deneyi yapılmıştır. Böylece üretilen geopolimer numunelerin yüksek sıcaklık etkisine karşı dayanıklılığını araştırılmıştır. Bu çalışmanın ana amacı ise, geopolimer beton numunelerin

yüksek sıcaklık etkisine maruz kaldıktan sonra oluşan çatlaklarının iyileştirmesidir. Dolaysıyla, bu çalışmada yüksek sıcaklık etkisine maruz bırakılan numunelerin çatlaklarını bakteri ile iyileşmesi incelenmiştir. Bu amaçla, kalsiyum karbonat ($CaCO_3$) çökeltebilme özelliği olan Sporosarcina pasteurii bakterisi kullanılmıştır. Kısacası, bu tez çalışmasında, metakaolin esaslı kolemanit ve kırmızı çamur ikameli geopolimer beton numuneleri yüksek sıcaklıklara maruz bırakılmıştır. Bu etkilerden dolayı oluşan çatlaklar S. pasteurii bakterisi ile iyileştirilmiştir. Daha sonra iyileştirilmemiş ve iyileştirilmiş numuneler üzerinde mikroskop ile görsel incelme, ultrases geçiş hızı (UPV), yarmada çekme mukavemeti ve kılcal su emilimi deneyleri gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, S. pasteurii iyileştirme etkinliğini ve $CaCO_3$ çökelti üretimini incelemek için mikroyapısal analizleri olarak Taramalı elektron mikroskobu (SEM), Enerji dağılımlı spektrometri (EDS), X-Işınları Difraktometresi (XRD), Fourier dönüşümlü kızılötesi (FTIR) ve MikroCT analizleri yapılmıştır.

2. GENEL KISIMLAR

2.1. GEOPOLİMER VE GEOPOLİMERİZASYON

Dünya nüfusu artması, yapıların ihtiyacını arttırmış ve dolayısıyla yapıların artışıyla birlikte kullanılan çimento miktarı artmıştır. Bina sektörü ve diğer sektörlerde çimento kullanımının artışı, çimento üretimi için çok büyük miktarlarda enerji harcanmakta ve buna ek olarak atmosfere salınan CO_2 gazının miktarını arttırarak küresel ısınma sorunu oluşturmaktadır (Duxson ve diğ., 2007, Imbabi ve diğ., 2012, Meyer, 2009). Bu sorunların etkilerini azaltmak amacıyla çimento fabrikaları yeni ve güncel teknolojiler kullanarak daha az enerji ile çimento üretmeye çalışılmaktadır. Bu çalışmalara rağmen çimento fabrikalarındaki tüketilen enerji miktarları ve salınan sera gazı miktarları yüksek mertebede olup atmosfere salınan toplam küresel CO_2 gazının %7'si çimento üretiminden dolayı oluştuğu bilinmektedir (Ziada ve diğ., 2022). Böylece, endüstri sektörü tarafından salınan CO_2 gazının büyük miktarı, çimento fabrikalarının tarafından salınmaktadır (Billong ve diğ., 2013, Dobiszewska ve diğ., Latawiec ve diğ., 2018).

Dolayısıyla, bu sorunu tamamen ortadan kaldırmak amacıyla Davidovits tarafından 1978 senesinde çimentosuz bir beton üretilmiş ve geopolimer olarak adlandırılmıştır. Bu şekilde yapılarda kullanılan çimentolu harç ve betonlar yerine çimentosuz olan harç ve betonları kullanılmaya sunulmuştur. Geopolimer ve doğal haldeki zeolit'in kimyasal bileşimleri birbirine yakın ve kristal olmayan yapılara sahiptirler (Davidovits, 1991, Palomo ve diğ., 1999). Geopolimer malzemesi oluşturabilmek için silis-alümina kaynaklı bağlayıcı ve aktivatör çözeltileri kullanılmaktadır. Silis-alümina kaynaklı malzemeler aktivatörlerin yardımı ile aktive edilip Si-O-Al-O bağları oluşturulmaktadır (Lahoti ve diğ., 2018).

Alüminosilikatlar içeren malzemeler, aktivatör çözeltileri ile karıştırıldığında ve bunların içinde çeşitli sıcaklıklarda çözündüğünde geopolimer malzemesi oluşur, bu da silikoalüminat ve amorftan oluşan 3 boyutlu bir ağ yapısına yol açar (Palomo ve diğ., 1999, Silva ve diğ., 2007, Ziada ve diğ., 2022). Uzmanlar geopolimerizasyonun reaksiyon mekanizması hakkında farklı görüşlere sahip olsalar da, çoğunluk sürecin üç farklı adıma ayrılabileceğine inanıyor (Prud'homme ve diğ., 2011, Silva ve diğ., 2007, Ziada ve diğ., 2021). Birincisi, alüminosilikat

malzemeleri, aktivatör çözeltilerinde çözündüğünde, alümina tetrahedron birimini ve serbest silikayı oluşturmalarıdır. İkincisi, silika hidroksil ve alümina bir geopolimer jel üretmek üzere reaksiyona girdiğinde meydana gelen malzeme transferi, katılaşma/jelleşmedir. Bu aşamada hidroliz işlemi sonucunda su yapıdan dışarı atılır. Üçüncü adım, jel fazı yoğunlaştığında, geopolimer adı verilen 3 boyutlu bir silikoalüminat ağının oluşmasıyla sonuçlanır.

2.2. GEOPOLİMER İLE İLGİLİ GENEL ÇALIŞMALAR

Geopolimer genel olarak önemli bir basınç dayanımına ve düşük ısı iletkenliğine sahip bir kompozittir. Geopolimerler, yüksek sıcaklıklara maruz kaldığında yapısını koruyarak iyi performans gösterebilen kompozitlerdir (Zhang ve diğ., 2014). Ayrıca, gözenekli geopolimerler, adsorban malzemeler olarak kullanılma potansiyeline sahiptir. Geopolimerler sorbent olarak kullanılır ve geopolimer katyon değişim özellikleri sayesinde etkili su arıtma elemanları olarak kullanılabilirler (Cheng ve diğ., 2012). Ayrıca, (Zhang ve diğ., 2015) yaptıkları çalışmada, empedans tüpü tekniğini kullanarak gözenekli geopolimerlerin ses absorpsiyonunu incelenmiş ve ses absorpsiyon katsayısı kullanılarak ses absorpsiyon kapasitesi değerlendirilmiştir. Onların yaptıkları çalışmada, cüruf ve uçucu kül esaslı geopolimerlerinin bileşiminin ve kalınlıklarının, ses emme katsayıları üzerinde bir etkisi olduğunu bulunmuştur. Ayrıca, (Ge ve diğ., 2015) yaptıkları çalışmada, hacimce %62'ye kadar gözenekliliğe sahip metakaolin bazlı geopolimer bir membran olarak kullanarak Ni^{2+} giderimini incelenmiştir. Ek olarak, amonyum iyonunun azaltılması ve belediye atık sularından olası geri kazanım için umut verici bir prospektif kullanım sergilenmiştir.

Bir başka çalışmada (López ve diğ., 2014), temel bileşenleri pirinç kabuğu külü ve metakaolin olan gözenekli geopolimer hazırlanmış ve sezyum iyonlarını ortadan kaldırmak için su buharı ile köpürtülmüştür. (Duan ve diğ., 2016) yaptıkları çalışmada, uçucu kül ve demir cevheri artıklarından yapılmış ve H_2O_2 ile köpürtülmüş gözenekli geopolimerlerden Cu iyonlarının uzaklaştırılmasını araştırmıştır. Bir başka çalışmada (Bellum ve diğ., 2020), farklı uçucu kül ve cüruf konsantrasyonlarının geopolimer kompozitlerin dayanıklılığı üzerindeki etkisini incelenmiştir. Klorür ve asit saldırısına karşı direnci ve gözeneklilik, ve su emme değerleri incelenmiştir. Sonuç olarak, cürufun uçucu kül esaslı geopolimere dahil edilmesinin mekanik özelliklerini iyileştirdiğini bulunmuştur. Ek olarak, geopolimer numunelere cüruf ilavesi, geopolimer numunelerinin daha düzgün bir mikroyapısıyla sonuçlanan C–A–S–H jelinin

gelişmesi nedeniyle gözeneklilik ve su absorpsiyonunda bir azalma ve basınç mukavemetinde bir artış ile sonuçlanmıştır.

(Özcan ve Karakoç, 2019) yaptıkları çalışmada, üretilen cüruf bazlı geopolimerin 90 gün boyunca %5 hidroklorik, hidroflorik, fosforik ve sülfürik asitlere karşı direncini incelenmiştir. Elazığ ferrokrom cürufu kullanılarak üretilen geopolimer numuneleri, yüksek fırın cürufu kullanılarak üretilen numunelere göre tüm asitlere karşı daha fazla direnç gösterdiğini bulunmuştur. Bir başka araştırmada (Sevim, 2011), atık kolemanitten yapılan betonun büzülme özelliklerini incelemiş ve %3 ve %5 kolemanit eklenmesi beton rötresini sırasıyla %37 ve %37 oranlarında azaldığını görülmüştür.

2.3. GEOPOLİMER KOMPOZİTLERİN DURABİLİTE ÇALIŞMALARI

Bu bölümde, geopolimerlerin dayanıklılığı üzerine yapılmış çeşitli çalışmaları ve gözden geçirilmiştir. (Tammam ve diğ., 2021) yaptıkları çalışmada, yüksek sıcaklık etkisi altında kalan uçucu kül esaslı geopolimer harç numunelerin mekanik ve mikroyapısal özelliklerini araştırılmıştır. Onların yaptıkları çalışmada, uçucu kül esaslı geopolimer numuneleri 200, 400, 600 ve 800°C'ye maruz bırakılmış ve sıcaklık 600°C'den 800°C'ye arttığında geopolimer matrisinin mukavemet özelliklerinin önemli ölçüde bozulduğunu bulunmuştur. Dahası, 600°C'den sonra numunelerde çatlaklar oluştuğunu görülmüş ve buna bağlı hem UPV okumaları hem basınç dayanımları önemli ölçüde azalmıştır. (Ziada ve diğ., 2021) yaptıkları çalışmada, bağlayıcısı uçucu kül, dolgu malzemesi bazalt tozu atığı ve matrisinde farklı oranlarda bazalt fiber kullanılmış olan geopolimer harç numuneler üretilmiş ve bu numunelerin üzerinde yüksek sıcaklık etkisini incelenmiştir. Yapılan çalışmanın sonucu olarak, bazalt fiberin içeriği, numunelerin mekanik özelliklerini ve yüksek sıcaklıklara direncini iyileştirildiğini bulunmuştur.

Bir başka yüksek sıcaklık etkisini incelen çalışmada (Zhang ve diğ., 2020b), metakaolin esaslı geopolimer numuneler üretilmiş ve üretilen numuneler 200, 400, 600, 800 ve 1000°C'ye maruz bırakılmıştır. Sonuç olarak, 200°C'den 1000°C'ye kadar sıcaklık artışı, geopolimer numunelerinin mukavemet kayıplarını arttırdığını bulunmuştur. Bir başka çalışmada (Valencia-Saavedra ve diğ., 2020), uçucu kül/çimento ve uçucu kül/cüruf kompozitlerinin sülfürik ve asetik asit çözeltilerine karşı direncini araştırılmış ve elde edilen sonuçları çimento kompozitleriyle karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak, alkali ile aktive olan kompozitlerin 12 ay

sonra basınç dayanımı ve kütle açısından daha az bozulduğunu, çimento kompozitlerinin ise daha fazla bozulduğunu bulunmuştur.

(Law ve diğ., 2015) yaptıkları çalışmada, geopolimer kompozit karışımlarının uzun vadeli dayanıklılığını incelenmiştir. Farklı miktarlarda harmanlanmış çimento, Portland çimentosu ve uçucu kül dahil olmak üzere çeşitli geopolimer numuneler üretilmiş ve oluşan numuneler üzerinde emicilik, klorür difüzyonu, karbonatlaşma ve mekanik deneyleri gerçekleştirilmiştir. Test bulgularına göre, uçucu kül tanelerinin çözünmesi ve geopolimer numuneleri kürleme için kullanılan ısı arttıkça numunelerin mukavemeti artmıştır.

Klorür difüzyonu ise, geopolimer numunelerinde, harmanlanmış çimento ve Portland çimentosu numunelerinde eşdeğer olduğu gözlemlenmiştir. Başka bir araştırma (Olivia ve Nikraz, 2012), numunelerin tuzlu sudaki dayanıklılıklarını artırmak için uçucu kül kullanarak geopolimer karışımlarını optimize etmek için Taguchi yaklaşımını kullanılmıştır. Çalışmanın sonucu olarak, geopolimer numunelerin mekanik özellikleri çimentolu kompozit numunelere göre daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Geopolimer karışımlarında çelik, karbon, sentetik ve doğal lifler gibi farklı lifler kullanılmıştır (Ranjbar ve Zhang, 2020).

Geopolimerin birleşimi, geopolimerin yüksek sıcaklıklara karşı direncini belirleyen önemli faktörlerden biridir (Kong ve diğ., 2007b). Ek olarak, Si/Al oranı ve alkali oranı geopolimerin yüksek sıcaklık direncini belirleyen önemli özelliklerin arasında yer almaktadır (Kong ve Sanjayan, 2008). Gereğinden fazla alkali aktivatörün kullanılması, bağlanma sürecini hızlandırarak erken dayanımları ve yüksek dayanımlı malzemelerin üretilmesini mümkün kılar. Öte yandan, alkali aktivatörlerin büyük bir miktarı erime sürecini hızlanmasına yol açarak geopolimerin yüksek sıcaklık direncini düşürebilir.

Geopolimer beton üzerinde yapılan bir çalışmada (Rickard ve diğ., 2016), yüksek sıcaklıklarda test edilen numunelerin yüksek sıcaklık davranışı ile oda sıcaklığında soğutulduktan sonra test edilen numuneler karşılaştırılmıştır. Onlar, çimento betonundan farklı olarak, 500 °C'ye kadar olan sıcaklıklarda, soğutulduktan sonra test edilen numunelerin, sıcak iken test edilen numunelerden daha yüksek basınç dayanımına sahip olduğunu gözlemlediler. Bunun nedeni, malzeme 200-500 °C'ye ısıtıldıktan sonra meydana gelen ilerleyici jel geopolimerizasyonundan kaynaklandığı düşünülmüştür (Pan ve Sanjayan, 2012, Pan ve diğ., 2009).

2.4. ÇEŞİTLİ KOMPOZİTLERDE BAKTERİ KULLANIMI İLE İLGİLİ ÇALIŞMALAR

Beton gibi geçirgenliği düşük olan kompozitlerin çevresel koşullara karşı dayanıklı oldukları önceki çalışmalarda vurgulanmıştır (Nolan ve diğ., 1995). Beton ve benzeri kompozitlerin donma çözülme, ıslanma-kuruma, sülfat etkisi ve asit saldırısı gibi etkililere maruz kaldığında malzemelerin boşlukları ve çatlakları zamanla artar ve dolayısıyla mekanik özellikleri olumsuz bir şekilde etkilenmektedir. Bu sorunu çözmek amacıyla araştırmacılar tarafından kalsiyum karbonat çökeltebilen bakteriler kullanılmış ve bu bakterililerin sayesinde malzemelerin boşlukları azalmış ve olabilecek mekanik bozulmaları önlenmiştir. Ayrıca betonlarda erken yaşta oluşan çatlakların da benzer şekilde iyileşebileceği birçok araştırmacı tarafından incelenmiştir.

Bakteri bazlı iyileştirmeler çok dar çatlaklar için etki olduğu önceki bir araştırmada (Karthik ve Rao, 2016) bulunmuştur. Bakteri ile iyileşebilen çatlak genişlikleri ile ilgili birçok araştırmacı tarafından incelenmiştir. (Talaiekhozani ve Abd Majid, 2014) yaptıkları çalışmada, bakteri ile iyileşme, 100-200µm arasında genişliği olan çatlakların iyileşmesi ile ilgili olumlu sonuçlara varılmıştır. Bir başka çalışmada (Van Tittelboom ve De Belie, 2013), genişliği 5'ten 300µm'a kadar olan çatlakların iyileştirebileceğini bulunmuştur.

Çimentolu bazlı kompozitlerin bakteriyel iyileştirmesi önceki yıllarda birçok araştırmacı tarafından araştırılmıştır. (Chahal ve diğ., 2012) yaptıkları çalışmada, betonda Sporoscarcina Pasteurii bakterisi yardımıyla beton numunelerin iyileştirmesini yapılmış ve sonuç olarak, bakteriyel iyileşme sayesinde numunelerin iyileştiğini görülmüştür. Bir başka çalışmada (De Muynck ve diğ., 2008), silika dumanı esaslı betonlarda bakteriyel iyileştirmeyi araştırılmış ve iyileşme sonucu olarak betonun dayanım ve dayanıklılık özelliklerinin iyileştiğini görülmüştür.

Ayrıca, (Andalib ve diğ., 2016) yaptıkları çalışmada, çimentolu betonun bakteri yardımıyla iyileştirmesi, çimentolu beton numunelerin basınç dayanımları %20 kadar arttığını görülmüştür. Bakteri ile iyileştirilen numunelerin mekanik özelliklerini birçok parametreden etkilendiği ve bu parametrelerin en önemli parametrelerinden biri olarak bakterilerinin hücre yoğunluğunun olduğunu önceki çalışmalarda bildirilmiştir (Chahal ve diğ., 2012). Ayrıca, araştırmalarda mikrobiyal indüklenmiş karbonat presipitasyonu olarak adı geçen yöntemin birçok araştırmacı tarafından uygulanmıştır (Achal ve diğ., 2009, Bang ve diğ., 2001, Gorospe ve diğ., 2013, Hammes ve diğ., 2003, Mitchell ve Ferris, 2005, Okwadha ve Li, 2010, Tobler

ve diğ., 2011). Bir önceki yapılan çalışmada (Tang ve Tang, 2022) kendi kendini iyileştiren elmas ilaveli geopolimer kompozitleri incelenmiştir. Yaptıkları çalışmanın sonucu olarak, elmas ilavesi, sadece geopolimerin hidrotermal reaksiyonunun erken aşamasında değil, aynı zamanda mükemmel termal iletkenliği nedeniyle 1200 ℃'ye kadar yüksek sıcaklık koşullarında da çatlak oluşumunu önleyebildiğini bulunmuştur.

(Ramakrishnan ve diğ., 2001) yaptıkları çalışmada, küp numunelerde yaklaşık 3-9 mm genişlikli çatlaklar oluşturulmuştur. Bu oluşan çatlaklar; kum karışımı, besin ortamı ve bakteri hücrelerinden oluşan harç ile manuel bir şekilde doldurulmuş ve çatlakları doldurulmuş numunelerin üre ortamında 28 gün bekletilmiştir. Sonuç olarak, kontrol olarak üretilmiş bakterisiz numuneler göre bakterili numunelerin basınç dayanımları %10 ila %27 arasında bir iyileşme kaydedilmiştir. Bakterileri olumsuz bir şekilde etkileyen bazı koşullar bulunmakta ve bu olumsuz koşulları azaltmak veya gidermek için farklı malzemeler (zeolit, hidrojeller, silika, polimerler vb.) kullanarak bakteriler enkapsülasyonu yapılmıştır. Bir başka çalışmalarda (Bachmeier ve diğ., 2002, Bang ve diğ., 2001, De Muynck ve diğ., 2008, Wang ve diğ., 2016, Wang ve diğ., 2012) ise, su geçirmeyen poliüretan kullanarak bakteri hücreleri enkapsülasyonu yapılmıştır.

3. MALZEME VE YÖNTEM

3.1. GEOPOLİMER ÜREİTMİNDE KULLANILAN MALZEMELER

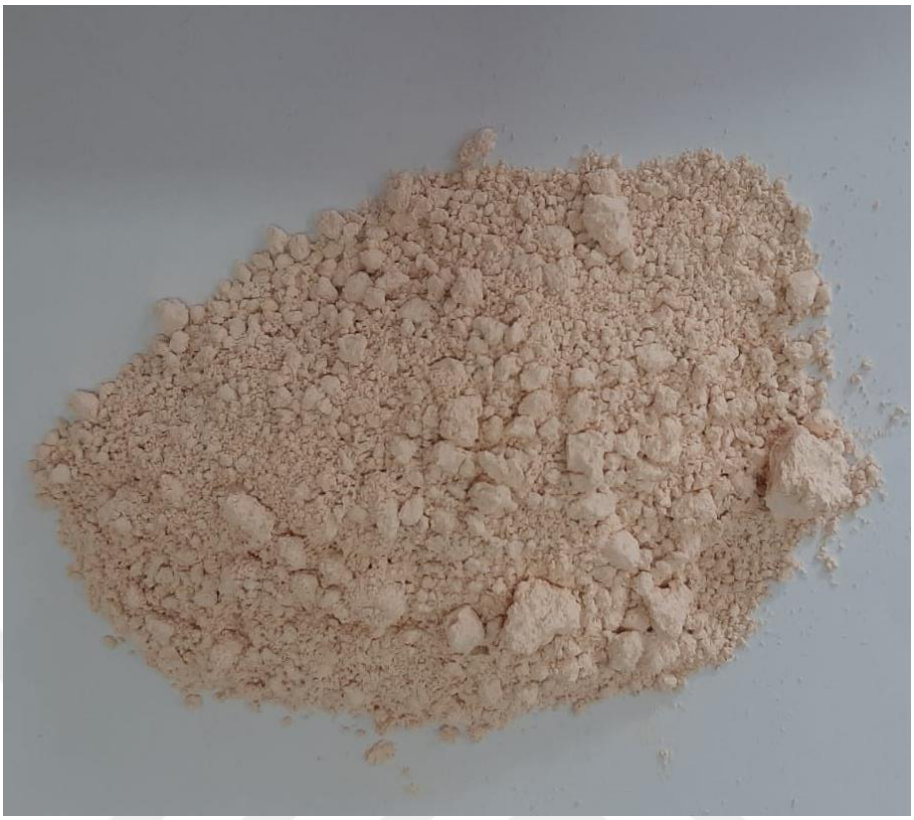
Bu çalışmada kırmızı çamur ve kolemanit ikameli metakaolin esaslı geopolimer numuneler üretilmiştir. Metakaolin (Mk), kırmızı çamur (KÇ) ve kolemanit (K) bağlayıcı olarak farklı oranlarda kullanılmıştır. Ayrıca, aktivatör olarak sodyum hidroksit ve sodyum silikat kullanılmıştır. Ayrıca, geopolimer numunelerin mekanik veya durabilite etkileri ile oluşturulan çatlakların genişliklerini kontrol etmek amacıyla fiberler kullanılmıştır. Bakteri üretimi ve besiyeri hazırlamasında kullanılan malzemeler de bu bölümde verilmiştir.

3.1.1. Metakaolin

Bu tez çalışmasında üretilen geopolimerlerin ana bağlayıcı malzemesi olarak metakaolin kullanılmıştır. Metakaolinin kimyasal özellikleri Tablo 3.1'de verilmiştir. Kullanılan metakaolin, 2.52 g/cm^3 özgül ağırlığına sahip ve metakaolinin kimyasal bileşiminin silis, demir ve alümin oksitlerin toplam oranı %70'ten büyük olduğu için puzolanik ve aktivitesi yüksek olan bir malzemedir (Ibrahim ve diğ., 2017). Çalışmada kullanılan metakaolinin küçük parçacıklara sahip olması, daha fazla yüzey alanına sahip olur ve dolayısıyla çok reaktif bir malzeme sayılmaktadır. Metakaolinin reaktif bir malzeme olması, daha fazla reaksiyonlara maruz kalmaktadırlar. Şekil 3.1'de bu tez çalışmasında esas bağlayıcı olarak kullanılan metakaoline ait bir görüntü verilmiştir.

Tablo 3.1: Metakaolinin (Mk) kimyasal özellikleri (%).

SiO_2	Fe_2O_3	Al_2O_3	TiO_2	MgO	CaO	K_2O	Na_2O	Kızdırma kaybı
56.1	0.85	40.23	0.55	0.16	0.19	0.51	0.24	1.1



Şekil 3.1: Karışımlarda kullanılan metakaolin.

3.1.2. Kolemanit

Bu tez çalışmasında ikameli olarak kolemanit malzemesi kullanılmıştır. Metakaolin, kolemanit ile %4 oranında değiştirilmiştir. Ayrıca, kolemanit 2.42 g/cm^3 özgül ağırlığa sahiptir ve kimyasal özellikleri Tablo 3.2'de gösterilmiştir. Şekil 3.2'de bu çalışmada ikame bağlayıcı olarak kullanılan kolemanite ait bir görüntü verilmiştir.

Tablo 3.2: Kolemanitin (K) kimyasal özellikleri.

SiO_2	Fe_2O_3	Al_2O_3	MgO	CaO	B_2O_3	Na_2O	Kızdırma kaybı
5	0.008	0.4	3	27	40	0.5	25



Şekil 3.2: Karışımlarda kullanılan kolemanit.

3.1.3. Alüminyum Çamuru

Bu araştırmada, birincil bağlayıcı bileşen olarak görev yapan metakaoline ek olarak Alüminyum çamur kullanılmıştır. Literatürde Alüminyum çamuru, kırmızı çamuru olarak da adlandırılmıştır. Bu çalışmada kullanılan kırmızı çamurunun özgül ağırlığı 2.64 g/cm^3'tür. Tablo 3.3, alüminyum çamurunun kimyasal bileşimini içermektedir. Şekil 3.3'te bu çalışmada ikame bağlayıcı olarak kullanılan kırmızı çamura ait bir görüntü verilmiştir.

Tablo 3.3: Kırmızı çamurun (KÇ) kimyasal özellikleri.

SiO_2	Fe_2O_3	Al_2O_3	TiO_2	CaO	Na_2O	Kızdırma kaybı
13.57	27.39	21.8	3.12	13.55	6.47	11.95



Şekil 3.3: Karışımlarda kullanılan kırmızı çamur.

3.1.4. Kimyasal Aktivatörler

Bu tez çalışmasında sodyum silikat (SS) ve sodyum hidroksit (SH) alkali aktivatör çözeltileri olarak kullanılmıştır. Merck Fabrikası'ndan temin edilen SS çözeltisinin 3.292'lik bir SiO_2/Na_2O molar oranına sahiptir. NaOH, pelet olarak Merck Fabrikası'ndan temin edilmiş ve çalışmada kullanılmak üzere saf su içinde çözdürülmüştür. Sodyum silikatın (SS) ve sodyum hidroksitin (SH) kimyasal özellikleri sırasıyla Tablo 3.4 ve Tablo 3.5'te verilmiştir. Ayrıca, Şekil 3.4 ve Şekil 3.5'te bu çalışmada aktivatör olarak kullanılan SS ve SH malzemelerine ait görüntüler verilmiştir.

Tablo 3.4: Sodyum silikatın (SS) kimyasal özellikleri.

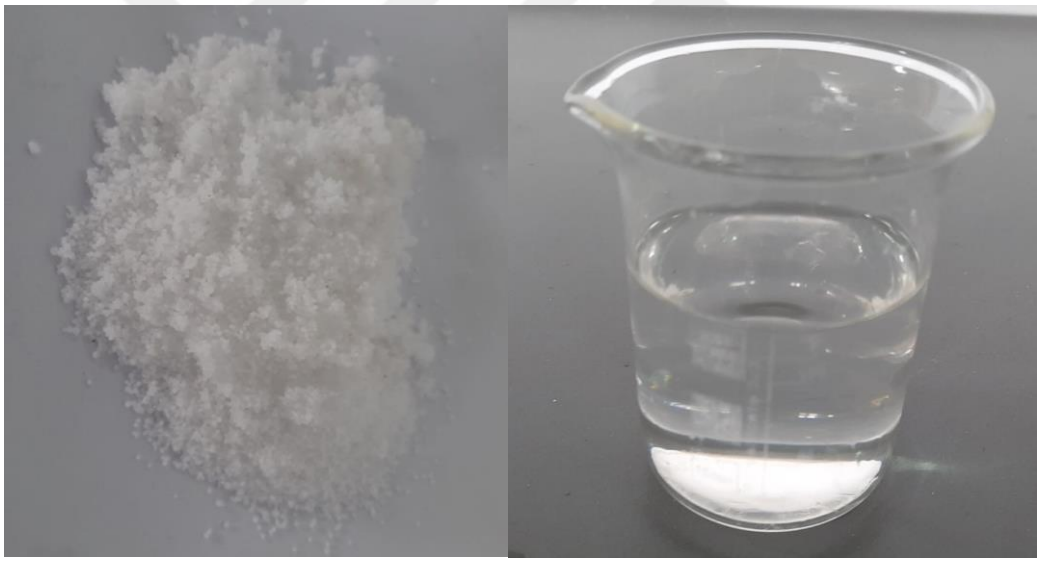
SiO_2 (%)	Na_2O (%)	Fe (%)	Yoğunluk (g/ml) 20 °C	Ağır metaller (%)
27	8.2	≤0.005	1.36	≤0.005

Tablo 3.5: Sodyum hidroksitin (SH) kimyasal özellikleri.

NaOH (%)	Na_2CO_3 (%)	Cl (%)	Al (%)	Fe (%)	SO_4 (%)
99.1	0.3	≤0.01	≤0.002	≤0.002	≤0.01



Şekil 3.4: Karışımlarda kullanılan sodyum silikat



Şekil 3.5: Karışımlarda kullanılan sodyum hidroksitin a) peletleri b) 12 molarite çözeltisi

3.1.5. Agrega

Bu tez çalışmasında karışımlarda dolgu malzemeleri olarak ince ve kaba agregalar kullanılmıştır. İnce ve iri agregaların granülometrisini belirtmek için elek analizlerine tabi tutulmuştur. Deneyin sonucu olarak elekten geçen yüzde miktarları hesaplanmış ve Tablo 3.6'de verilmiştir. Ayrıca, Şekil 3.6, Şekil 3.7 ve Şekil 3.8'de sırayla ince agrega, iri agrega ve elek analiz cihazına ait görüntüler verilmiştir.

Tablo 3.6: İnce ve kaba agreganın granülometrisi.

Çap (mm)		11.2	8	5.6	4	2	1	0.5	0.25	0.125	0.08	0.063
Elekten geçen (%)	İnce Agrega	100	100	100	100	100	82.82	60.84	18.9	2.48	0.32	0.14
	İri Agrega	100	78.35	44.45	6.63	1.57	1.25	1.08	0.76	0.5	0.34	0.06



Şekil 3.6: Karışımlarda kullanılan ince agrega



Şekil 3.7: Karışımlarda kullanılan kaba agrega



Şekil 3.8: Elek Analiz cihazı

3.1.6. Kalsiyum Laktat Pentahidrat

Bu tez çalışmasında karışımlarda kalsiyum kaynağı olarak kalsiyum laktat pentahidrat kullanılmıştır. $C_6H_{10}CaO_6.5H_2O$ formülü olan ekstra saf kalsiyum laktatın 308.29 g/mol kütle ağırlığına sahip olup kimyasal özellikleri Tablo 3.7'de verilmiştir. Ayrıca, Şekil 3.9'da bu çalışmada kalsiyum kaynağı olarak kullanılan kalsiyum laktata ait bir görüntü gösterilmiştir.

Tablo 3.7: Kalsiyum Laktat Pentahidratın kimyasal bileşimi (%)

Safiyet	Fe	SO_4	Cl	Ağır Metaller (Pb)	Kurutma Kaybı
≥98	≤0.005	≤0.05	≤0.05	≤0.001	22-27



Şekil 3.9: Karışımlarda kullanılan kalsiyum laktat pentahidrat

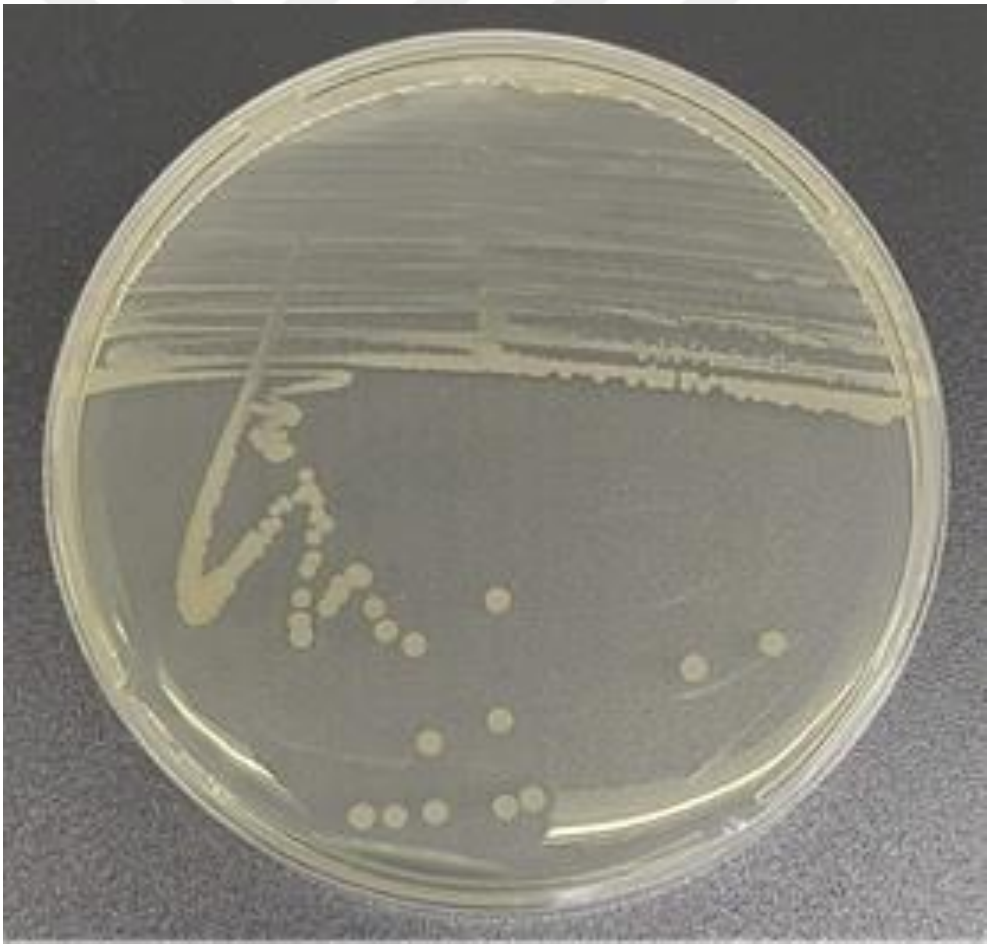
3.2. BAKTERİ ÜRETİMİ

3.2.1. Kültür Ortamı Hazırlanması ve Bakteri Suşu

Bu tez çalışmasında Alman mikroorganizmalar ve hücre kültürleri koleksiyonun (DSMZ) 33 numaralı suşu olan Sporosarcina pasteurii kullanılmıştır. Sporosarcina pasteurii; spor oluşumu, kalsiyum karbonat çökeltme potansiyeli, alkali ortamlara karşı direnci ve patojenik olmaması için seçilmiştir. Bu projede S. pasteurii bakterisi için ATCC medium: 1376 NH4-YE besiyeri kullanılmıştır. Sporosarcina pasteurii; saf su, tris tamponu (0.13 M), Ammonium sulfate (NH4)2SO4 (10 g/L) ve maya özütü (20 g/L) bileşenleri içeren bir ortam üzerinde üretilmiştir. Şekil 3.10'da besiyerinin hazırlama işlemi gösterilmiştir. Ek olarak, stok kültür için katı bir ortam oluşturmak üzere 15 g/L agar ilave edildi ve ortamın pH'ı, 5 N HC1 kullanılarak 9.0'a ayarlanmıştır. Şekil 3.11'de katı ortamda üretilen S. pasteurii plakası gösterilmektedir. Ayrıca, cam şişesinin içindeki kültür ortamını sterilize etmek için 121°C'de 20 dakika boyunca otoklavda bekletilmiştir. Bu çalışmada steril işlemlerinde kullanılan otoklavın görüntüsü Şekil 3.12'de verilmiştir.



Şekil 3.10: Besiyerinin hazırlama işlemi



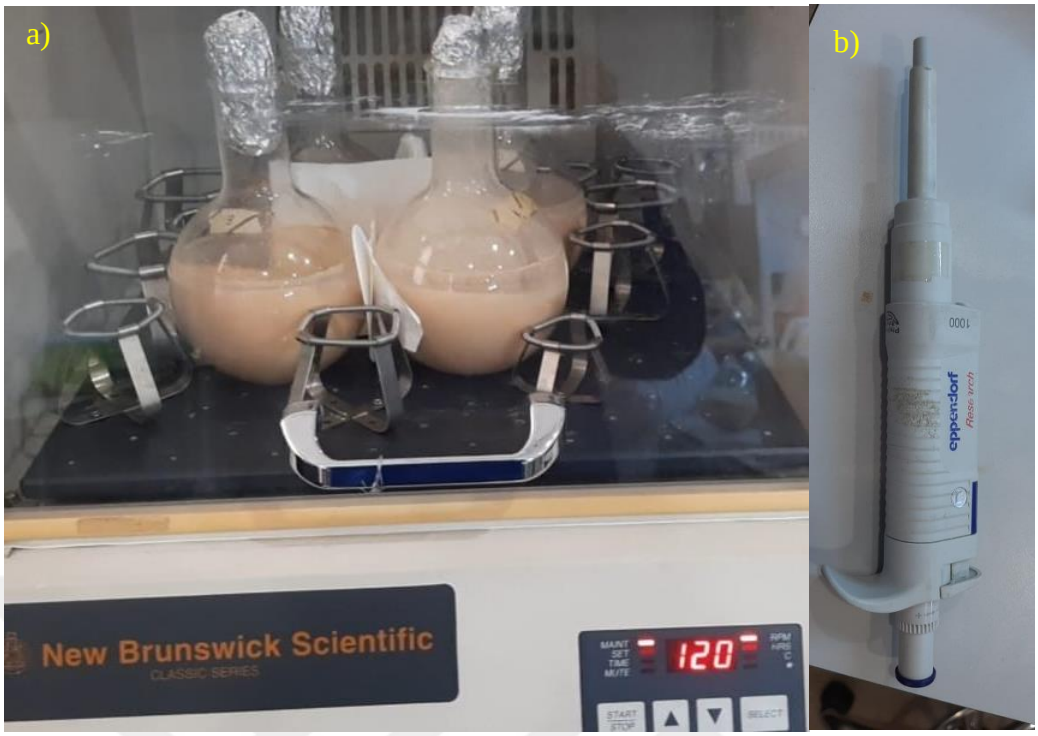
Şekil 3.11: Katı ortamda üreyen S. pasteurii



Şekil 3.12: Steril işlemlerinde kullanılan otoklav

3.2.2. İnokulumun Hazırlanması ve Bakterinin Çoğaltılması

Sporosarcina pasteurii'nin inokulumu, -86°C'de katı ortam üzerinde bir stok kültüründen gerçekleştirilmiştir. 48 saat boyunca 30 °C etüvde inkübe edilmiştir. Bakteriler, sıvı kültür ortamı ile ekim yapılmadan önce aktive edilmiştir. İnkübasyon sonunda kültürden azaltma ekim metoduyla yeniden ATCC 1376 katı besiyerine ekim yapılmıştır. Kültür daha sonra 120 rpm'de ve 30°C'de 24 saat inkübetörde bekletilerek inkübe edildikten sonra oluşan saf koloniden sıvı besiyerine ekim yapılmıştır. Kültür ortamındaki Bakteri süspansiyonları, 3.0 McFarland standardına (9.0108 hücre/ml) ulaşacak şekilde ayarlanmıştır. Ayrıca, bu çalışmada kalsiyum kaynağı olarak kalsiyum laktat (20g/L) kullanılmıştır. Kalsiyum sterilize edildikten sonra hazırlanan çözeltiye kalsiyum laktat ilave edilmiştir. Bu çalışmada, 500 ml'lik besiyeri içeren şişelere sıvı besiyerinde üretilmiş Sporosarcina pasteurii'den 1 ml pipet yardımıyla atışın yanında ekim işlemi yapılmıştır. Bu çalışmada kullanılan çalkalamalı etüv ve pipet Şekil 3.13'te gösterilmiştir. Bakterili solüsyonu çalkalanarak köpüklemeler sayesinde yeterli oksijen sağlanabilmesi için hiçbir zaman 1 litrelik şişede 1 litre solüsyon doldurmamak gerekir. 1 litrelik şişede 300-500 ml arasında solüsyon konulur.

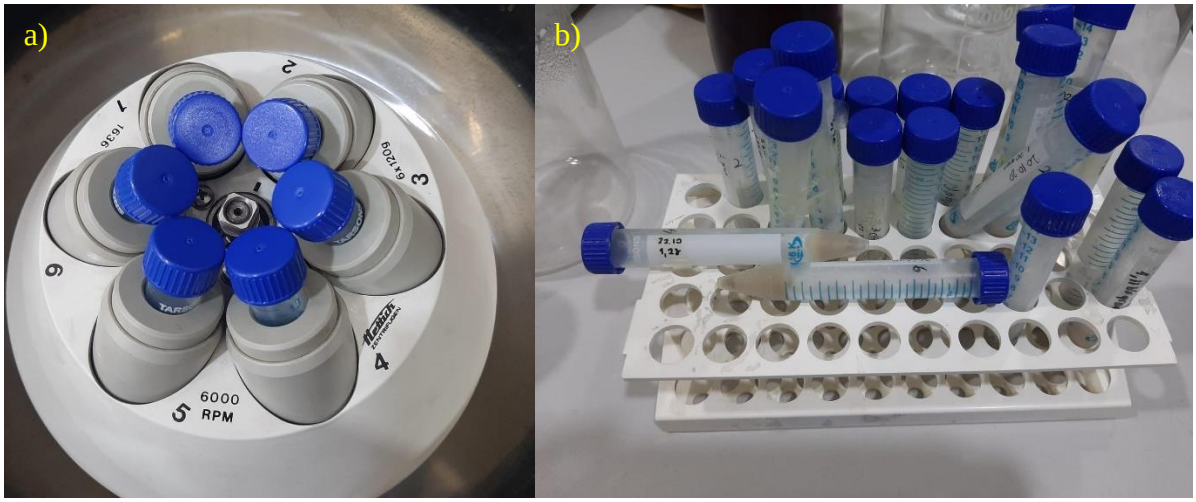


Şekil 3.13: Çalışmada kullanılan a) çalkalamalı etüv ve b) pipet.

Ayrıca, bakteriyi çoğaltmak için santrifüj tüpleri bakterili solüsyonu ile yarısına kadar doldurulur ve kapakları iyice sıktıktan sonra santrifüj cihazına karşılıklı olarak konulur. Bu işlem de ateş yanında yapılmalıdır. Şekil 3.14'te santrifüj tüpleri bakterili solüsyonu doldurma işlemi gösterilmektedir. Santrifüj işlemi bittiğinde tüpler Santrifüj cihazından alınmıştır. Santrifüj tüplerine fosfat tamponlu salin ekleyip santrifüj edilerek yıkanmıştır. Bu yıkama işlemi, bakteriyi kimyasal maddelerden temizlemek için iki kez tekrarlanarak yapılmıştır. Şekil 3.15'te santrifüj cihazı ve santrifüj edilmiş bakterili solüsyonu gösterilmektedir. Yıkama işleminden sonra santrifüj tüplerinin dibinde kalan bakteriler tartılmış ve doldurucuda saklanmıştır. Santrifüj tüpün dibinde kalan bakteriyi tartmak için dolu santrifüj ağırlığından kullanılan santrifüj tüpün boş ağırlığını çıkarılmıştır. Şekil 3.16'da Bakterinin hassas bir terazi ile tartma işlemi gösterilmektedir.



Şekil 3.14: Santrifüj tüpleri bakterili solüsyonu doldurma işlemi



Şekil 3.15: Santrifüj işlemi (a) santrifüj cihazı, (b) santrifüj edilmiş bakterili solüsyonu



Şekil 3.16: Bakterinin hassas bir terazi ile tartılması

3.3. EMDİRME PROSEDÜRÜ VE ÖN DENEME NUMUNELERİNİN ÜRETİMİ

Emdirme işlemi için daha önceden santrifüj tüpünde tartılmış olan bakteri hücrelerine ilk olarak, Fosfat Tamponlu Salin (PBS) eklenmiştir. Daha sonra hazırlanan bakteriyel PBS karışımı, metakaolinin üzerine ilave edilmiştir. Hazırlanan solüsyon 24 saat 30°C'de inkübatöre yerleştirilmiş ve 24 saatten sonra solüsyon inkübatörden çıkarılmıştır. Elde edilen solüsyonun Şekil 3.17'de gösterilen filtreleme cihazı kullanarak filtreleme işlemi yapılmıştır. Böylece bakterili metakaolin macunu (emdirilmiş metakaolin) elde edilmiştir. Filtrelenmiş macunun ıslaklığını azaltmak için 40 dakika boyunca 30 °C'de fırında tutulmuştur. Daha önceki çalışmalarda zeolit ve silika jeli gibi farklı malzemelere emdirme işlemi gerçekleştirilmiştir (Bhaskar ve diğ., 2017, Wang ve diğ., 2012).



Şekil 3.17: Emdirme prosedüründe kullanılan filtreleme düzeneği

Geopolimer numunelerinde kullanılacak bakteri iyileştirme yöntemini belirlemek için metakaolin esaslı prizma harç numuneleri üretilmiş ve bu numunelerin sprey, batırma ve enjeksiyon yöntemleri kullanarak bakteriyel iyileştirmesi yapılmıştır. İlk olarak, 12 M'lik sodyum hidroksit çözeltisi için Tablo 3.8'de verilen miktarları kullanılarak sodyum hidroksit çözeltisi hazırlanmıştır. Ardından, sodyum hidroksit çözeltisi 20±2 °C'de 24 saat soğumaya bırakılmış ve 24 saat sonra sodyum silikat ile karıştırılmıştır. Ardından, Şekil 3.18'de gösterildiği gibi oluşan çözelti karışımı mikserdeki metakaoline ekleyip karıştırılmıştır. Homojen bir karışım oluştuktan sonra karışıma agrega ilave edilmiştir. Son aşamada numunelerin çatlaklarını sınırlamak için prizmatik numunelerin karışımına lif eklenmiştir. Bu şekilde, bakterisiz H ve C numuneleri üretilmiştir. Ek olarak, emdirilmiş Mk karışıma eklendiğinde M numuneleri elde edilirken besiyeri ile emdirilmiş Mk'i karışıma eklendiğinde Z numuneleri elde edilmiştir. Karıştırma işleminden sonra taze harç kalıplara yerleştirilmiştir. Daha sonra Şekil 3.19'da gösterildiği gibi kalıplar vibrasyon tablasına yerleştirilerek vibrasyon işlemi uygulanmıştır. Geopolimer harç numuneler oda sıcaklığında 28 gün boyunca kür edilmiştir. Ön deneme için üretilen metakaolin esaslı küp ve prizma geopolimer harç numuneleri Şekil 3.20'de gösterilmiştir.

Tablo 3.8: Mk kütlesine göre karışımların oranları

Geopolimer karışımı						Emdirme prosedürü			
Seri	**Mk**	**SH**	**SS**	**Kum**	**Fiber Hacmi (%)**	**Emdirilmiş Mk**	**Bakteri**	**PBS**	**Besiyeri**
H	1.00	0.29	0.59	2.43	0.60	-	-	-	-
M	1.00	0.29	0.59	2.43	0.60	0.056	0.005	0.219	-
Z	1.00	0.29	0.59	2.43	0.60	0.056	0.005	0.109	0.109
C	1.00	0.29	0.59	2.43	0.60	-	-	-	-



Şekil 3.18: Ön deneme numunelerin karıştırma işlemi



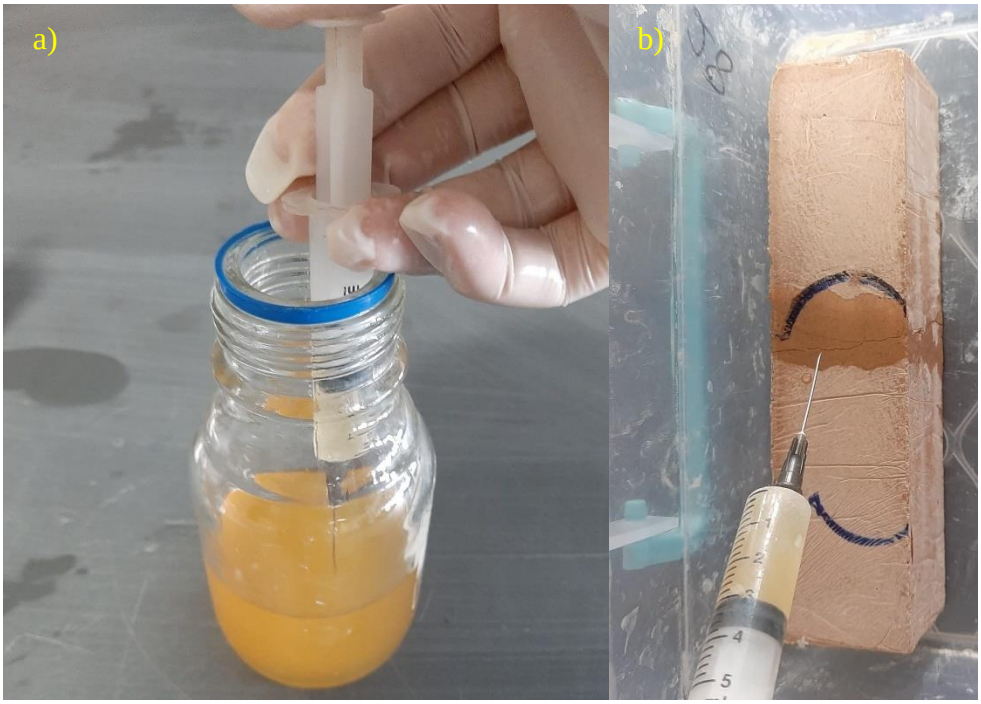
Şekil 3.19: Ön deneme numunelerin vibrasyon işlemi



Şekil 3.20: Ön deneme küp ve prizma numuneleri

3.4. ÖN DENEME NUMUNELERİNDE ÇATLAK OLUŞTURMASI VE İYİLEŞTİRME YÖNTEMLERİNİN ARAŞTIRILMASI

28 gün boyunca kür edilen numunelerin eğilme dayanımı deneyi her seri için 3 numunenin ortalama maksimum eğilme dayanımı bulunmuştur. Ardından eğilme cihazı kullanarak numunelere eğilme dayanımının %70'ine kadar yük yükleyerek numunelerde 100-200µm genişlikli çatlaklar oluşturulmuştur. Bu oluşturulan çatlaklar, sprey, batırma ve enjeksiyon yöntemleri kullanarak iyileştirme yapılmıştır. Bakterili besiyeri solüsyonu steril bir şırınga ile çekilmiş ve ardından numunelerin çatlağı üzerine enjekte edilmiştir. Bu işlem 12 saatte bir periyodik olarak uygulanmış ve iki ay sürmüştür. Şekil 3.21'de steril bir şırınga ile enjeksiyon yönteminin uygulama görüntüsü verilmiştir. Enjeksiyon yöntemi gibi, sterilize edilmiş sprey şişesi bakterili besiyeri solüsyonu ile doldurulmuş ve numunelerin çatlak yüzeylerine püskürtülmüştür. Şekil 3.22'de steril bir sprey şişesi vasıtasıyla bakterili solüsyonun numunenin yüzeyine spreylemesinin görüntüsü verilmiştir. Bu işlem 12 saatte bir periyodik olarak uygulanmış ve iki ay sürmüştür. Şekil 3.23'te gösterildiği gibi batırma yönteminde de bakterili besiyeri solüsyonu, numuneler tamamen solüsyonun altında kalacak şekilde steril plastik bir kutuya yerleştirilmiştir. Bu yöntemde de numuneler bir gün solüsyonda ve ertesi gün havada bırakılarak iki ay boyunca tekrarlanmıştır. İyileşme öncesi ve sonrası numunelerin görsel incelenmesi için 40x büyütmeli mikroskobu kullanılmıştır.



Şekil 3.21: Steril şırınga ile bakterili solüsyonun a) çekilmesi b) numunenin çatlağına enjekte edilmesi.



Şekil 3.22: Steril bir sprey şişesi ile bakterili solüsyonun numunenin yüzeyine spreylemesi



Şekil 3.23: Çatlaklı numunelerin steril kap içinde batırma yöntemiyle iyileştirilmesi

Bölüm 4.1'de gösterilmiş ön deneme deneyin bulgularında iyileştirme yöntemleri sonuçları incelenmiş ve sonuç olarak enjeksiyon yönteminin gelişmiş mekanik nitelikleri, ucuz maliyeti ve uygulama kolaylığı nedeniyle diğer yöntemlerden daha başarılı olduğu sonucuna varılmıştır (Tanyildizi ve diğ., 2022). Bu nedenle, yüksek sıcaklık etkisine maruz kalan beton numunelerinin iyileştirilmesi için enjeksiyon yöntemi kullanılmıştır.

3.5. DENEYSEL ÇALIŞMA

3.5.1. Geopolimer Beton Numunelerinin Üretimi

Bu çalışmada, kolemanit ve kırmızı çamur katkılı metakaolin esaslı geopolimer beton numuneleri üretilmiştir. Karışımlarda bağlayıcı olarak metakaolin (Mk), kolemanit (K) ve kırmızı çamur (KÇ) çeşitli oranlarda kullanılmıştır. Aktivatör ise sodyum hidroksit ve sodyum silikat çözeltileri kullanılmıştır. Agrega olarak da kaba ve ince agregalar kullanılmıştır. Çatlakların genişlemesini engellemek amacıyla lif kullanılmıştır. Geopolimer beton numuneleri üretmek için ilk olarak 1000 ml distile suya 480 gr SH peletleri eklenerek 12 M sodyum hidroksit çözeltisi hazırlanmış ve soğumak üzere 24 saat ortam sıcaklığında bekletilmiştir. SH solüsyonu soğutulduktan sonra SS solüsyonu ile karıştırılarak aktivatör solüsyonu elde edilmiştir. Daha sonra mikser yardımıyla aktivatör solüsyonu ve akışkanlaştırıcıyı Mk ile homojen olarak karıştırılmıştır. K veya KÇ malzemeleri bir sonraki adımda eklenip karıştırılmıştır. Daha sonra çakıl, kum ve sentetik veya karbon fiber kuru karıştırılarak karışıma homojen bir şekilde karıştırılmıştır. Son olarak taze karışımı önceden gres yağı ile yağlanmış olan 100x100x100 mm'lik küp ve Ø100x200 mm'lik silindirik kalıplara dökülmüş ve daha sonra kalıplar vibrasyon tablası ile vibrasyon işlemine tabi tutulmuştur. Şekil 3.24'te geopolimer beton karışmalarının karıştırma prosedürü gösterilmiştir. 24 saat sonra numuneler kalıptan çıkarılmış ve 20°C'de test gününe kadar kürlenmiştir. Şekil 3.25 ve Şekil 3.26'da geopolimer betonun 100x100x100 mm'lik küp ve Ø100x200 mm'lik silindir numunelerin görüntüleri verilmiştir. Kalıptan çıkarılan Ø100x200 mm'lik silindir numuneler taş kesme makinesi ile kesilerek Ø100x50 mm'lik numuneler elde edilmiştir. Şekil 3.27'de silindir beton numunelerin taş kesme makinesi ile kesme işlemi ile ilgili görüntüler verilmiştir. Betonun makro ve mikro özelliklerini geliştirmek için biyomineralizasyonun nasıl kullanılabileceğini inceleyen (Chaurasia ve diğ., 2019) çalışmasında, kalsiyum laktat ile 100 gr çimentonun %1'ini kullanmışlardır. Bu çalışmada da karışımlara bağlayıcının %1'i oranında kalsiyum laktat eklenmiştir. Bu çalışmada kullanılan karışım miktarları Tablo 3.9'da gösterilmiştir.

Tablo 3.9: Karışım miktarları (kg/m^3).

ID	Mk	K	KÇ	SS	SH	Kaba Agrega	İnce Agrega	Fiber (Hacimce %)	Akışkanlaştırıcı
M	500	-	-	300	150	742.12	494.74	0.6	-
KM	480	20	-	300	150	735.59	490.4	0.6	3.75
KÇM	470	-	30	300	150	730.98	487.32	0.6	7.5



Şekil 3.24: Geopolimer betonun karıştırma prosedürü (a) kalıpların vibrasyon masasına sabitlenmesi, (b) miksere metakaolin eklenmesi (c) mikserde malzemelerin karıştırılması.



Şekil 3.25: Geopolimer betonun 100x100x100 mm'lik küp numuneler.



Şekil 3.26: Geopolimer betonun Ø100x200 mm'lik silindir numuneler.



Şekil 3.27: Silindir beton numunelerin kesme işlemi (a) taş kesme makinesi (b) kesilmemiş silindir numuneler (c) kesilmiş Ø100x50 mm'lik numuneler.

Ardından, geopolimer beton numuneleri durabilite etkilerine tabi tutulmadan önce ağırlık ölçümleri, basınç dayanımı, yarmada çekme dayanımı, UPV ve kılcal su emme testleri yapılmıştır. Ayrıca, aynı testler, durabilite etkilerine maruz kalan numunelere ve iyileştirilmiş numunelere karşılaştırma amacıyla tekrarlanmıştır. Ayrıca geopolimer beton numunelerinin iyileşmesini mikroyapısal olarak değerlendirmek için SEM/EDS, XRD ve FTIR analizleri yapılmıştır.

3.5.2. Yüksek Sıcaklık Testi

İlk olarak, geopolimer beton numuneleri etüvde 105 °C'de 24 saat kurutulmuştur. Ardından, yüksek sıcaklık fırını 5 °C/dakika oranında artacak şekilde ayarlanmıştır. Çalışmada kullanılan yüksek sıcaklık fırını Şekil 3.28'de gösterilmiştir. Numuneler daha sonra sırasıyla 200°C, 400°C, 600°C ve 800°C sıcaklıklara maruz bırakılmıştır. Fırının sıcaklığı belirtilen sıcaklıklara ulaştıktan sonra numuneler bir saat daha yüksek sıcaklıklara maruz bırakılmıştır (Tanyildizi, 2013). Böylece, geopolimer beton numunelerinin çatlaklarının oluşmasına neden olacak yüksek sıcaklık testi gerçekleştirilmiştir. Ayrıca K ve KÇ malzemelerinin geopolimer numuneler üzerindeki etkisini incelemek için yüksek sıcaklık testi yapılmıştır. Numunelerin üzerindeki kodlama yazıları yüksek sıcaklık etkisinden dolayı silindiği için numuneler birbiriyle karışmaması için belli bir sırada dizilmiştir. Test bittikten 24 saat sonra soğumuş olup dizildiği aynı sırayla fırından çıkarılmış ve üzerinde tekrar kodlama yazıları yazılmıştır.



Şekil 3.28: Silindir beton numunelerin üzerinde yapılan yüksek sıcaklık testi**.**

3.5.3. Basınç Dayanımı Testi

Ön deneme için üretilen metakaolin esaslı küp harç numunelerinin basınç dayanımını belirlemek ve S. pasturii'nin metakaolin esaslı geopolimer harç matrisi üzerindeki etkisini incelemek için 50x50x50 mm küp numuneleri hazırlanmıştır. Çalışmada üretilen küp

numunelerinin basınç dayanımları ASTM C39 standardına göre test edilmiştir (ASTM C39, 2021). M, KM ve KÇM numunelerinin basınç dayanımı testi, K ve KÇ içeriğinin geopolimer matrisi üzerindeki etkisini incelemek için yapılmıştır. Bu amaçla üretilen tüm seriler için 3 ve 28 gün sonra üçer adet 100x100x100 mm küp geopolimer beton numunelerinin üzerinde basınç dayanımı testleri yapılmıştır. Her test için üç adet numune kullanılmış ve elde edilen sonuçların ortalama değerleri esas olarak alınmıştır. Şekil 3.29'da basınç dayanımı testine ait görüntüler verilmiştir.



Şekil 3.29: Basınç dayanımı testine tabi tutulan (a) 50x50x50 mm küp harç numuneler, (b) 100x100x100 mm küp geopolimer beton numuneler.

3.5.4. Eğilme Dayanımı Testi

Ön deneme için üretilen metakaolin esaslı prizma harç numunelerinin eğilme dayanımını belirlemek ve S. pasturii'nin metakaolin esaslı geopolimer harç matrisi üzerindeki etkisini incelemek için 40x40x160 mm prizmatik numuneler hazırlanmıştır. Hazırlanan numuneler 28 gün boyunca 20±2 °C'de tutulmuştur. ASTM C 348 standardına (ASTM C348, 2014) göre numunelerin maksimum eğilme mukavemeti değerini elde etmek için üç numune üzerinde bir eğilme mukavemeti testi yapılmıştır. Ayrıca, iyileşme için hazırlanan numunelere maksimum eğilme dayanımının %70'i oranında yük uygulanarak çatlaklar oluşturulmuştur. Ön deneme çalışmasında üç farklı iyileştirme yöntemi (batırma, sprey ve enjeksiyon) kullanarak numuneler

iyileştirilmiştir. Bu numuneler sayesinde bu tez çalışmasında kullanılan iyileştirme yöntemi belirtilmiştir. Şekil 3.30'da eğilme dayanımı testine ait görüntüler verilmiştir.



Şekil 3.30: Eğilme dayanımı testine tabi tutulan 40x40x160mm'lik prizmatik harç numuneler.

3.5.5. Ağırlık Ölçümleri

Durabilite deneylerine tabi tutulan numunelerin ağırlık kayıplarını incelemek için ağırlık ölçümleri hassas terazi kullanarak yapılmıştır. Ağırlık ölçümlerini bulmak için kullanılan terazi ve numunelerin kurutma işlemine ait görüntüler Şekil 3.31'de gösterilmiştir. Yüksek sıcaklık testine tabi tutulan numuneler, 24 saat boyunca 20°C'de soğumaya bırakılmış ve daha sonra numunelerin ağırlıkları aynı terazi kullanılarak tekrar ölçülmüştür. İlk olarak, kesilerek elde edilen Ø100x50 mm silindir geopolimer beton numuneleri etüvde sabit ağırlığa gelinceye kadar kurutulmuştur. Kurutulan numuneler hassas teraziler kullanılarak tartılmıştır. Elde edilen ağırlık değerleri kullanılarak ağırlık değişim yüzdeleri hesaplanmıştır. Ayrıca, durabilite

etkisine maruz kalan numunelerin ağırlık kaybı da hesaplanmıştır. Bu tez çalışmasında ağırlık kaybı yüzdeleri aşağıdaki denklemi kullanılarak hesaplanmıştır.

$$W_k = ((W_i - W_d) / W_i)x100 \quad (1)$$

W_k, durabilite etkilerinden sonra numunelerin ağırlık kaybı yüzdesi (%), W_i, geopolimer numunelerinin durabilite etkilerinden önceki ilk ağırlıkları (kg) ve W_d, durabilite etkilerinden sonra geopolimer numunelerinin ağırlıklarıdır (Kg).



Şekil 3.31: Ağırlık ölçümlerini gerçekleştirmek üzere yapılan (a) numunelerin kurutma işlemi, (b) terazi ile tartma işlemi.

3.5.6. Yarma Çekme Dayanımı Testi ve Çatlaklar oluşturma İşlemleri

İlk olarak, Ø100x50mm'lik geopolimer beton numunelerinin durabilite etkilerine maruz bırakılmadan önce yarmada çekme dayanımı testleri yapılmıştır. Yarmada çekme dayanımı deneyi, ASTM C496/C496M (ASTM C496, 2017) standardına göre gerçekleştirilmiştir. Ardından, durabilite etkilerine maruz kalan geopolimer numunelerin maksimum yamada çekme dayanımları bulunmuştur. Daha sonra bu numunelerin bir kısmı başlangıç numunelerin maksimum yarmada çekme dayanımının %70'i kadar yük uygulanarak çatlatılmıştır. Önceki yapılan çalışmalarda prizmatik numunelerinde çatlak oluşturmak için numunelerin maksimum eğilme mukavemetinin %70'ine kadar yüklenme yapılmıştır (Gupta ve diğ., 2018, Şahmaran ve diğ., 2008, Samaha ve Hover, 1992). Böylece, çatlamış numunelerden iki ayrı set oluşturulmuş ve bu iki set, kalan yarmada çekme mukavemetini belirlemek için bir yarma çekme testine tabi tutulmuştur. Son olarak, iyileştirme işleminden sonra çatlamış numunelerin iki seti üzerinde yarmada çekme dayanımı testi yapılmıştır. Şekil 3.32'de yarma çekme dayanımı testine ait görüntüler verilmiştir. Ayrıca, iyileştirilmiş numunelerin yarma dayanımları belirlenmiş ve

yarma çekme dayanımının geri kazanım yüzdeleri (G) aşağıdaki denklem kullanılarak elde edilmiştir.

$$G = \frac{G_h}{G_i} \times 100 \quad (2)$$

Burada G, yarmada çekme dayanımının geri kazanım yüzdesi (%); G_i, numunelerin ilk yarmada çekme dayanımları (MPa) ve G_h iyileştirilmiş numunelerin yarmada çekme dayanımları (MPa).



Şekil 3.32: Yarmada çekme dayanımı testine tabi tutulan (a) 400°C etkisine maruz kalan numune, (b) %70 yükleme ile çatlak oluşumu.

3.5.7. Ultrasonik Ses Geçirgenliği

Bu tez çalışmasında, direkt, direkt olmayan ve yarı direkt yöntemleri arasında direkt UPV yöntemi kullanılmıştır. Ayrıca, her numune için üç okuma alınmış ve okumaların ortalaması ele alınmıştır. UPV testi, Ø100x50 mm geopolimer beton silindir numunelerinin UPV değerlerini belirlemek için ASTM C597 (ASTM C597, 2016) standardına göre yapılmıştır. Ayrıca, Şekil 3.33'te geopolimer numunelerin üzerinde yapılan UPV testine ait görüntüler verilmiştir. UPV testi, ilk numuneler ve durabilite etkilerine maruz kalan geopolimer numunelerin üzerinde gerçekleştirilmiştir. Daha sonra, durabilite çatlakları ve yarmada çekme

yükleme çatlakları olan numuneler üzerinde UPV testi yapılmıştır. Böylece çatlaklı numunelerin hasar dereceleri (HD) denklem (3) kullanarak belirlenmiştir. Son olarak, iyileştirilmiş numuneler üzerinde de UPV testi gerçekleştirilmiştir. Ayrıca UPV testi değerleri kullanarak iyileşmiş numunelerin iyileşme derecesini (İD) hesaplamak için denklem (4) kullanılmıştır.

$$HD = 1 - \left({}^{V_ç}/_{V_i}\right) \tag{3}$$

$$\text{İD} = \frac{(V_h - V_ç)}{V_ç} \times 100 \tag{4}$$

Burada; HD, hasar derecesi; $V_ç$, çatlamadan sonra UPV değeri; V_i, çatlamadan önce ilk UPV değeri; İD iyileşme derecesi ve V_h iyileşmeden sonra UPV değeridir.



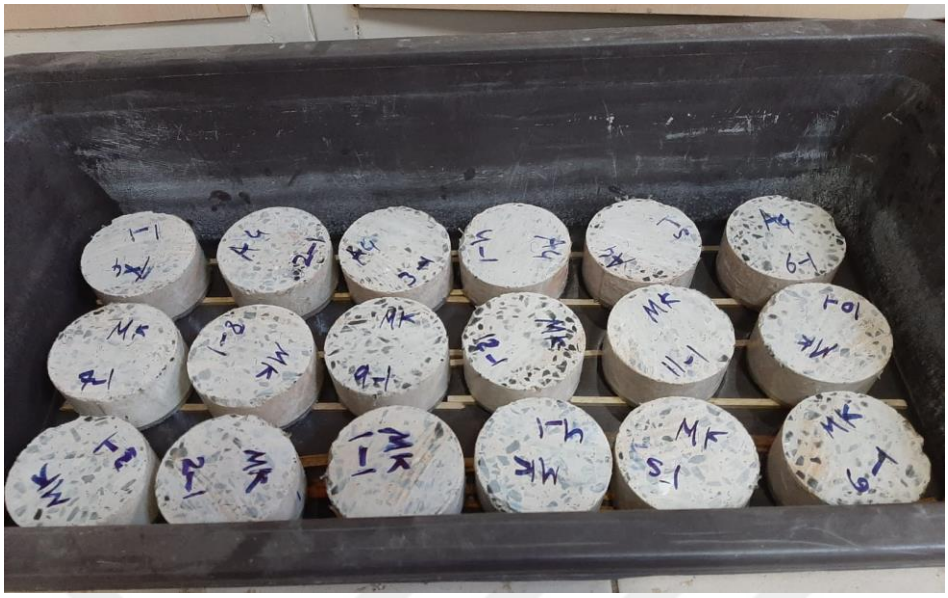
Şekil 3.33: UPV testine tabi tutulan (a) Ön deneme harç prizma, (b) ve (c) beton silindir numunelerin tam temaslı ve kısmen temaslı uygulamaları.

3.5.8. Kılcal Su Emme Testi

M, KM ve KÇM numunelerinin su emme kapasiteleri, ASTM C1585 (ASTM C1585, 2020) standardı kullanılarak belirlenmiştir. İlk olarak, numuneler, sabit bir ağırlığa ulaşana kadar 40°C'de kurutulmuştur. Ardından, silindir numunelerin yan yüzeyleri parafin ile kaplanarak su penetrasyonu silindirin alt ve üst yüzeyleri ile sınırlandırılmıştır. Daha sonra kuru numunelerin kendi tabanından 5mm yüksekliğinde su eklenmiştir. Ayrıca, numunelerin alt yüzeylerinden su geçmesini sağlamak için numuneler tahta çubuklar üzerine yerleştirilmiştir. Şekil 3.34'te kılcal su emme testine tabi tutulan geopolimer beton silinir numuneler gösterilmiştir. Numuneler suya daldırılmadan önce parafin ile kaplanmış kuru ağırlıkları (W_d) hassas terazi kullanılarak belirlenmiştir. Ayrıca, 15 dakika, 30 dakika, 1, 2, 3, 5, 24, 48, 72 ve 96 saat sonra sudan M, KM ve KÇM numuneleri alınarak aynı terazi kullanarak yaş ağırlıkları (Ww) belirlenmiştir. Son olarak, zamanla emilen su miktarı, su ile temas eden alanla ilişkileri belirlenmiş ve kılcal su emme eğrileri çizilmiştir. Kılcal su emme testi, durabilite etkilerinden önce ve sonra M, KM ve KÇM numuneleri üzerinde gerçekleştirilmiştir. Ayrıca bu test, çatlamış numuneler ve iyileştirilmiş numunelerin üzerinde gerçekleştirilmiştir. Ek olarak, su emme katsayısı (Kc), en küçük kareler yöntemi ve denklem (5) kullanarak hesaplanmıştır:

$$\frac{\mathrm{Ww} - \mathrm{Wd}}{A} = \frac{Q}{A} = K_C \times \sqrt{t} \qquad (5)$$

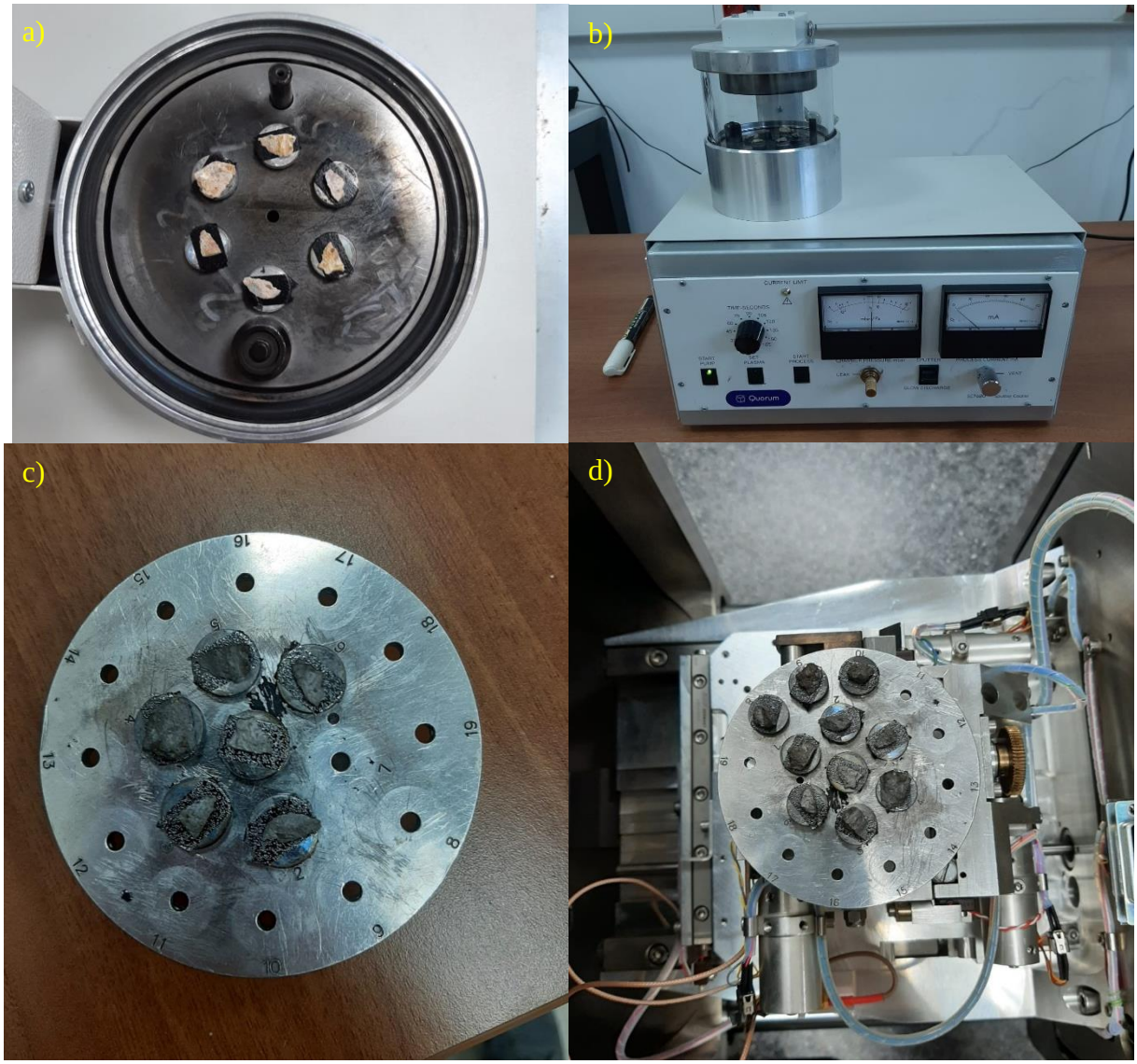
Burada; W_d ve W_w, sırasıyla kuru ve ıslak ağırlıkları; A, su ile temas halinde olan yüzeyin alanı (m^2); Q, emilen su kütlesi (kg); Kc, su emme katsayısı ((kg/ (m^2. √sn)) ve t, zaman (saniye) olduğunu belirtilmiştir.



Şekil 3.34: Kılcal su emme testine tabi tutulan geopolimer beton silinir numuneler.

3.5.9. Mikroyapısal Analizleri

Taramalı elektron mikroskobu (SEM), enerji dağılımlı X-ışını spektroskopisi (EDS), X-ışını toz kırınımı (XRD) ve Fourier dönüşümü kızılötesi spektroskopisi (FTIR) analizleri; S. pasteurii 'nin geopolimerdeki iyileşme performansını incelemek için yapılmıştır. Bu analizler, numunelerdeki iyileşme nedeniyle oluşan $CaCO_3$ içeriğini incelemek için yapılmıştır. Ayrıca bu analizler, numunelerde yüksek sıcaklıkların neden olduğu değişiklikleri incelemek için yapılmıştır. Mikroyapı analizlerini incelemek üzere iyileşmiş ve iyileşmemiş numunelerin çatlak bölgelerinden numuneler alınmıştır. SEM/EDS analizi gerçekleştirmek üzere yapılan işlemlerin görüntüleri Şekil 3.35'te verilmiştir.



Şekil 3.35: SEM/EDS analizinin işlemleri: (a) numunelerin sırayla yapıştırarak yerleştirilmesi, (b) numuneler kaplama cihazına yerleştirilmesi, (c) kaplama cihazından kaplanmış numunelerin çıkarılması, (d) kaplanmış numunelerin SEM/EDS cihazındaki yerine yerleştirilmesi.

3.5.10. Numunelerin Çatlaması ve Bakteriyel İyileştirilmesinin Metodolojisi

Bu tez çalışmasında üretilen metakaolin esaslı geopolimer beton numunelerinde farklı yollarla çatlaklar oluşturulmuştur. İlk olarak, M, KM ve KÇM numuneleri yüksek sıcaklık test etkisine (20, 200, 400, 600 ve 800°C) maruz bırakılarak yüksek sıcaklık çatlakları oluşturulmuştur. Ayrıca, çatlaklı bir yapı elemanı, bulunduğu yapının bir parçası olduğu için yükleme altında kalarak çatlaklı yapı elemanlarında ek çatlaklar oluşmaktadır. Nitekim, bu etkinin simülasyonu canlandırmak amacıyla durabilite etkilerine maruz kalan numunelerin üzerinde yarmada çekme dayanımı yüklemesi ile ek 100-200µm çatlaklar oluşturulmuştur. Yüksek sıcaklık etkisine maruz kalan çatlaklı ve iyileştirilmiş numunelerin kodlanması Tablo 3.10'da verilmiştir.

Tablo 3.10: Yüksek sıcaklık etkisine maruz kalan çatlaklı ve iyileştirilmiş numunelerin kodlanması.

Çatlaksız Numuneler	**Yüksek sıcaklık çatlakları içeren numuneler**	**Yüksek sıcaklık çatlakları ve yarmada çekme yüklemesinin çatlakları içeren numuneler**	**Yüksek sıcaklık çatlaklarına sahip iyileştirilmiş numuneler**	**Yüksek sıcaklık çatlakları ve yarmada çekme yüklemesinin çatlaklarına sahip iyileştirilmiş numuneler**
M	M (YS)	M (YS+Y)	M (İYS)	M (İYS+Y)
KM	KM (YS)	KM (YS+Y)	KM (İYS)	KM (İYS+Y)
KÇM	KÇM (YS)	KÇM (YS+Y)	KÇM (İYS)	KÇM (İYS+Y)

Geopolimer beton numunelerinin iyileştirilmesi için $9.0*10^8$ hücre/ml bakteri konsantrasyonlu besiyeri çözeltisi kullanılmıştır. 3.4 bölümünde gösterildiği gibi ön deneme çalışmasına ait çatlaklı geopolimer harç numunelerini iyileştirmek için enjeksiyon yöntemi seçilmiştir. Ayrıca, daha önce belirtildiği gibi bakterili besiyeri çözeltisine kalsiyum kaynağı olarak kalsiyum laktat eklendiğini bildirilmektedir. Böylece, kalsiyum laktat içeren bakterili besiyeri solüsyonu şişeden steril şırınga ile çekilmiş ve beton numunelerin çatlaklarına enjekte edilerek enjeksiyon yöntemi uygulanmıştır. Bu işlem iki ay boyunca her 12 saatte bir tekrarlanmıştır. Ek olarak, numunelerin bakteriyel iyileşme sürecini takip etmek için 40x büyütmeli bir mikroskop kullanılmıştır.

4. ARAŞTIRMA BULGULARI

4.1. ÖN DENEYİN BULGULARI

Bu çalışmada, ilk olarak numuneler 28 gün boyunca 20±2 °C sıcaklığında bekletildikten sonra her seriden üç numunenin eğilme dayanımı elde edilmiş ve böylece her serinin maksimum eğilme dayanımı elde edilmiştir. Ardından, prizmatik numunelerde oluşturmak için numuneler eğilme dayanımı cihazına tabi tutulmuş ve numunelere maksimum eğilme dayanımının %70'i kadar yük yüklenmiştir. Bu şeklide 100 ile 200 µm genişlikli çatlaklar oluşturulmuştur. Ayrıca, Tablo 4.1'de gösterildiği gibi numunelerin çatlakları enjeksiyon, daldırma/batırma ve püskürtme yöntemleri kullanarak iyileştirilmiştir. Ardından, iyileştirilen numunelerin eğilme dayanımları bulunmuş ve 40x büyütmeli mikroskop kullanarak numunelerin görsel incelemeleri yapılmıştır.

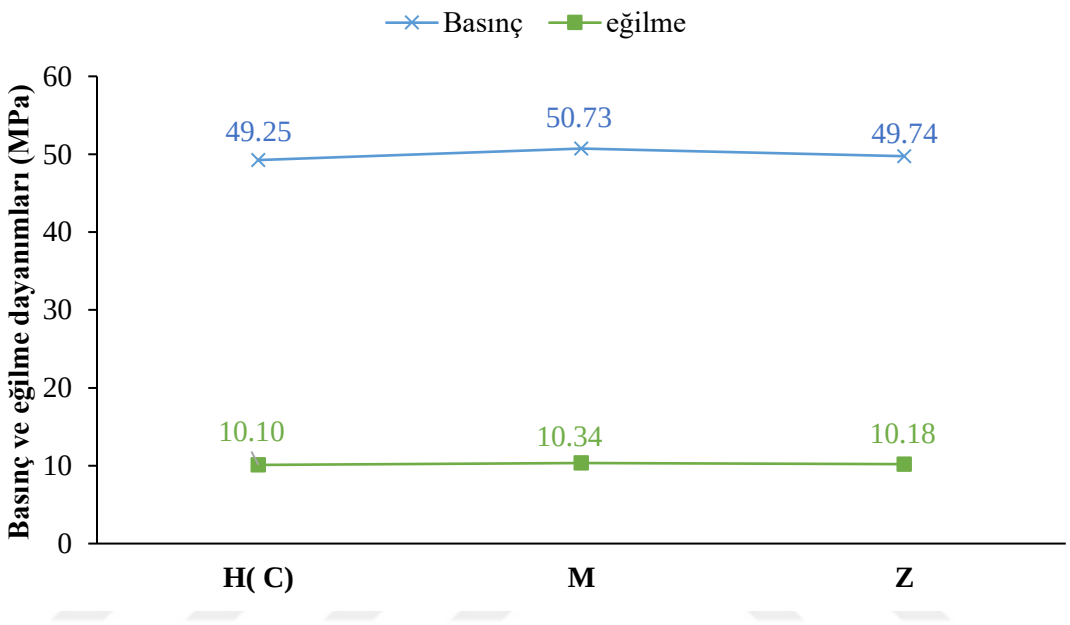
Tablo 4.1: Numunelerin iyileşme prosedürü.

Seri	**Enjeksiyon yöntemi**	**Sprey yöntemi**	**Daldırma yöntemi**
Bakteri içermeyen numuneler (H)	Bakterili besiyeri	Bakterili besiyeri	Bakterili besiyeri
***Bakteri içeren numuneler* (M)**	Besiyeri	Besiyeri	Besiyeri
Hem bakteri hem besiyeri içeren numuneler (Z)	Besiyeri	Besiyeri	Besiyeri
Kontrol numuneler (C)	Besiyeri	Besiyeri	Besiyeri

M numunelerinin karışımlarına bakteri katıldığını, C ve H numunelerinin karışımlarına bakteri katılmadığını ve Z numunelerinin karışımlarına hem bakteri hem besiyeri katıldığını Tablo 4.1'de gösterilmiştir. Ayrıca, iyileştirme işlemi için bakteri içeren numunelere besiyeri ve bakteri içermeyen numunelere bakterili besiyeri kullanıldığını de gösterilmiştir.

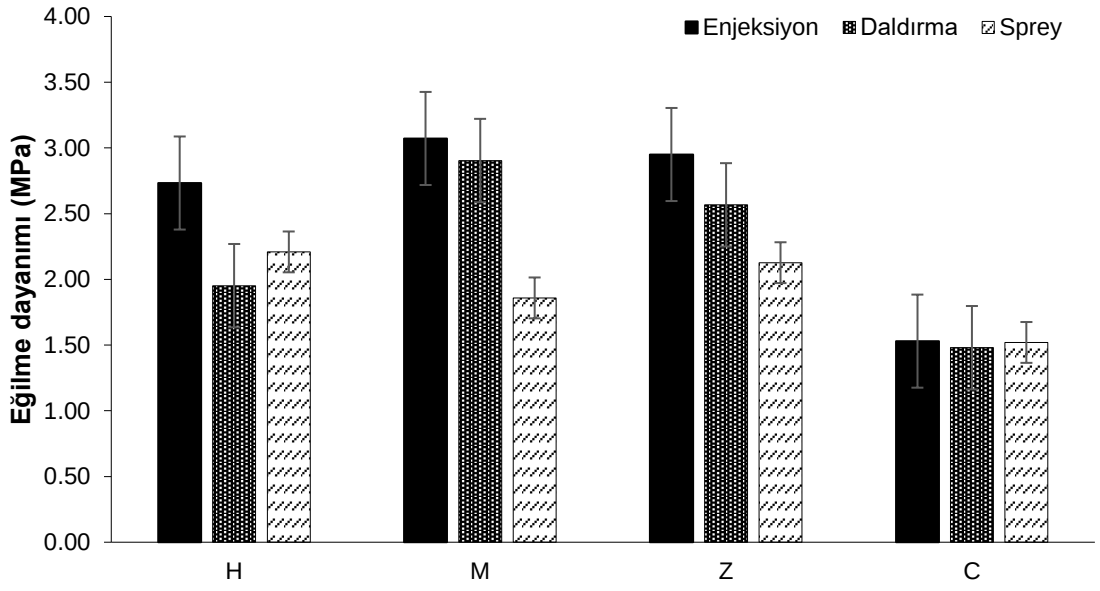
4.1.1. Mekanik Özellikler

Bu çalışmada, bakterili ve bakterisiz geopolimer numunelerin basınç ve eğilme dayanımları bulunmuştur. Üretilmiş numuneler 28 gün boyunca 20 ±2 °C sıcaklığında bekletilmiştir. Geopolimer harç numunelerin eğilme ve basınç dayanımlarının sonuçları Şekil 4.1'de verilmiştir.



Şekil 4.1: Geopolimer harç numunelerin ilk eğilme ve basınç dayanımları

Şekil 4.1 incelendiğinde, en düşük basınç ve eğilme dayanımları bakterisiz numunelerden (H) ve en yüksek dayanımlar bakterili numunelerden elde edildiğini görülmüştür. Dolayısıyla, S. pasteurii bakterisinin harç karışımlarına eklenmesiyle birlikte numunelerin eğilme ve basınç dayanımlarının arttığını görülmüştür. Bir önceki yapılan çalışmada (Abo-El-Enein ve diğ., 2013), harç numunelerin dayanımı üzerindeki S. pasteurii bakterisinin etkisini incelenmiştir. Onların yaptıkları çalışmadaki bakteri, harç numunelerin basınç dayanımı %33 kadar arttırdığını görülmüştür. Bu çalışmada, bakteri içeren harç numunelerin basınç ve eğilme dayanımları, bakterisiz harç numunelere göre sırayla, %3 ve 2.4 kadar arttığını görülmüştür. Ayrıca hem bakteri hem besiyeri içeren Z numunelerin eğilme ve basınç dayanımları sırasıyla, %0.8 ve 1 olarak arttığını görülmüştür. Z numunelerin dayanım artışındaki azalış, besiyerinin içerdiği malzemelerin numunelerin mekanik özelliklerini etkilediğini düşünülmüştür. Ayrıca numunelerdeki basınç dayanımının artışlarının düşük olması, kalsiyum içeriğinin düşük olmasından kaynaklandığını düşünülmüştür. Bu işlemlerden sonra daha önce belirtildiği şekilde numunelerde çatlaklar oluşturulmuş ve iyileştirme işlemleri 60 gün boyunca sürdürülmüştür. Şekil 4.2'de iyileştirilmiş metakaolin esaslı harç numunelerin eğilme değerleri verilmiştir.



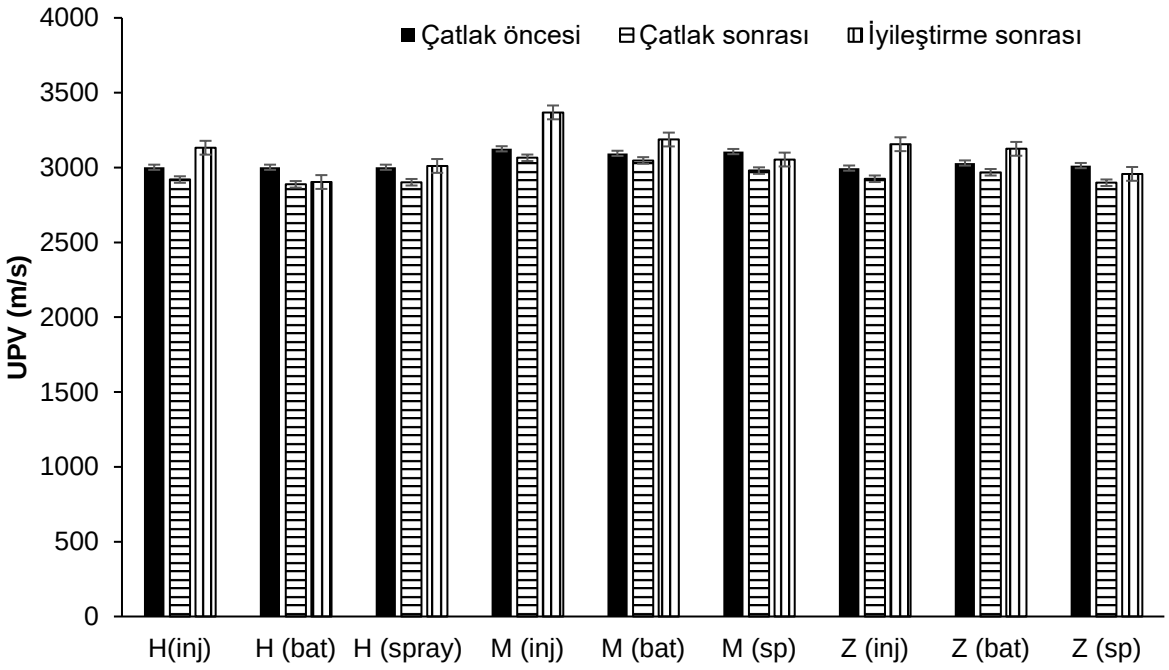
Şekil 4.2: İyileştirme işleminden sonra numunelerin eğilme dayanımları

Şekil 4.2'de enjeksiyon yöntemi, iyileştirme yöntemlerinin arasında en iyi yöntem olduğu gösterilmiştir. Ayrıca, iyileştirilen H, M ve Z harç numunelerin eğilme dayanımları C harç numunelerine göre daha yüksek olduğunu bulunmuştur. Böylece, enjeksiyon metodu ile

iyileştirilmiş H, M ve Z geopolimer harç numunelerin geri kazanım yüzdeleri sırasıyla %27.03, %29.69 ve %28.98 olarak elde edilmiştir. Daldırma metodu ile iyileştirilmiş H, M ve Z geopolimer harç numunelerin geri kazanım yüzdeleri sırasıyla %19.31, %28.05 ve %25.25 olarak hesaplanmıştır. Ayrıca, püskürtme metodu ile iyileştirilmiş H, M ve Z geopolimer harç numunelerin geri kazanım yüzdeleri sırasıyla %21.88, %17.99 ve %20.92 olarak elde edilmiştir. (Su ve diğ., 2021), polipropilen fiber ve bakteri içeren betonun iyileşme performansını incelemişler ve sonuç olarak eğilme dayanımının iyileşme yüzdesi %32 olarak elde etmişlerdir. Bu çalışmada, geopolimer harç numunelerin eğilme dayanımının en yüksek geri kazanım yüzdesi, %29.69 olup enjeksiyon metoduyla iyileştirilen M serisinden elde edilmiştir.

4.1.2. Ultrasonik Ses Geçirgenliği

Bu bölümde, metakaolin esaslı geopolimer numunelerinin UPV değerleri incelenmiştir. İlk olarak, numunelerin çatlak öncesi ve sonrası UPV değerleri elde edilmiştir. Ardından, üç yöntemle iyileştirilmiş harç numunelerinin UPV değerleri elde edilmiştir. Geopolimer harç numunelerin UPV değerleri şekil 4.3.'te gösterilmiştir.



Şekil 4.3: Numunelerin UPV sonuçları

Şekil 4.3 incelendiğinde, geopolimer harç numunelerinde oluşturulan çatlaklarının etkisinden dolayı UPV değerlerinde bir düşüş kaydedilmiştir. Ayrıca, iyileştirme işleminden sonra

numunelerin UPV değerlerinde bir yükseliş kaydedilmiştir. İyileştirme işleminden sonra oluşan yükselişler, bakterinin oluşturduğu $CaCO_3$ çökeltilerinin numunelerin çatlaklarını doldurmasından kaynaklandığı bulunmuştur. UPV değerleri incelendiğinde, eğilme dayanımı sonuçlarında olduğu gibi enjeksiyon yöntemi, iyileştirme yöntemlerinin arasında en iyi yöntem olduğu görülmüştür.

4.1.3. Görsel İnceleme

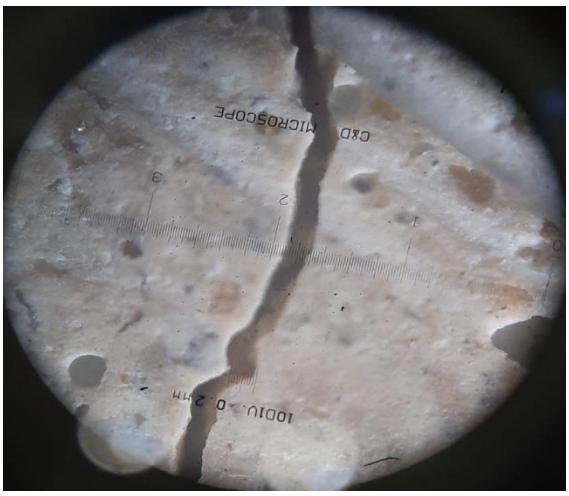
Tez çalışması kapsamında geopolimer harç numunelerdeki çatlakları iyileştirmek için sprey, batırma ve enjeksiyon yöntemleri kullanılmıştır. Çatlak iyileştirilmesi yapılan tüm numunelerin iyileşme görüntüleri Şekil 4.4-4.20'de verilmiştir.



(a)



(b)



(c)

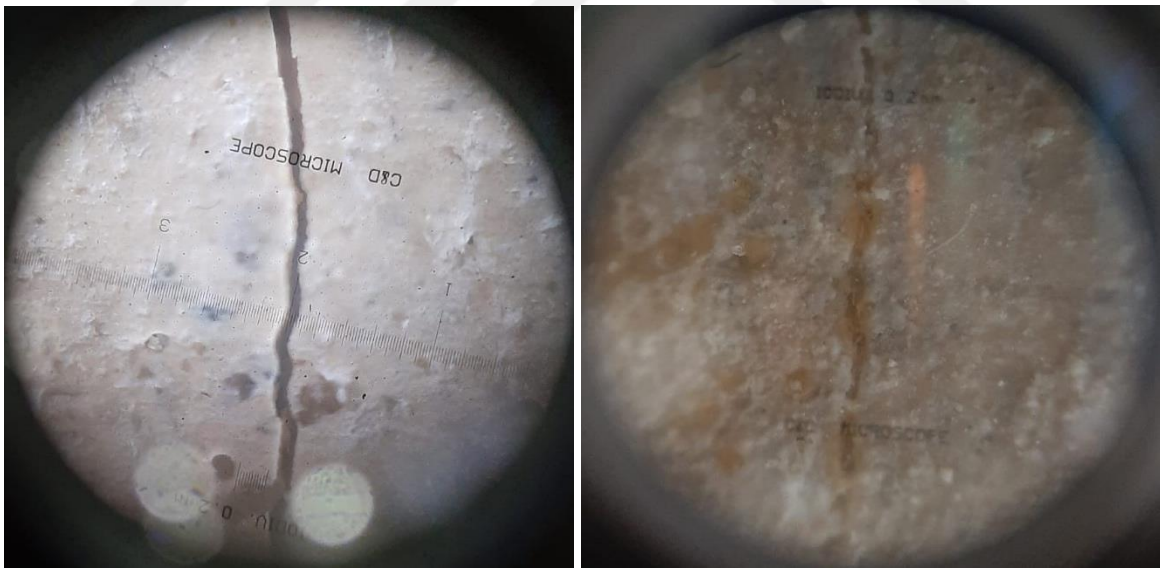


(d)

Şekil 4.4: a) Sprey yöntemi ile iyileştirilecek olan Z grubun 1. numunesinin 200 µm'lik çatlak görüntüsü, b) 2 ay sonunda iyileştirilmiş çatlağın görüntüsü, c) Çatlağın 2 ay önceki mikroskop altındaki görüntüsü, d) 2 ay sonunda iyileştirilmiş çatlağın mikroskop altındaki görüntüsü

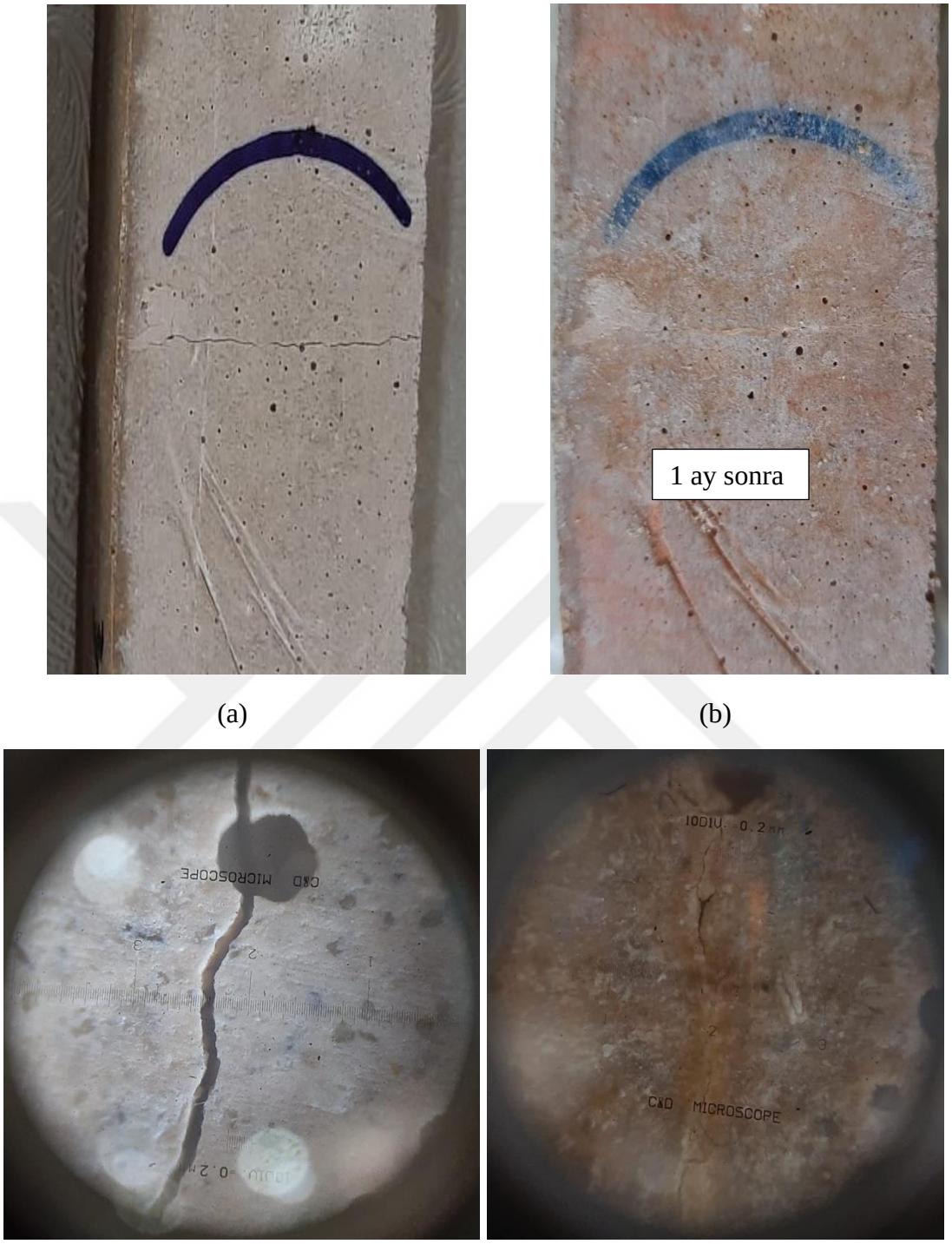


(a) (b)



(c) (d)

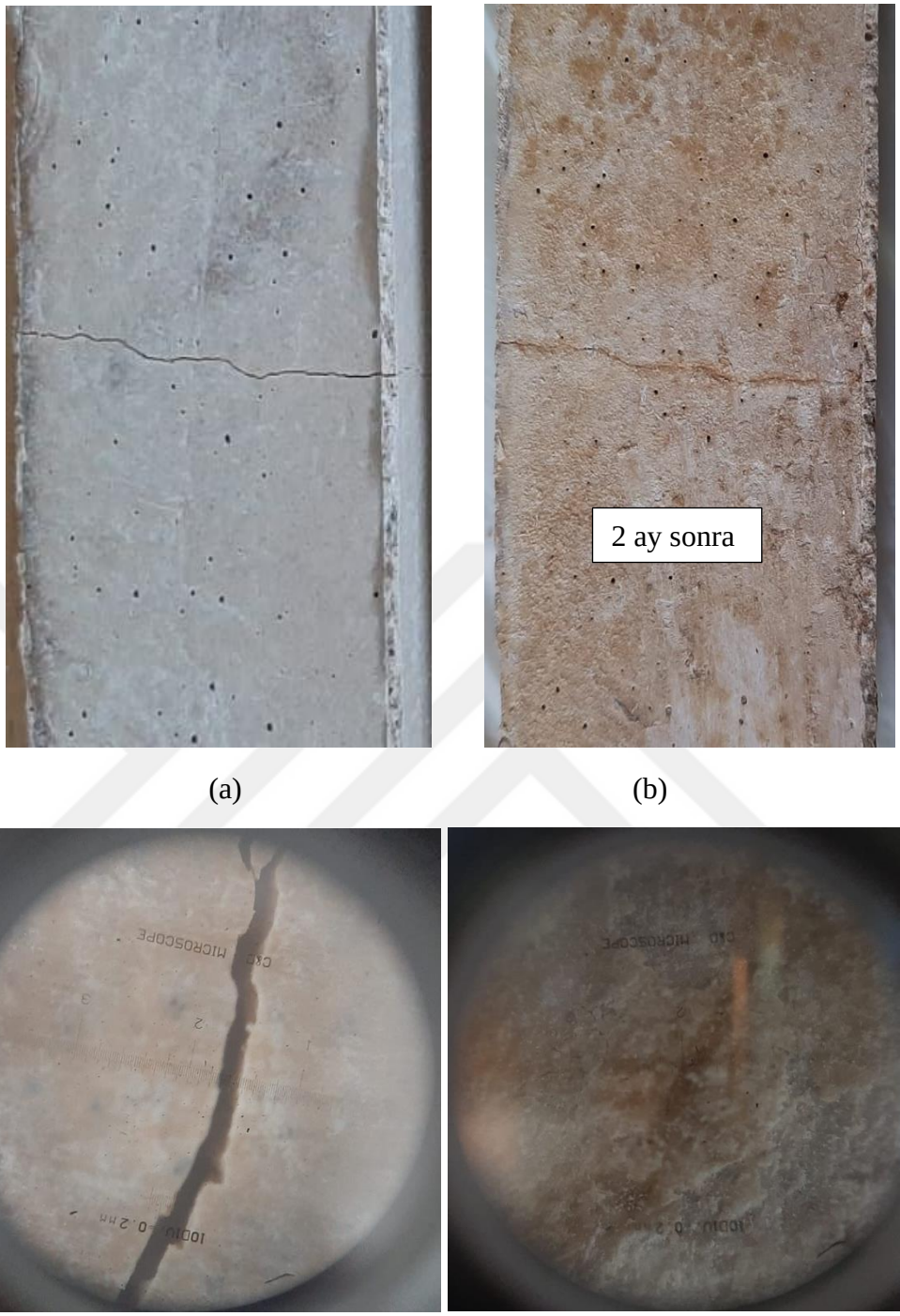
Şekil 4.5: a) Batırma yöntemi ile iyileştirilecek olan Z grubun 2. numunesinin 100 µm'lik çatlak görüntüsü, b) 2 ay sonunda iyileştirilmiş çatlağın görüntüsü, c) Çatlağın 2 ay önceki mikroskop altındaki görüntüsü, d) 2 ay sonunda iyileştirilmiş çatlağın mikroskop altındaki görüntüsü



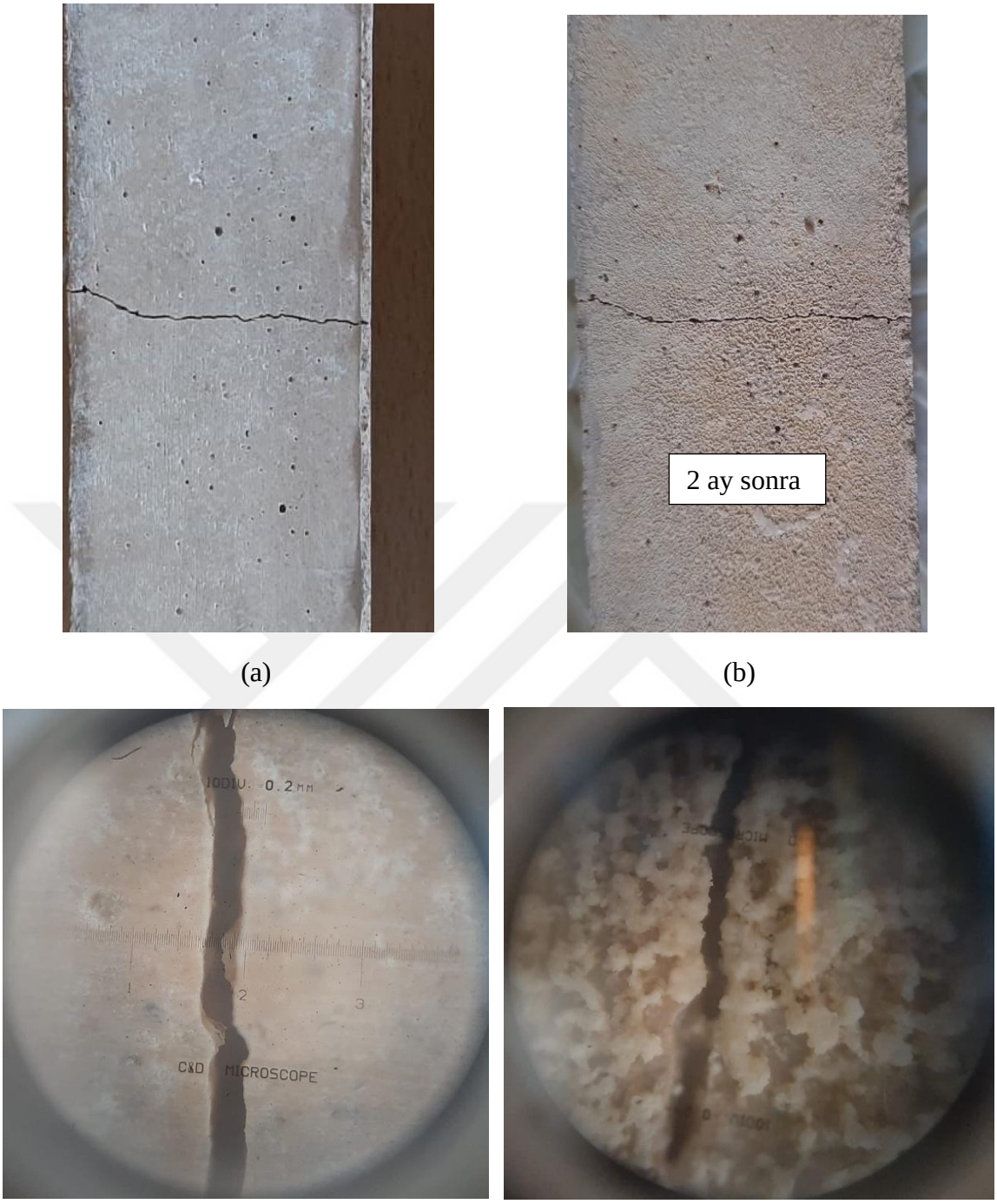
(a) (b)

(c) (d)

Şekil 4.6: a) Enjeksiyon yöntemi ile iyileştirilecek olan Z grubun 3. numunesinin 100 µm'lik çatlak görüntüsü, b) 1 ay sonunda iyileştirilmiş çatlağın görüntüsü, c) Çatlağın 1 ay önceki mikroskop altındaki görüntüsü, d) 1 ay sonunda iyileştirilmiş çatlağın mikroskop altındaki görüntüsü



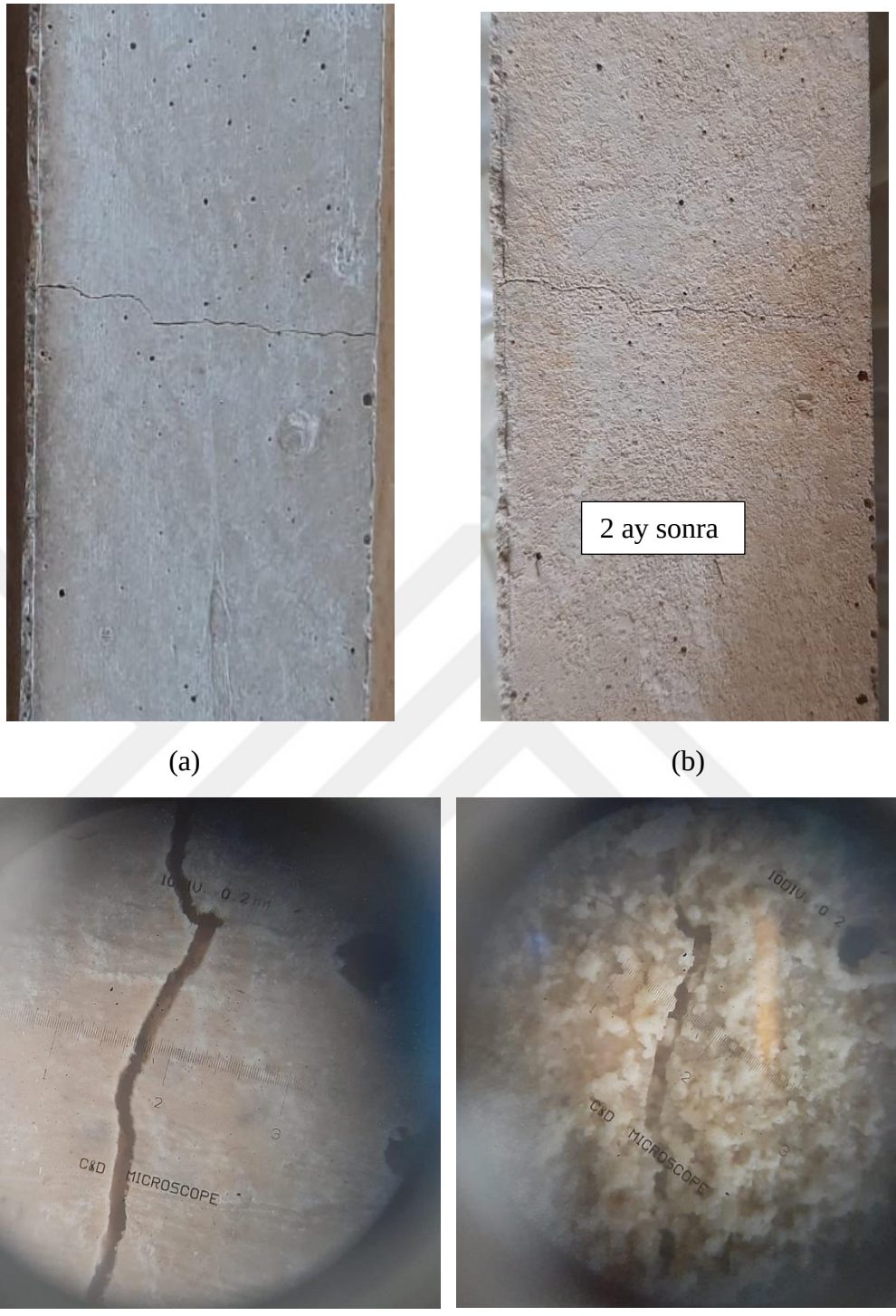
Şekil 4.7: a) Sprey yöntemi ile iyileştirilecek M grubun 1. numunesinin 200 µm'lik çatlak görüntüsü, b) 2 ay sonunda iyileştirilmiş çatlağın görüntüsü, c) Çatlağın 2 ay önceki mikroskop altındaki görüntüsü, d) 2 ay sonunda iyileştirilmiş çatlağın mikroskop altındaki görüntüsü



(a) (b)

(c) (d)

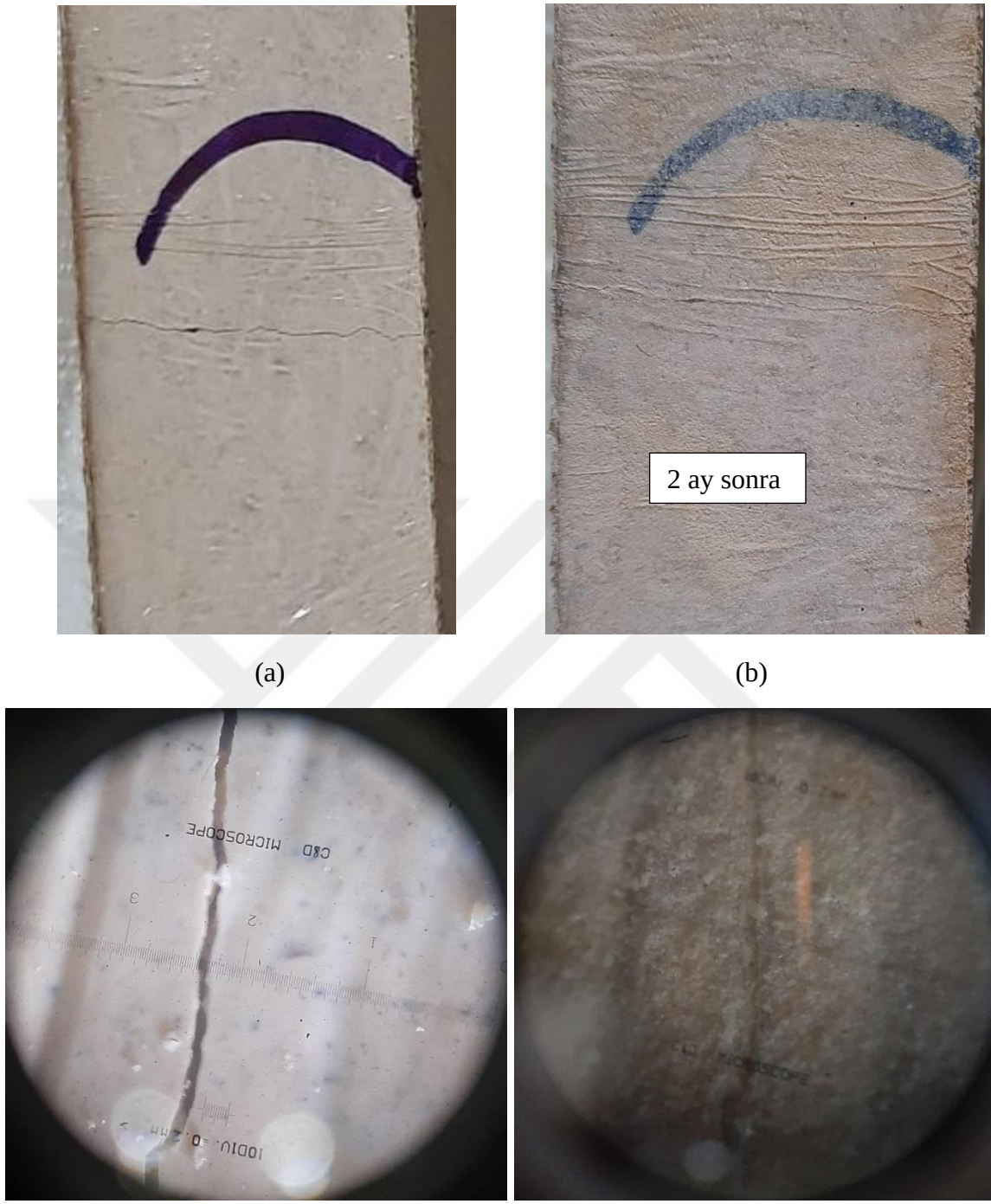
Şekil 4.8: a) Batırma yöntemi ile iyileştirilecek olan M grubun 2. numunesinin 300 µm'lik çatlak görüntüsü, b) 2 ay sonunda iyileştirilmiş çatlağın görüntüsü, c) Çatlağın 2 ay önceki mikroskop altındaki görüntüsü, d) 2 ay sonunda iyileştirilmiş çatlağın mikroskop altındaki görüntüsü



(a) (b)

(c) (d)

Şekil 4.9: a) Batırma yöntemi ile iyileştirilecek olan M grubun 3. numunesinin 120 µm'lik çatlak görüntüsü, b) 2 ay sonunda iyileştirilmiş çatlağın görüntüsü, c) Çatlağın 2 ay önceki mikroskop altındaki görüntüsü, d) 2 ay sonunda iyileştirilmiş çatlağın mikroskop altındaki görüntüsü



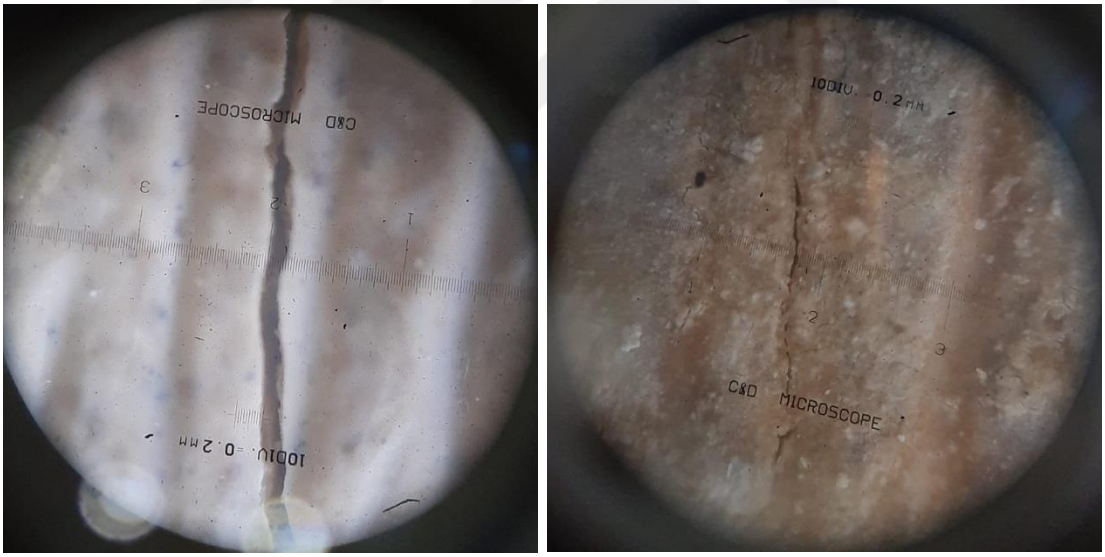
(a) (b)

(c) (d)

Şekil 4.10: a) Batırma yöntemi ile iyileştirilecek olan M grubun 4. numunesinin 100 µm'lik çatlak görüntüsü, b) 2 ay sonunda iyileştirilmiş çatlağın görüntüsü, c) Çatlağın 2 ay önceki mikroskop altındaki görüntüsü, d) 2 ay sonunda iyileştirilmiş çatlağın mikroskop altındaki görüntüsü

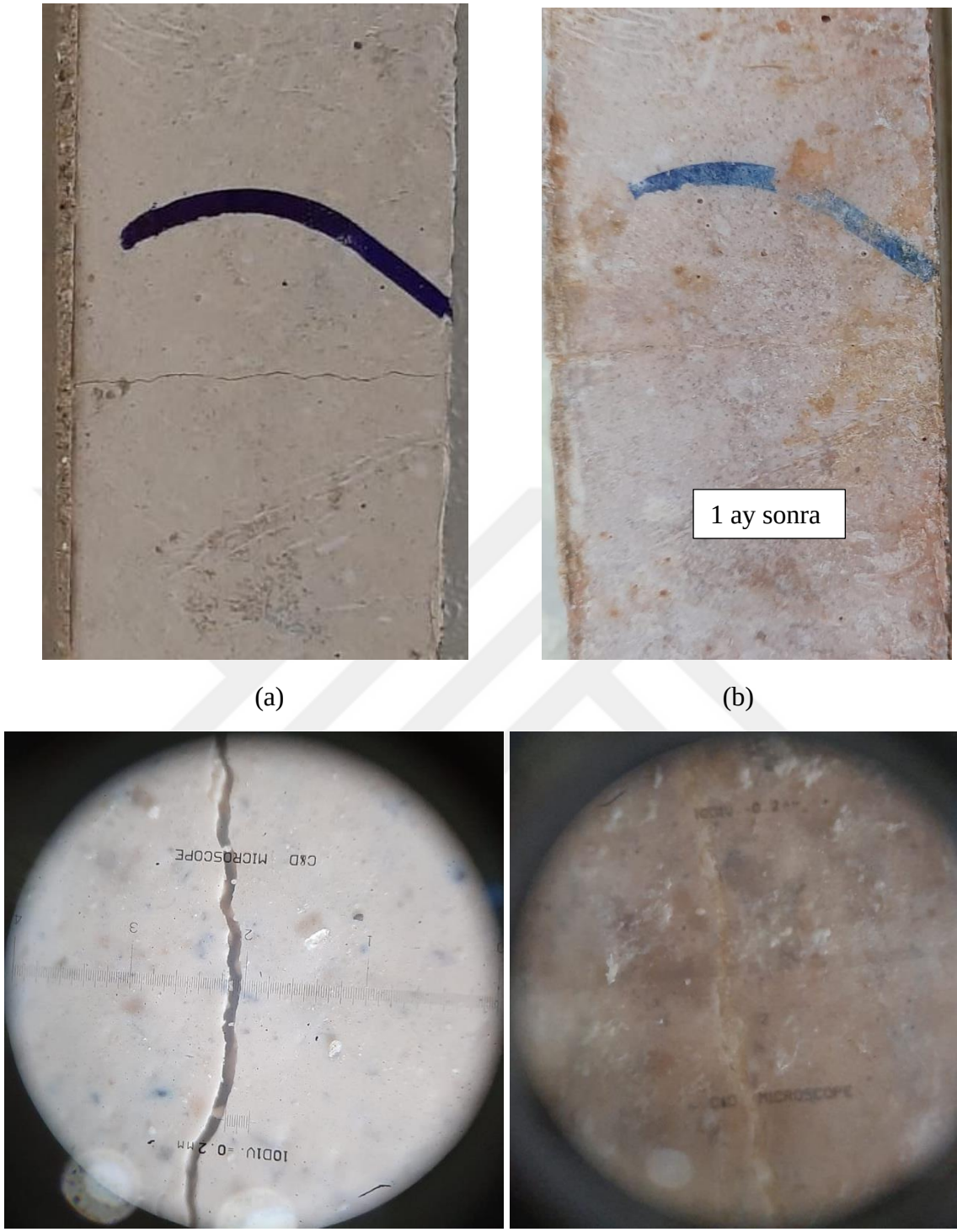


(a) (b)



(c) (d)

Şekil 4.11: a) Enjeksiyon yöntemi ile iyileştirilecek olan M grubun 5. numunesinin 100 µm'lik çatlak görüntüsü, b) 1 ay sonunda iyileştirilmiş çatlağın görüntüsü, c) Çatlağın 1 ay önceki mikroskop altındaki görüntüsü, d) 1 ay sonunda iyileştirilmiş çatlağın mikroskop altındaki görüntüsü



Şekil 4.12: a) Enjeksiyon yöntemi ile iyileştirilecek olan M grubun 6. numunesinin 100 µm'lik çatlak görüntüsü, b) 1 ay sonunda iyileştirilmiş çatlağın görüntüsü, c) Çatlağın 1 ay önceki mikroskop altındaki görüntüsü, d) 1 ay sonunda iyileştirilmiş çatlağın mikroskop altındaki görüntüsü



(a) (b)

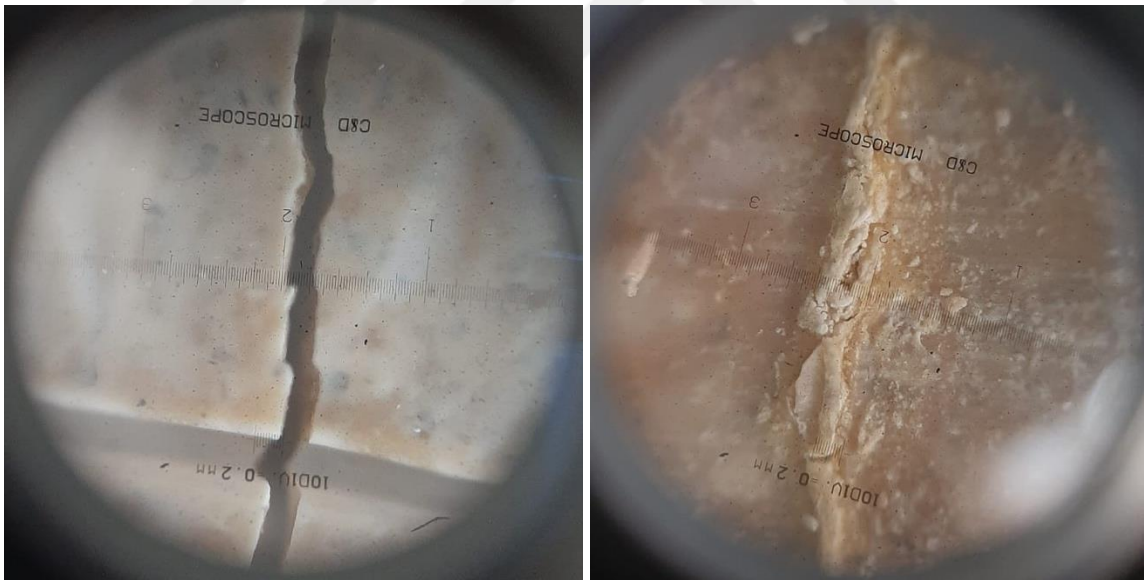


(c) (d)

Şekil 4.13: a) Enjeksiyon yöntemi ile iyileştirilecek olan M grubun 7. numunesinin 100 µm'lik çatlak görüntüsü, b) 1 ay sonunda iyileştirilmiş çatlağın görüntüsü, c) Çatlağın 1 ay önceki mikroskop altındaki görüntüsü, d) 1 ay sonunda iyileştirilmiş çatlağın mikroskop altındaki görüntüsü

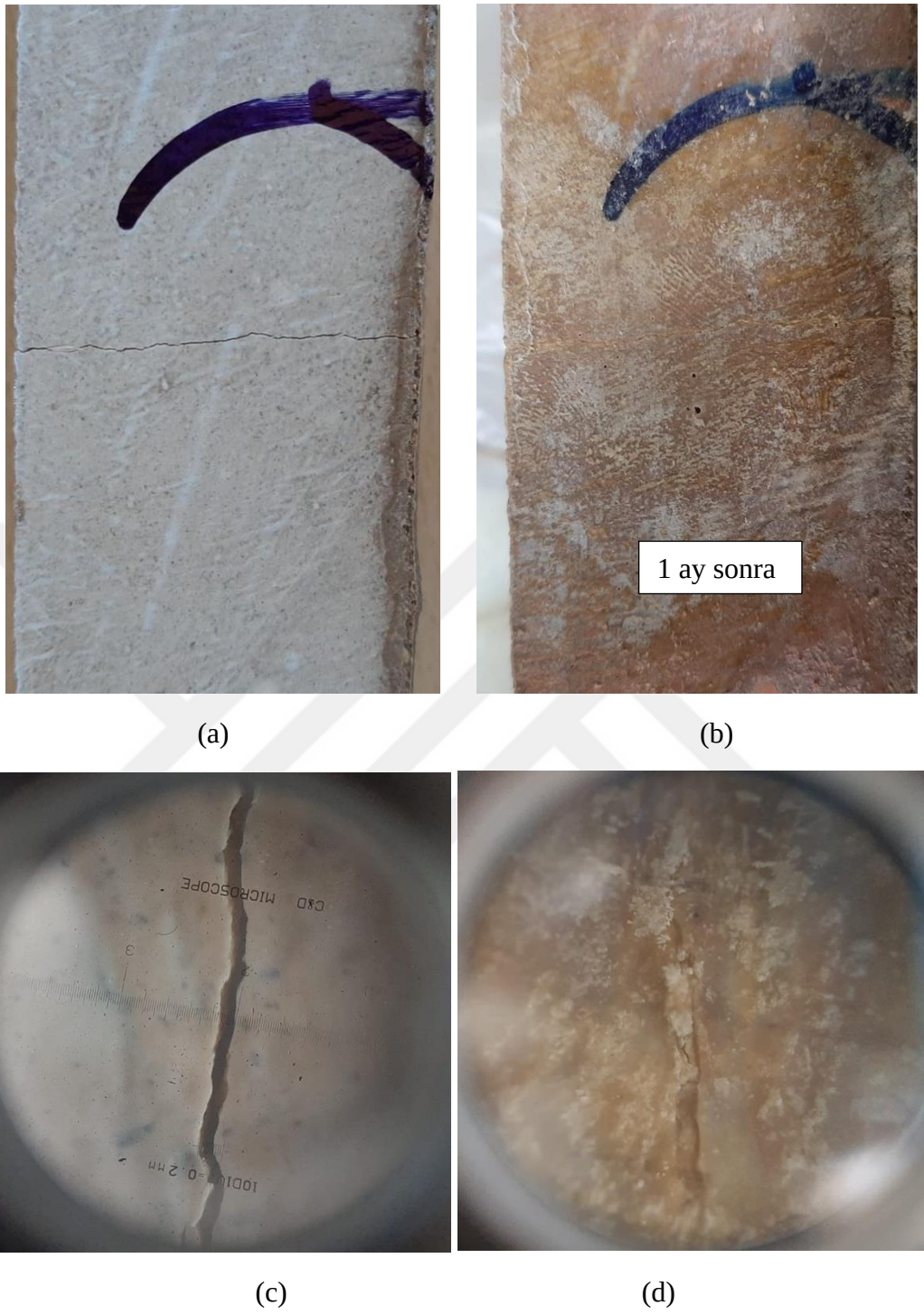


(a) (b)

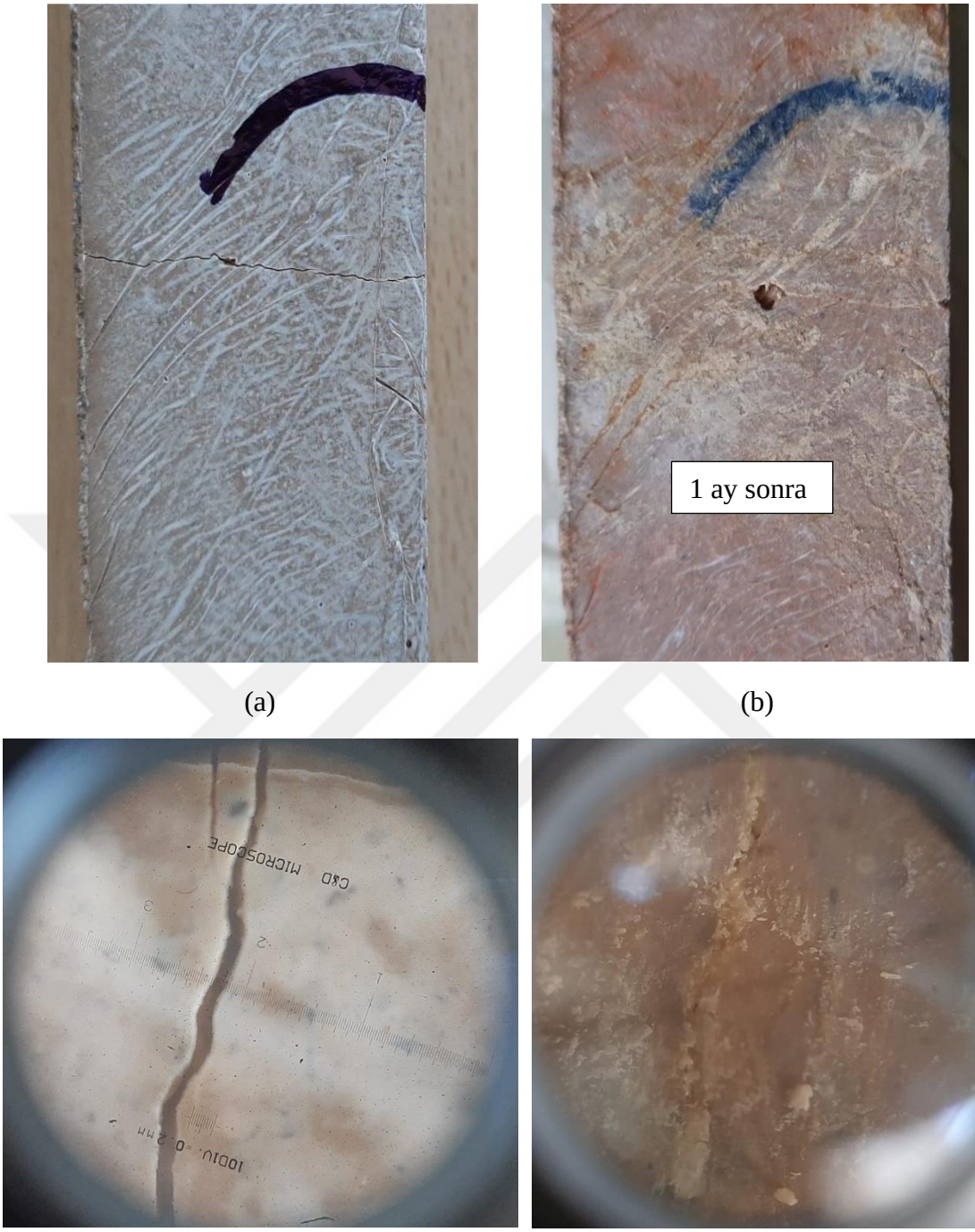


(c) (d)

Şekil 4.14: a) Enjeksiyon yöntemi ile iyileştirilecek M grubun 8. numunesinin 200 µm'lik çatlak görüntüsü, b) 1 ay sonunda iyileştirilmiş çatlağın görüntüsü, c) Çatlağın 1 ay önceki mikroskop altındaki görüntüsü, d) 1 sonunda içinde iyileştirilmiş çatlağın mikroskop altındaki görüntüsü



Şekil 4.15: a) Enjeksiyon yöntemi ile iyileştirilecek M grubun 9. numunesinin 150 µm'lik çatlak görüntüsü, b) 1 ay sonunda iyileştirilmiş çatlağın görüntüsü, c) Çatlağın 1 ay önceki mikroskop altındaki görüntüsü, d) 1 ay sonunda iyileştirilmiş çatlağın mikroskop altındaki görüntüsü



Şekil 4.16: a) Enjeksiyon yöntemi ile iyileştirilecek olan H grubun 1. numunesinin 100 µm'lik çatlak görüntüsü, b) 1 ay sonunda iyileştirilmiş çatlağın görüntüsü, c) Çatlağın 1 ay önceki mikroskop altındaki görüntüsü, d) 1 ay sonunda iyileştirilmiş çatlağın mikroskop altındaki görüntüsü

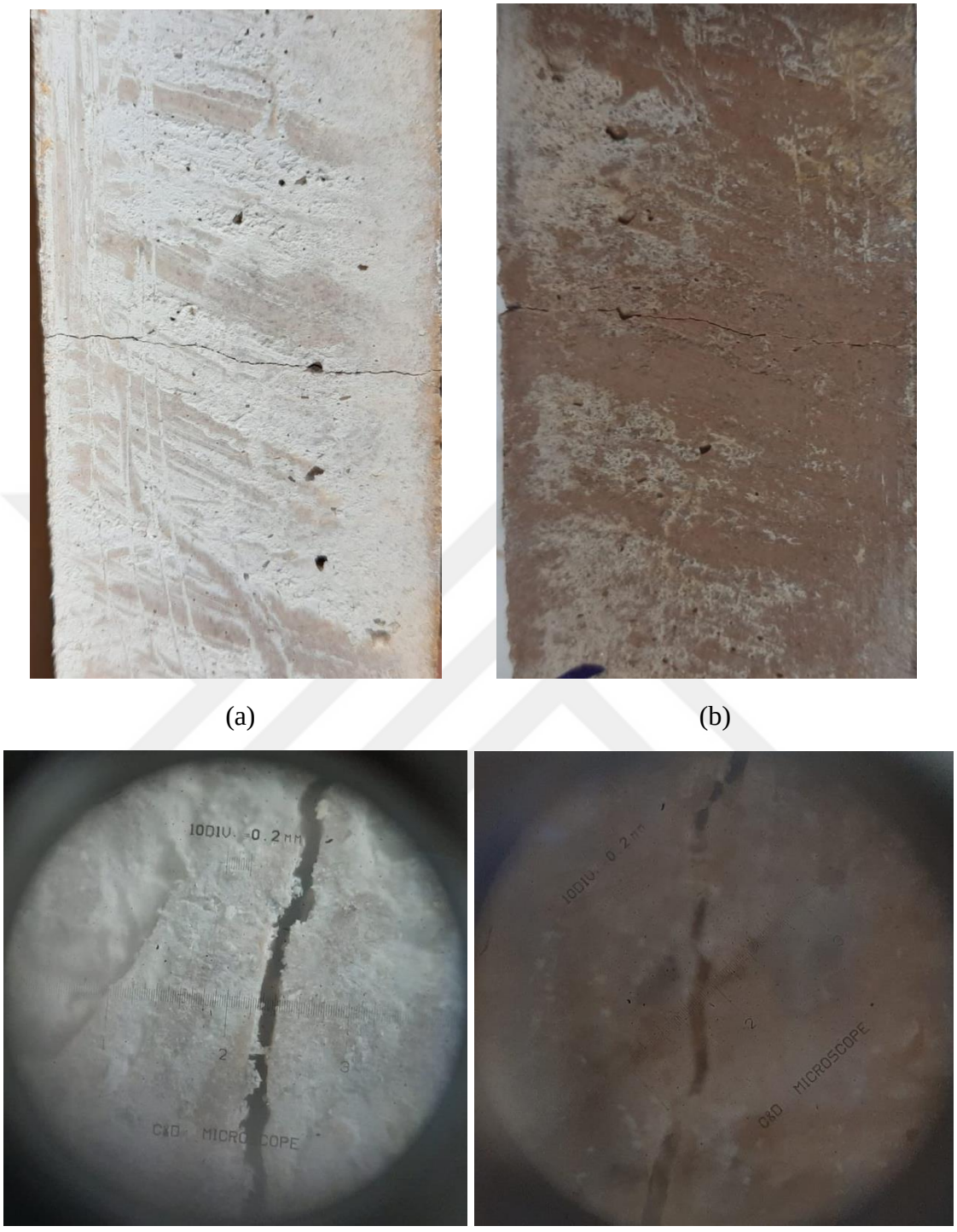


(a) (b)

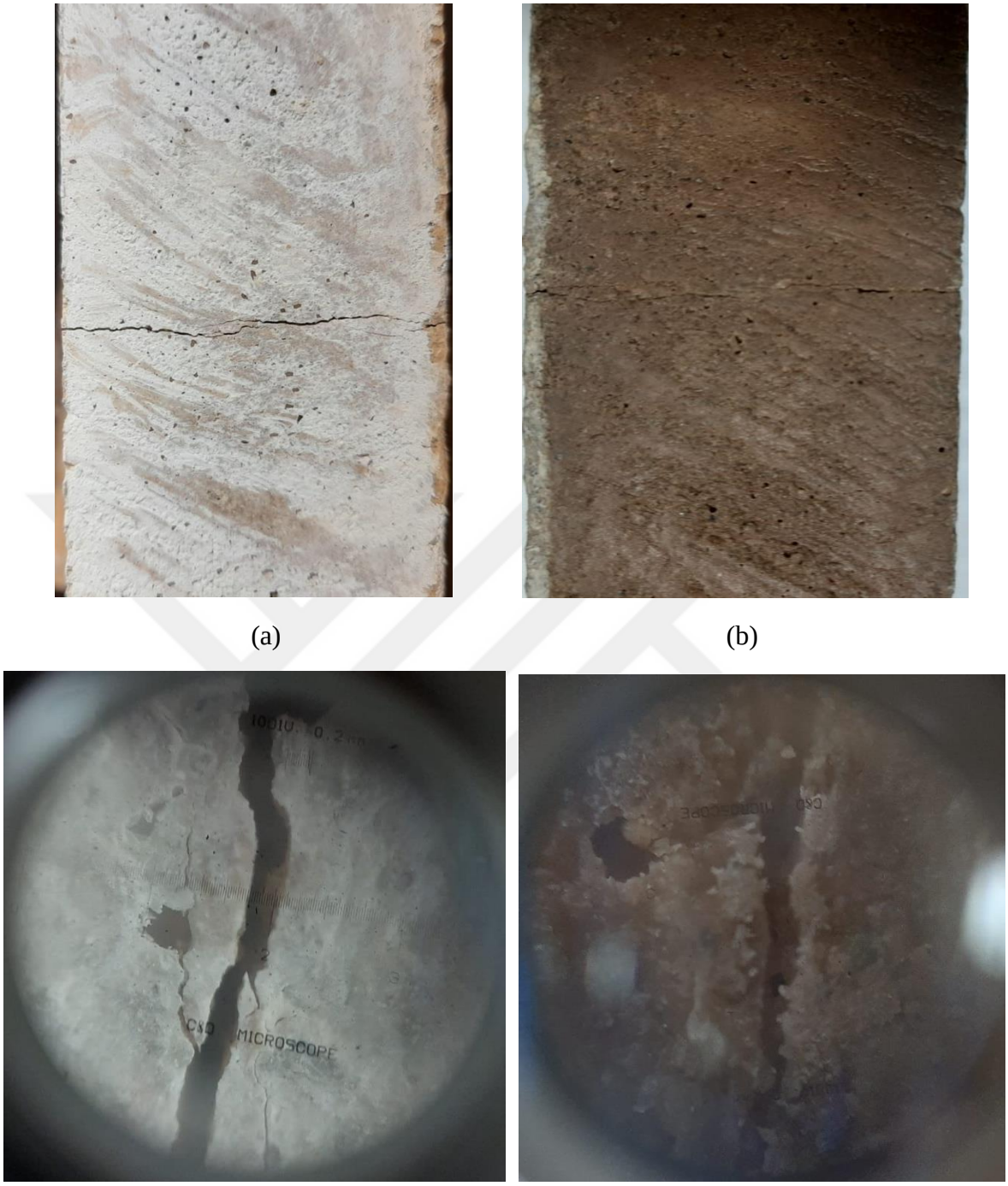


(c) (d)

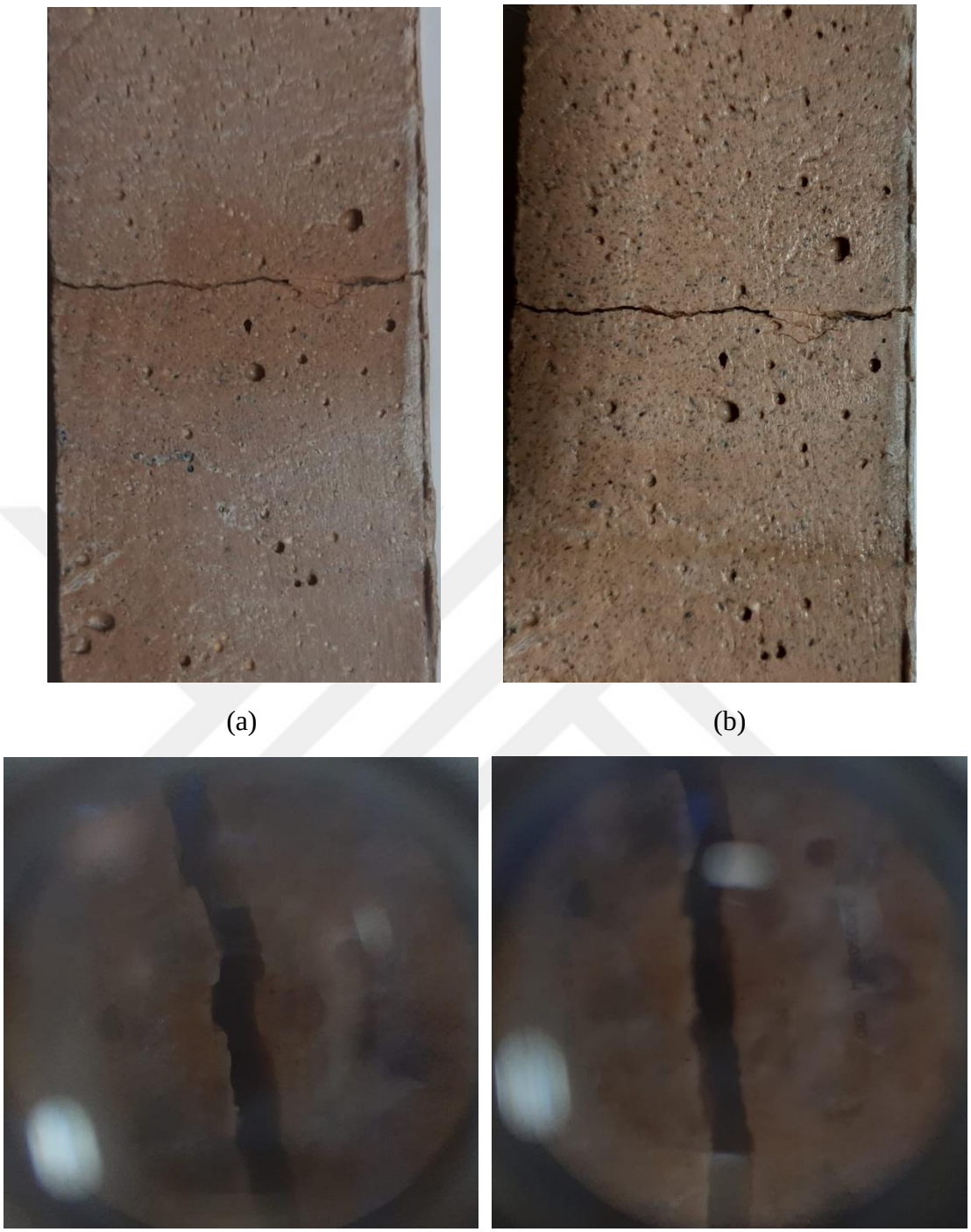
Şekil 4.17: a) Enjeksiyon yöntemi ile iyileştirilecek olan H grubun 2. numunesinin 200 µm'lik çatlak görüntüsü, b) 1 ay sonunda iyileştirilmiş çatlağın görüntüsü, c) Çatlağın 1 ay önceki mikroskop altındaki görüntüsü, d) 1 ay sonunda iyileştirilmiş çatlağın mikroskop altındaki görüntüsü



Şekil 4.18: a) Sprey yöntemi ile iyileştirilecek olan H grubun 3. numunesinin 120 µm'lik çatlak görüntüsü, b) 2 ay sonunda iyileştirilmiş çatlağın görüntüsü, c) Çatlağın 2 ay önceki mikroskop altındaki görüntüsü, d) 2 ay sonunda iyileştirilmiş çatlağın mikroskop altındaki görüntüsü



Şekil 4.19: a) Batırma yöntemi ile iyileştirilecek olan H grubun 4. numunesinin 200 µm'lik çatlak görüntüsü, b) 2 ay sonunda iyileştirilmiş çatlağın görüntüsü, c) Çatlağın 2 ay önceki mikroskop altındaki görüntüsü, d) 2 ay sonunda iyileştirilmiş çatlağın mikroskop altındaki görüntüsü



(a) (b)

(c) (d)

Şekil 4.20: a) Kontrol (C) numunenin 250 µm'lik çatlak görüntüsü, b) 2 ay sonunda iyileştirilmiş çatlağın görüntüsü, c) Çatlağın 2 ay önceki mikroskop altındaki görüntüsü, d) 2 ay sonunda iyileştirilmiş çatlağın mikroskop altındaki görüntüsü

Çatlak iyileşmesinde ilk önce periyodik olarak spreyleme metodu kullanılmıştır. Fakat spreyleme metodu ile numunelerin iyileşmesinin 2 aylık periyotta çok az olduğu görülmüştür. Bu nedenle B planına geçilmiştir. B planında enjeksiyon (enjektör ile bakterisiz besiyeri veya bakterili besiyerinin çatlağa uygulanması) ve batırma (numuneleri bakterisiz besiyeri veya

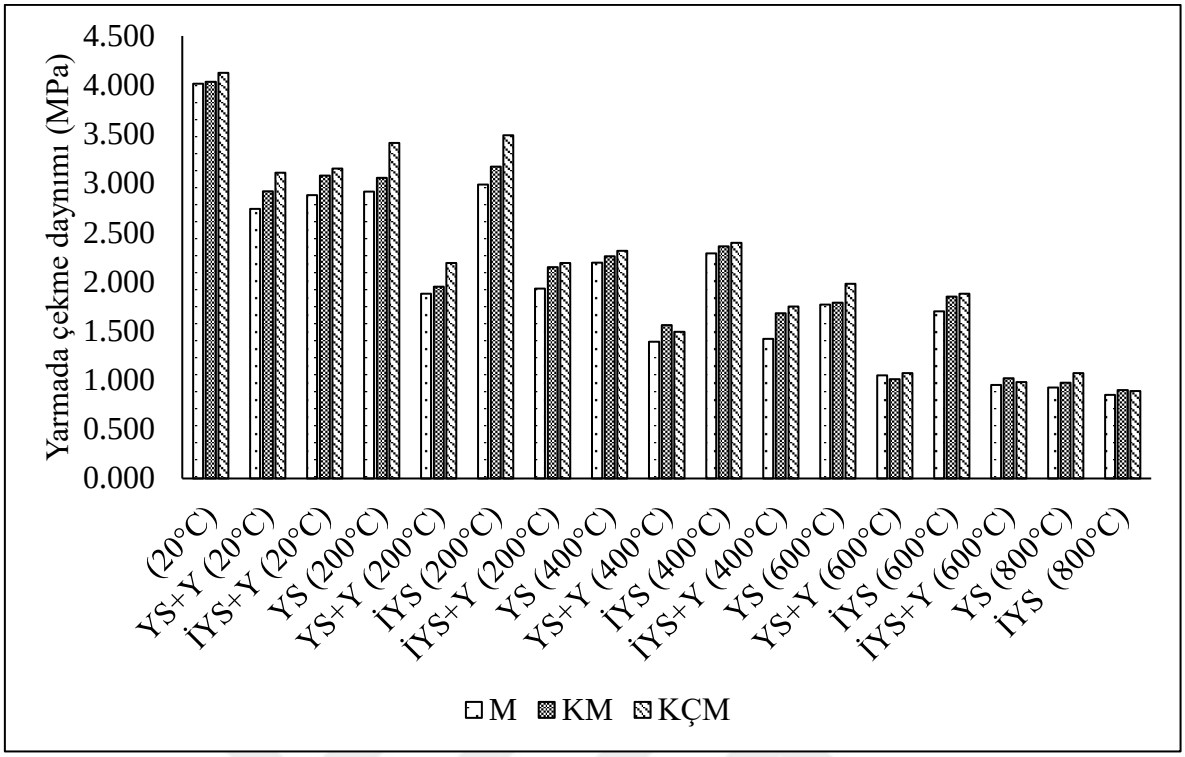
bakterili besiyeri bulunan bir kap içinde bekletilmesi) yöntemleri seçilerek çatlak iyileştirilmesi periyodik olarak yapılmıştır. Karşılaştırma yapılabilmesi için bütün fotoğraflar beraber verilmiştir. Yukarıda verilen çatlak fotoğraflarında görülebileceği gibi enjeksiyon yöntemi diğer iki yönteme göre çok başarılı şekilde 1 ay içinde %100' e yakın çatlak onarımı yapmıştır. Ayrıca Z ve M numuneler karılaştırılacak olursa M numunelerin daha yüksek oranda çatlakları onarılabildiği görülmektedir. Bakterisiz besiyerine batırılan K numunesi incelendiğinde 2 ay sonra çatlakta hiçbir değişimin olmadığı görülmüştür. Böylece bakterili numunelerin bakteri ile çatlağı onardığı sonucuna varılmıştır. Çalışmada enjeksiyon yöntemi spreyleme metoduna göre çok daha yüksek oranda çatlak onardığı ve kısa sürede bu onarma işlemini gerçekleştirdiği için projenin bundan sonraki yüksek sıcaklık deneyinin numunelerinde iyileştirme yöntemi olarak enjeksiyon yöntemi kullanılmıştır.

4.2. YÜKSEK SICAKLIK DENEYİN BULGULARI

4.2.1. Yarmada Çekme Deneyin Sonuçları

İlk olarak, 20°C sıcaklığına maruz kalan Ø100x50 mm ebatlarındaki M, KM ve KÇM geopolimer beton numunelerin yarma çekme dayanımları bulunmuştur. Daha sonra 200°C, 400°C, 600°C ve 800°C sıcaklıklarına maruz kalan numunelerin yarısı yarmada çekme testine tabi tutulmuştur. Daha sonra yüksek sıcaklık etkisine maruz kalan numunelerin diğer yarısına taşıyabileceği maksimum yükün %70'i uygulanarak numunelerde ek çatlaklar oluşturulmuştur. 800°C sıcaklığına maruz kalan numunelerin çatlakları büyük olduğu için numunelerde ek çatlak oluşturulamamıştır. Böylece iki farklı şekilde çatlamış iki grup oluşturulmuş ve bu iki gruba yarmada çekme dayanımları bulunmuştur. Son olarak, iyileştirilmiş numunelerin yarma çekme dayanımları elde edilmiştir.

Özetle, yüksek sıcaklık çatlakları (YS) olan numuneler, yüksek sıcaklık çatlakları ve yarmada çekme çatlakları (YS+Y) içeren numuneler, iyileştirilmiş yüksek sıcaklık çatlakları (İYS) olan numuneler ve iyileştirilmiş yüksek sıcaklık çatlakları ve yarmada çekme çatlakları (H) olan numuneleri yarmada çekme testine tabi tutulmuştur. Şekil 4.21'de iyileştirilmiş ve iyileştirilmemiş numunelerin yarmada çekme dayanımları gösterilmiştir. Genel olarak, yüksek sıcaklığının artmasıyla birlikte geopolimer beton numunelerin yarmada çekme dayanımı azalmıştır. (Gambo ve diğ., 2020) tarafından yapılan çalışmada, yüksek sıcaklık etkisinden dolayı oluşan dayanım kaybı, agregaları birbirine bağlayan alkali malzemelerin kısmi ayrışmasından kaynaklanabileceğini vurgulanmıştır.

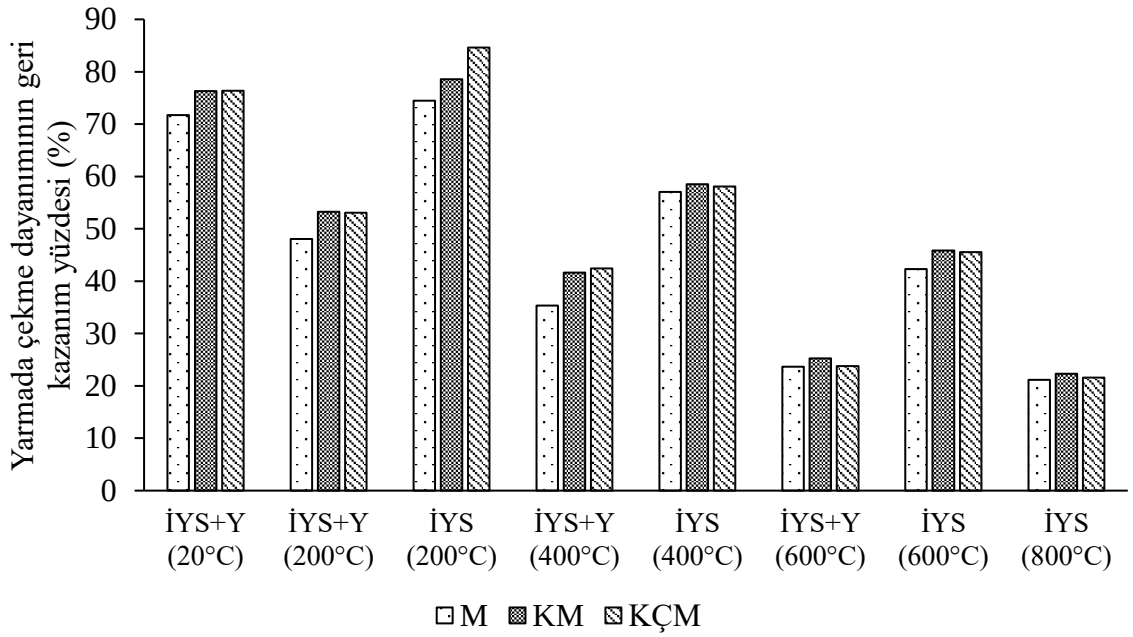


Şekil 4.21: İyileştirilmiş ve iyileştirilmemiş numunelerin yarmada çekme dayanımları.

İyileştirilmiş geopolimer beton numunelerinin yarmada çekme dayanımının geri kazanım yüzdeleri, malzeme ve yöntem bölümünde verilen formül (2)'i kullanılarak hesaplanmıştır. İyileştirilmiş numunelerin yarmada çekme dayanımının geri kazanım yüzdeleri Şekil 4.22'de gösterilmektedir. Şekil 4.22'den görüldüğü gibi M (İYS+Y), KM (İYS+Y), KÇM (İYS+Y), M (İYS), KM (İYS), ve KÇM (İYS) numunelerinin yarmada çekme dayanımının geri kazanım yüzdeleri %84.60 ile %21.17 arasında değişmektedir. Numunelerin yarmada çekme dayanımlarının en yüksek geri kazanım yüzdesi, 200°C sıcaklığına maruz kalan İYS numunelerinde görülmüştür. Ayrıca, numunelerin yarmada çekme dayanımlarının en düşük geri kazanım yüzdesi, 800°C sıcaklığına maruz kalan İYS numunelerinde görülmüştür. Bunun nedeni, 200°C sıcaklığına maruz kalan numunelerin çatlakları 50 µm'den küçük ve 800°C sıcaklığına maruz kalan numunelerin çatlaklarının 400 µm'den büyük olmasıdır. Bir önceki çalışmada (Karthik ve Rao, 2016), bakteri ile yapılan iyileştirmenin küçük çatlaklarda daha etkili olduğu belirtilmiştir. (Talaiekhozani ve Abd Majid, 2014), 100-200 µm genişlikli çatlaklarının etkin bir şekilde iyileşebildiğini tespit edilmiştir. Başka bir çalışmada (Van Tittelboom ve De Belie, 2013), 5-300 µm genişliğindeki çatlakların bakteri kullanılarak iyileştirilebileceğini bildirilmiştir. Ayrıca, (Qian ve diğ., 2015), 400 µm'nin altındaki çatlakların neredeyse tamamen kapandığı ve çatlak genişliğinin iyileşme verimliliğini önemli ölçüde

etkilediği sonucuna varmıştır. (Luo ve diğ., 2015) ise, 800 µm üzerindeki çatlakları iyileştirmesinin zor olduğu bulmuştur.

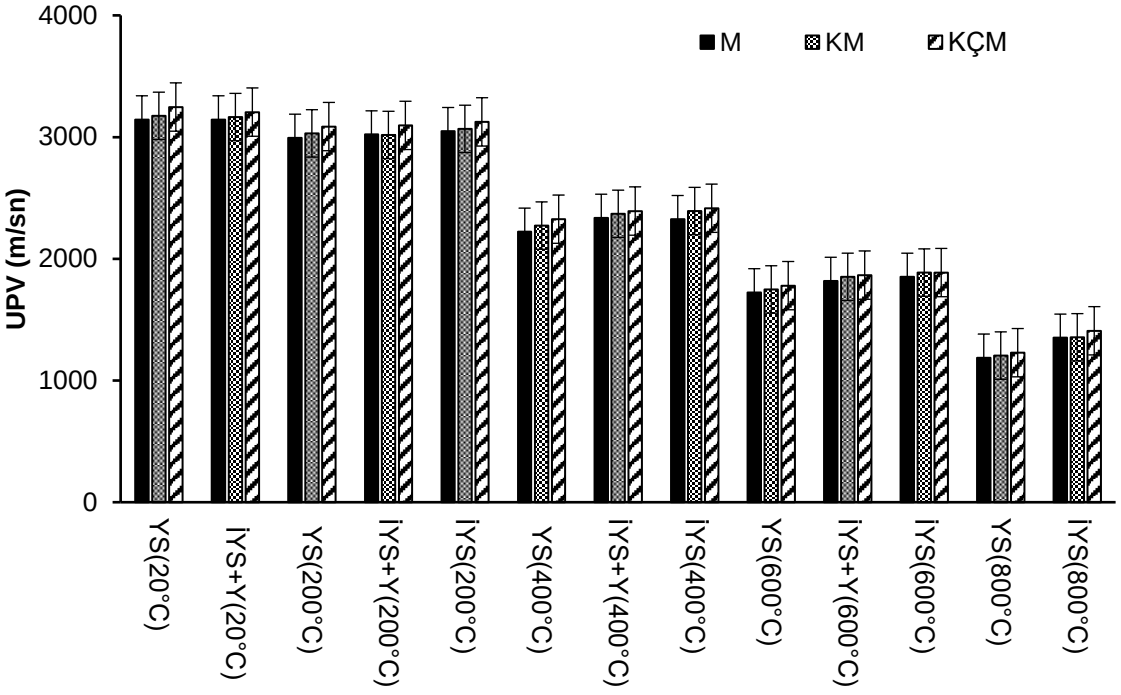
Ayrıca bu çalışmada, KM ve KÇM numunelerinin kalsiyum içeriği M numunelerine göre daha yüksek olduğu için KM ve KÇM numunelerinin yarmada çekme dayanımının geri kazanım yüzdesinin daha yüksek olduğu bulunmuştur. Daha önceki çalışmalarda (De Muynck ve diğ., 2008, Van Tittelboom ve diğ., 2010), iyileşme sürecinde kullanılan kalsiyum kaynağı ve miktarı, $CaCO_3$ çökelme miktarı ve bakteri morfolojisi üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu bildirilmiştir.



Şekil 4.22: İyileştirilmiş geopolimer beton numunelerinin yarmada çekme dayanımının geri kazanım yüzdeleri.

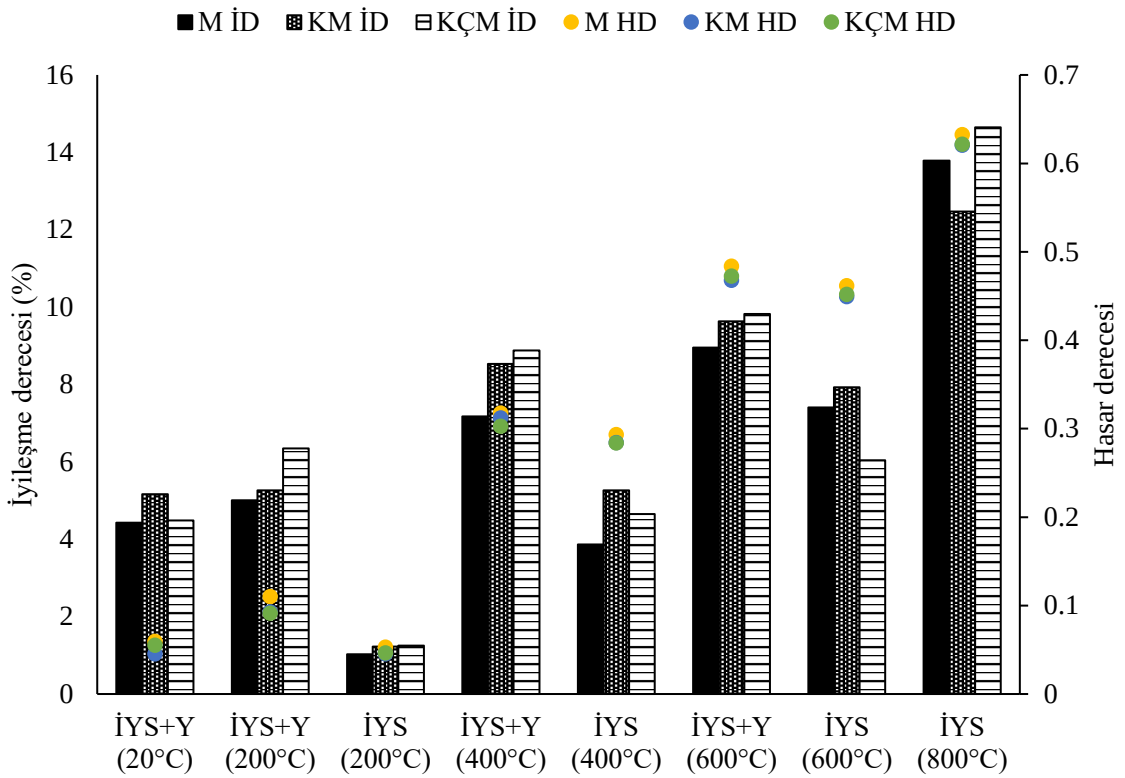
4.2.2. Ultrasonik Ses Geçirgenliği

20°, 200°C, 400°C, 600°C ve 800°C sıcaklıklarına maruz kalan M, KM ve KÇM beton geopolimer numunelerinin üzerine ultrasonik geçiş hızı (UPV) testi gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.23'te yüksek sıcaklığa maruz kalan numunelerin ultrasonik ses geçirgenliği değerleri verilmiştir.



Şekil 4.23: Yüksek sıcaklık etkilerine maruz kalan numunelerin UPV değerleri.

Şekil 4.23'ten görüldüğü gibi, yüksek sıcaklık deneyine tabi tutulan M, KM ve KÇM numunelerinin UPV yüzde düşüşleri %62.83 ile %4.55 arasında değişmiştir. En yüksek UPV yüzde düşüşleri 800°C'ye maruz kalan numunelerde görülmüş ve en düşük düşüşler ise 200°C'ye maruz kalan numunelerde görülmüştür. Bir önceki çalışmada (Tammam ve diğ., 2021), yüksek sıcaklık etkilerinin artmasıyla birlikte geopolimer numunelerin çatlaklarını ve boşluklarını artmış ve dolayısıyla UPV düşüşlerinin arttırdığını görülmüştür. Genel olarak, KM ve KÇM numuneleri M numunelerine göre daha kompakt olduğundan, KM ve KÇM numunelerinin UPV düşüşleri M numunelerine göre daha düşük olmuştur. Ayrıca, M (İYS+Y), KM (İYS+Y), KÇM (İYS+Y), M (İYS), KM (İYS) ve KÇM (İYS) numunelerinin UPV testi yapılmıştır. Böylece, çatlaklı numuneler ve iyileştirilmiş numunelerin UPV değerlerini kullanarak numunelerin hasar dereceleri ve iyileşme dereceleri hesaplanmıştır. İyileşen numunelerin iyileşme dereceleri %1.03 ile %14.64 arasında değiştiğini bulunmuştur. Hasar dereceleri ise 0.045 ile 0.632 arasında değiştiğini kaydedilmiştir. İyileşmiş geopolimer beton numunelerinin iyileşme ve hasar dereceleri Şekil 4.24'te gösterilmektedir.

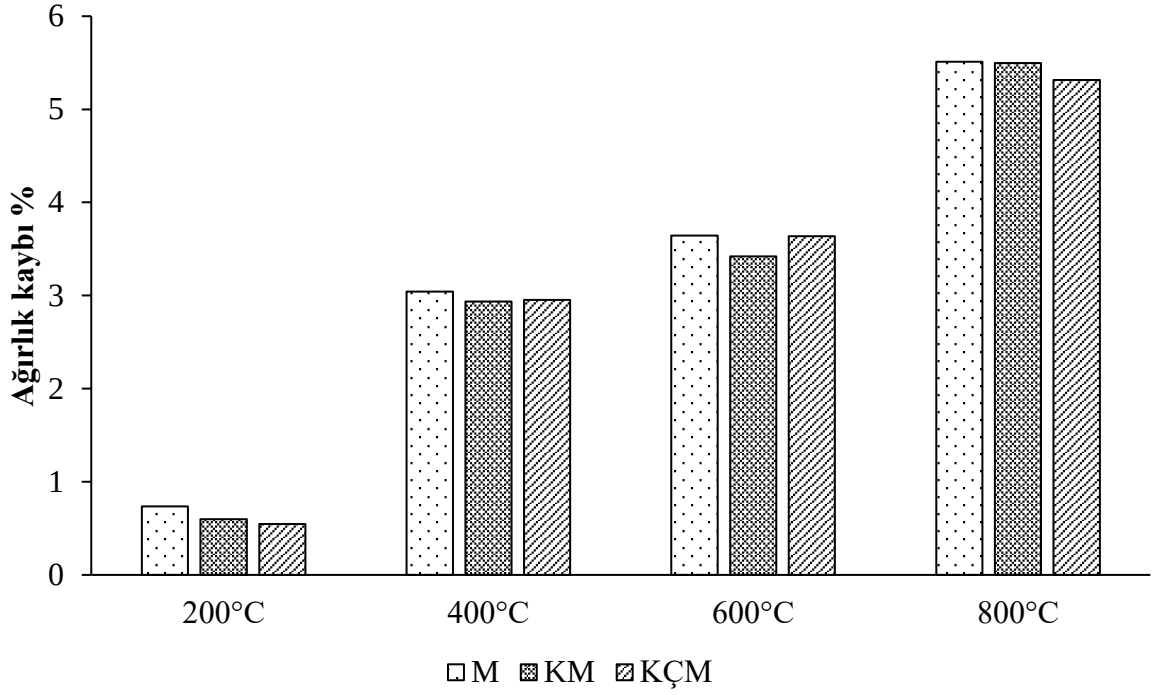


Şekil 4.24: Geopolimer beton numunelerinin iyileşme ve hasar dereceleri.

Yüksek sıcaklığın artmasıyla çatlakların sayısı ve genişliği artmıştır. Yüksek sıcaklık etkilerinin artması, iyileşme derecesini artıran iyileştirilebilir çatlakların (400µm'den küçük çatlaklar) sayısını arttırmıştır. Diğer taraftan; yüksek sıcaklık etkilerinin artması, 400 µm'den büyük çatlakların sayısı artırmış ve hasar derecesinin artmasına neden olmuştur. Örneğin, 800°C'ye maruz kalan numunelerin hem iyileşebilen çatlaklar hem iyileşmesi zor olan çatlaklar içermektedir. Böylece 800°C'ye maruz kalan numunelerin hasar ve iyileşme derecelerinin diğer sıcaklıklara maruz kalan numunelere göre daha yüksek seviyede olduğunu bulunmuştur. (Singh ve Gupta, 2020) iyileştirdikleri numunelerin iyileşme derecesini araştırmak için UPV testini kullanmışlar ve numunelerin hasar derecesi arttıkça iyileşme derecesinin arttığını bulmuşlar. (Xu ve diğ., 2020) beton numunelerinde kendiliğinden iyileşmenin korozyon üzerindeki etkisini incelemişler ve hasar derecelerinin betonun iyileşme derecelerinden daha yüksek olduğu sonucuna varmışlar. Bu çalışmada, yüksek sıcaklık etkisinin artmasıyla birlikte numunelerin çatlakları artmış ve iyileşme derecesinin arttığını görülmüştür. Ancak 400°C'den sonra iyileşen numunelerin iyileşme derecesi hasar derecesine göre daha düşük olmuştur. Ayrıca, Şekil 4.24'te gösterildiği gibi en iyi iyileşme performansı İYS+Y (20°C) ile İYS+Y (400°C) arasındaki numunelerden elde edilmiştir.

4.2.3. Ağırlık Kaybı Sonuçları

Bu tez çalışmasında, tüm numunelerin ağırlık değişimleri incelenmiştir. Tüm numunelerin ağırlık değişimleri Şekil 4.25'te verilmiştir.

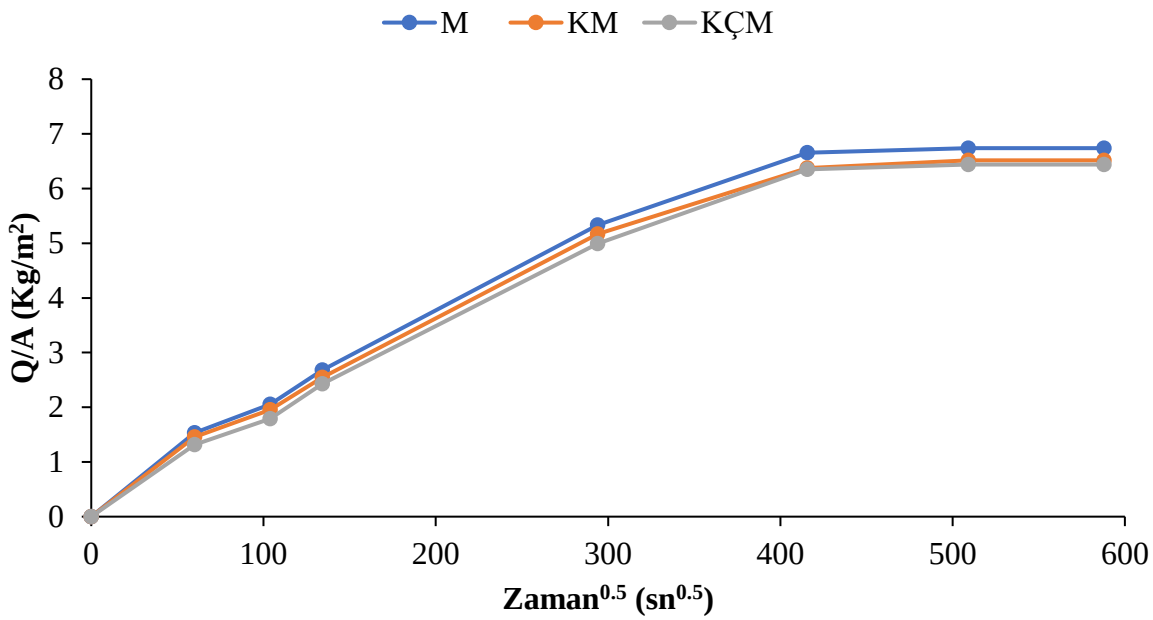


Şekil 4.25: Yüksek sıcaklık etkisine maruz kalan numunelerinin ağırlık kayıpları.

Genel olarak, yüksek sıcaklıkların artmasıyla birlikte numunelerinin ağırlıklarını azalmıştır. Daha önceki yapılan çalışmada (Celik ve diğ., 2018), yüksek sıcaklıklarının etkisinin altında kalan geopolimer numunelerinin ağırlıklarının düştüğünü görülmüştür. Bu tez çalışmasında elde edilen ağırlık değişiklikleri %0.546 ile %5.512 arasında değişmektedir. En yüksek ağırlık kaybı, 800°C'ye maruz kalan numunelerde olmuş ve en küçük ağırlık kaybı 200°C'ye maruz kalan numunelerde meydana gelmiştir. Ayrıca, K ve KÇ malzemeleri Mk esaslı geopolimer beton numunelerinin ağırlık değişimini azaltmıştır. Böylece, M serisine göre en düşük ağırlık değişimi sırasıyla KÇM ve KM serisinde olmuştur. Şekil 4.25, geopolimer beton numunelerinde yüksek sıcaklıkların neden olduğu ağırlık kayıplarını göstermektedir. Yüksek sıcaklığının artmasıyla birlikte oluşan ağırlık azalmasının nedeni, sıcaklık artışların dehidrasyon sürecini tetiklemesi ve nemin numunelerin yüzeyine kaçmasıdır. Dehidrasyon ve nemin azalması sonucunda numunelerin iç mikro yapısı bozulur ve ağırlık kaybı meydana gelir (Kong ve diğ., 2007a).

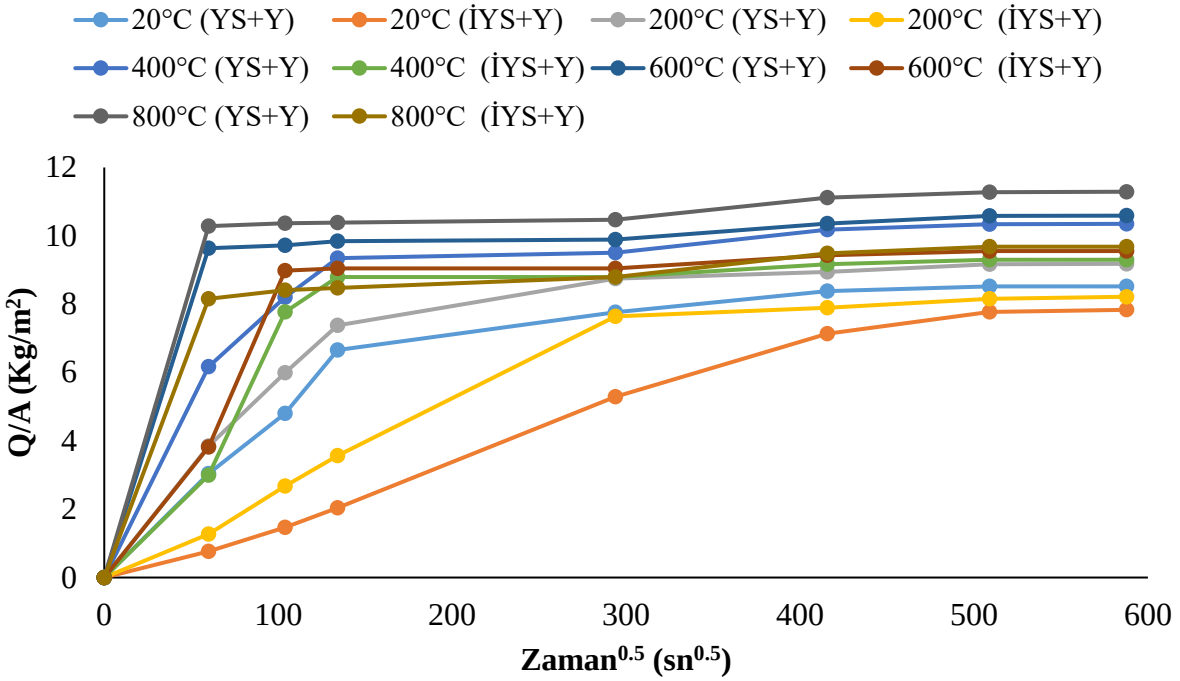
4.2.4. Kılcal Su Emme Testi Sonuçları

İlk olarak, M, KM ve KÇM numunelerinin kılcal su emme testi 28 gün sonra yapılmış ve bu testin sonuçları Şekil 4.26'da gösterilmektedir. Şekil 4.26'dan görüldüğü gibi en az su emen seriler sırasıyla KÇM ve KM serileridir. Ayrıca M serisi diğer serilere göre en fazla su emen seri olmuştur. KM ve KÇM numunelerinin M numunelerine göre daha kompakt ve daha az boşluğa sahip olduğunu görülmüştür. Bu bağlamda, K ve KÇ malzemelerinin geopolimer numunelerin matrisindeki boşlukları azalttığını göstermiştir.

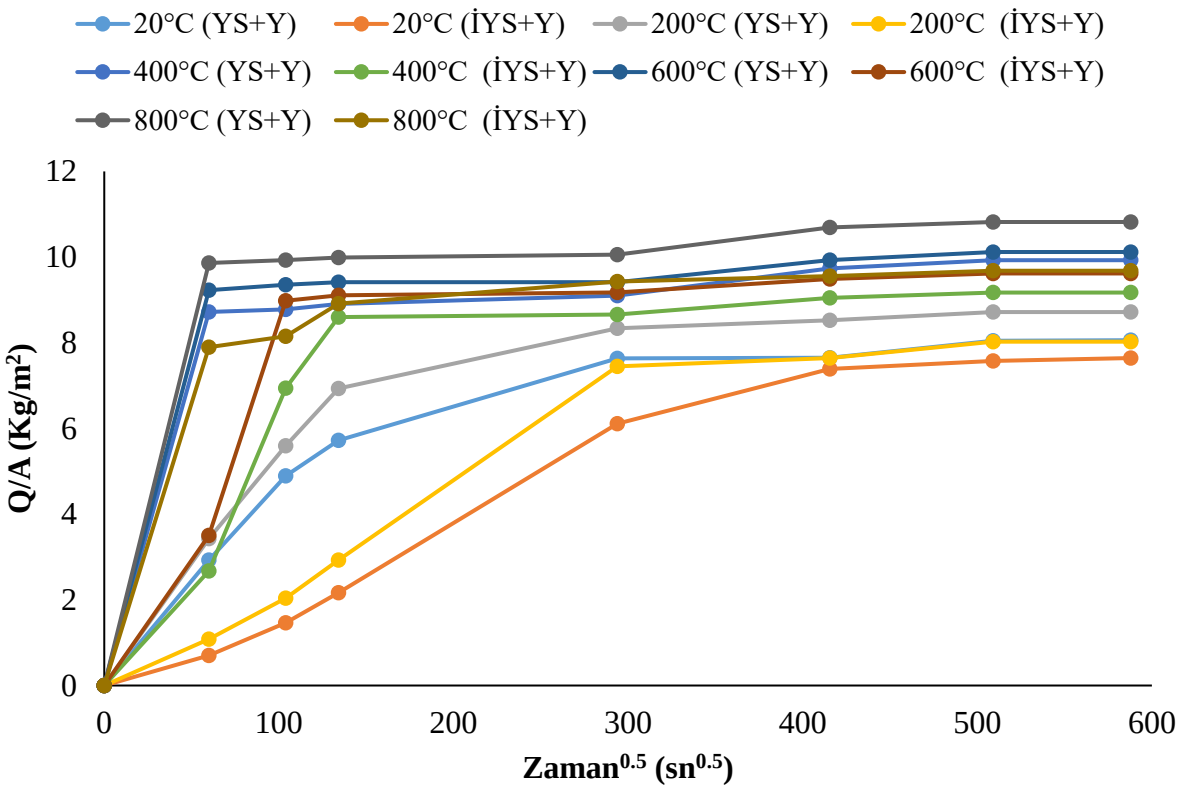


Şekil 4.26: 28 günlük geopolimer beton numunelerin kılcal su emme eğrileri.

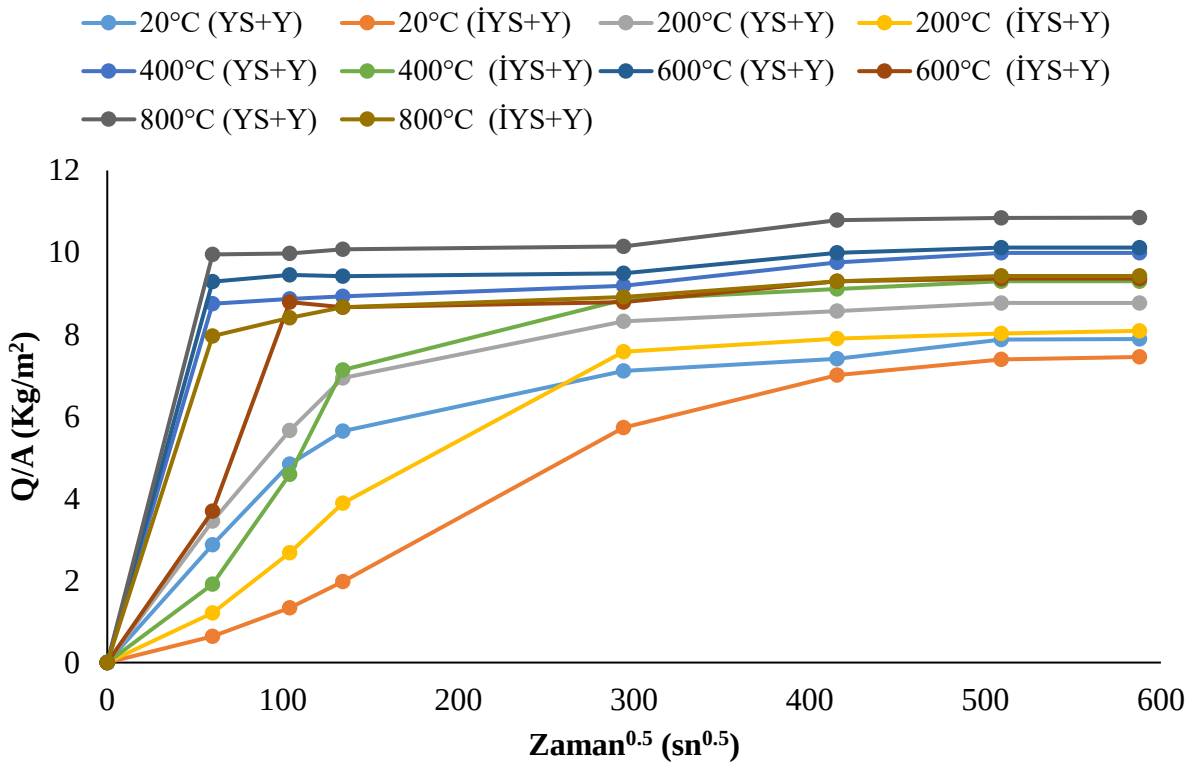
İkinci aşamada, çatlamış geopolimer numunelerin (YS+Y) emdikleri su miktarlarındaki değişiklikleri değerlendirmek için kılcal su emme testine tabi tutulmuştur. Ayrıca, iyileştirilmiş geopolimer numunelerinin (İYS+Y) çatlak kapanmasını ölçmek için su emme testine tabi tutulmuştur. Şekil 4.27'den şekil 4.29'a kadar yüksek sıcaklıklara maruz kalan M, KM ve KÇM geopolimer beton numunelerinin kılcal su emme eğrileri gösterilmektedir.



Şekil 4.27: Yüksek sıcaklıklara maruz kalan M (YS+Y) ve M (İYS+Y) numunelerinin kılcal su emme eğrileri.



Şekil 4.28: Yüksek sıcaklıklara maruz kalan KM (YS+Y) ve KM (İYS+Y) numunelerinin kılcal su emme eğrileri.

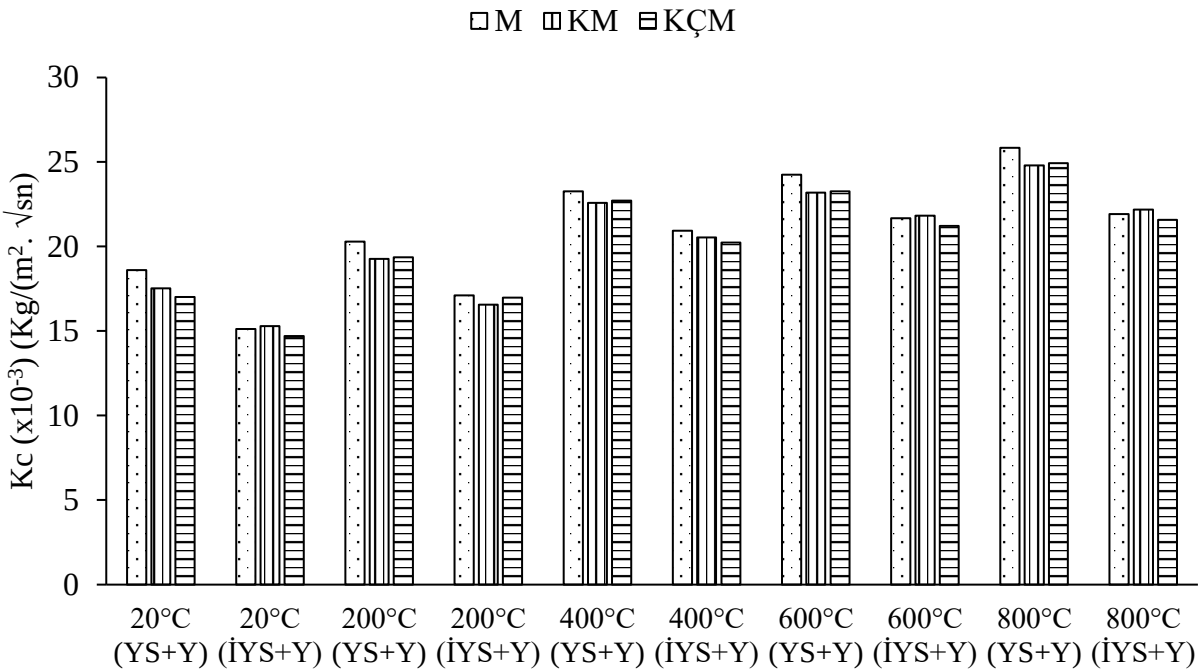


Şekil 4.29: Yüksek sıcaklıklara maruz kalan KÇM (YS+Y) ve KÇM (İYS+Y) numunelerinin kılcal su emme eğrileri.

Şekil 4.27,.4.28 ve 4.29, iyileştirme işleminden önce ve sonra M, KM ve KÇM geopolimer beton numunelerinin su emme kapasitelerini göstermiştir. Şekil 4.27,.4.28 ve 4.29'da gösterilen su emme eğrileri incelendiğinde iyileştirilmiş numunelerinin emdikleri su miktarının çatlaklı numunelere göre daha düşük olduğunu görülmüştür. (Xu ve diğ., 2018), mikrobiyal kalsiyum karbonat çökeltmesinin biyokimyasal mekanizmasını araştırmışlar. Yaptıkları deneylerin sonuçlarına göre, bakterili serilerin su emme katsayısı, referans numunelerin katsayısına kıyasla yaklaşık %27 oranında azalmıştır. Ayrıca, (Park ve Choi, 2018) çimento esaslı malzemelerde kendiliğinden iyileşen çatlakları incelemek için numunelere su emme testi uygulamışlar ve referans numunelerin en yüksek su emme oranına sahip olduğunu bulmuşlardır.

Şekil 4.27,.4.28 ve 4.29, farklı sıcaklıklara maruz kalan iyileştirilmiş numunelerin referanslarına göre daha az su emdiğini göstermektedir. Bakteriler, $CaCO_3$'ü çökelterek numunelerin çatlaklarının kapanmasına ve iyileşmesine neden olmuş ve dolaysıyla emilen suyu da azaltmıştır. Ayrıca sıcaklığının artışı çatlakların sayısını ve genişliğini artırmıştır. Dolayısıyla, yüksek sıcaklık derecelerindeki artış, zamanla emilen su miktarını arttırmıştır.

Ayrıca, şekil 4.30'da iyileştirilmemiş ve iyileştirilmiş numunelerin kılcal su emme katsayısını (Kc) göstermektedir.



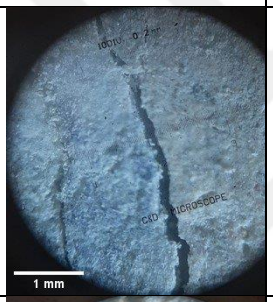
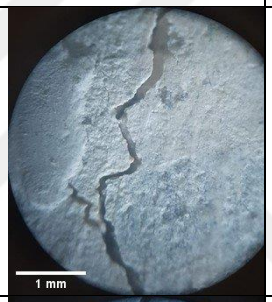
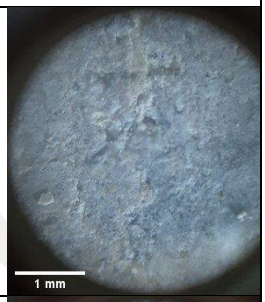
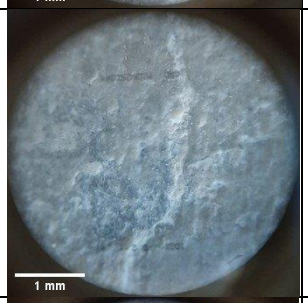
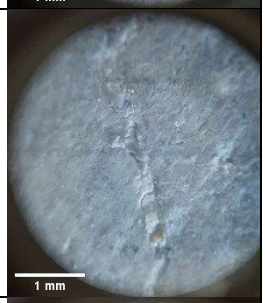
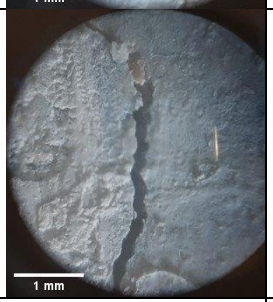
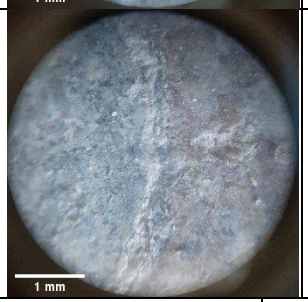
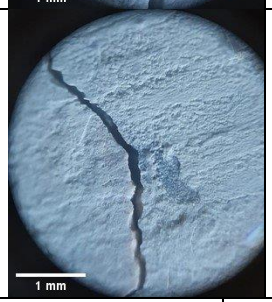
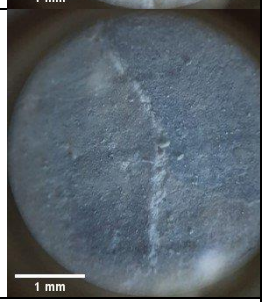
Şekil 4.30: İyileştirilmemiş ve iyileştirilmiş M, KM ve KÇM geopolimer numunelerin Kc değerleri.

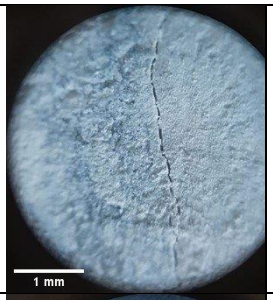
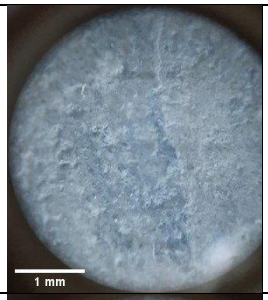
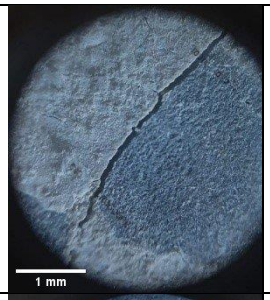
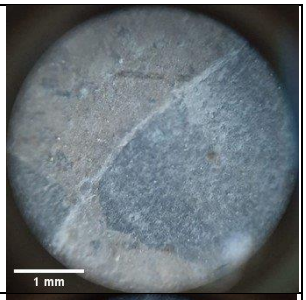
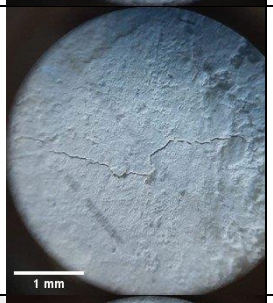
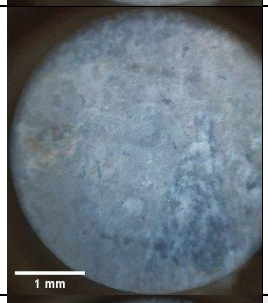
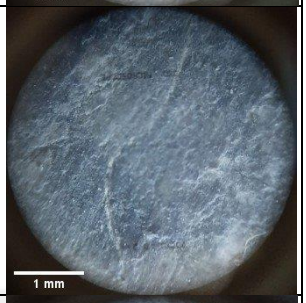
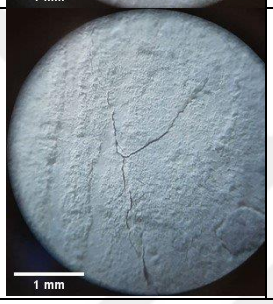
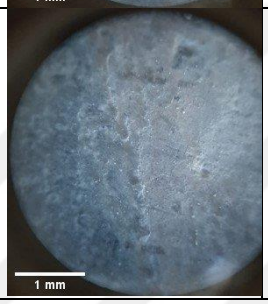
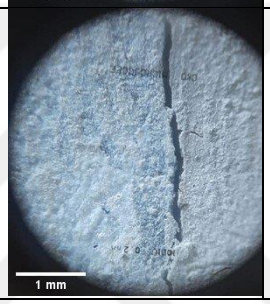
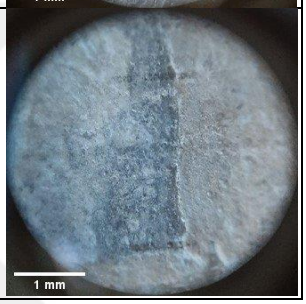
Genel olarak, KM ve KÇM numunelerinin M numunelerine göre daha kompakt olduğu için M numuneleri daha fazla su emdiğini görülmüştür. KM (YS+Y) ve KÇM (YS+Y) gruplarına ait numuneler M numunelerine göre yüksek sıcaklık etkisinden daha az etkilenmiş ve M (YS+Y) grubu numunelere göre daha düşük su emme katsayısına sahiptirler. Örneğin, 400°C'ye maruz kalan M (YS+Y) numunesinin su emme katsayısı $23.26*10^{-3}$ kg/(m^2. √sn) iken KM (YS+Y) ve KÇM (YS+Y) numunelerinin su emme katsayıları Sırasıyla $22.58*10^{-3}$ ve $22.71*10^{-3}$ kg/(m^2. √sn) olarak hesaplanmıştır. Ayrıca, KM ve KÇM numuneleri daha iyi iyileşmiş ve su emme katsayısı M numunelerine göre daha düşük olmuştur. Bununla birlikte, iyileştirilmiş M, KM ve KÇM numunelerinin su emme katsayısındaki değişim yüzdelerinin iyileşmemiş M, KM ve KÇM numunelerine göre daha düşük olduğu tespit edilmiştir. İyileştirilmiş numunelerinin kendi referans numunelerine göre su emme katsayılarındaki değişim yüzdesi %5.90-18.78 arasında değiştiğini bulunmuştur. Özetle, M numunelerinin kompaktlığı KM ve KÇM numunelerine göre daha az olduğu için daha fazla yüksek sıcaklık çatlakları oluşmuştur. Böylece M numunelerinde daha fazla çatlak iyileşmiştir. Dolayısıyla KM ve KÇM olan su

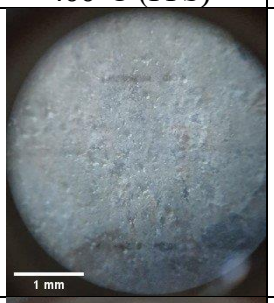
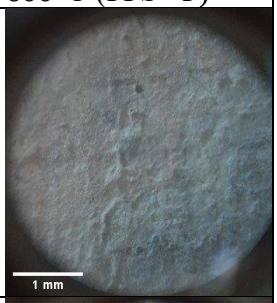
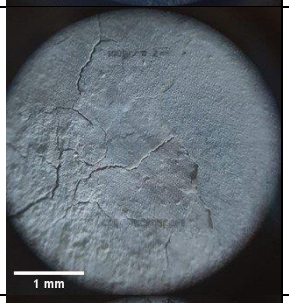
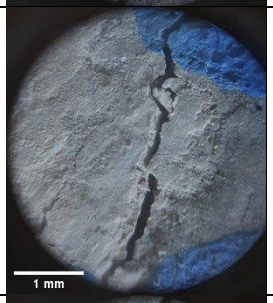
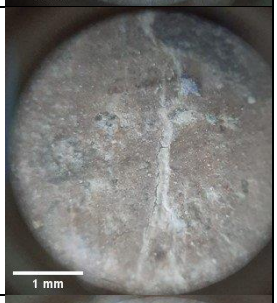
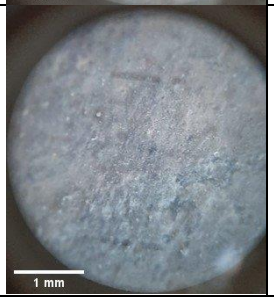
emme katsayısındaki değişim yüzdesinin M numunelere göre daha düşük olduğu tespit edilmiştir (Özellikle 600°C ve 800°C sıcaklıklarına maruz kalan numunelerde).

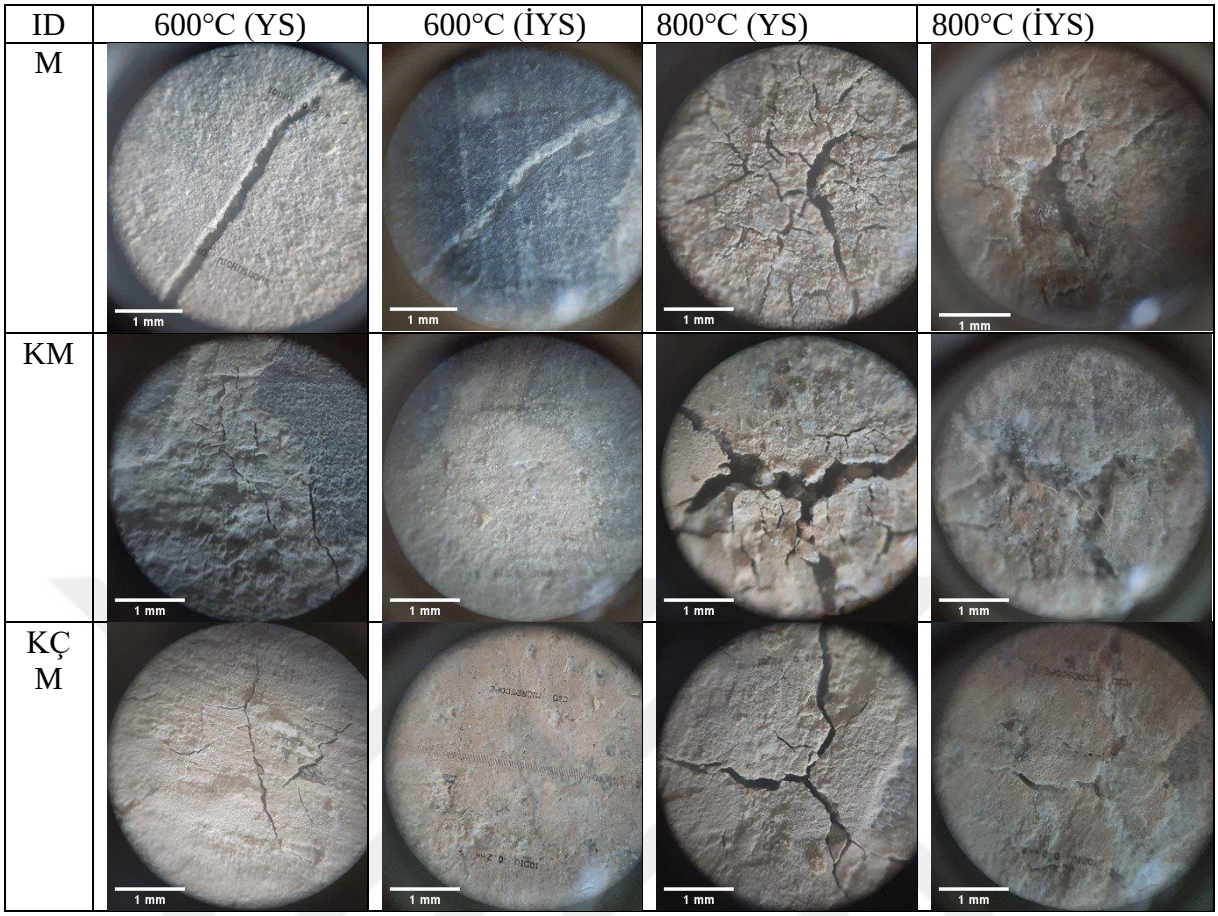
4.2.5. Görsel İnceleme

Bu bölümde, yüksek sıcaklık deneyine maruz kalmış YS, YS+Y, İYS ve İYS+Y çatlaklı ve iyileştirilmiş M, KM ve KÇM numunelerinin görsel çatlak incelemeleri yapılmıştır. Bu amaçla, iyileşmeden önce ve sonra 40X büyütmeli mikroskop kullanılarak çatlak görüntüleri elde edilmiştir. Ayrıca, iyileştirilmemiş ve iyileştirilmiş numunelerin çatlaklarının kapanma derecesini görüntülemek için 40X büyütmeli mikroskop kullanılmıştır. Şekil 4.31'de iyileştirme işleminden önce ve sonra geopolimer beton numunelerinin 40X büyütülmüş görüntüleri gösterilmektedir.

ID	20°C (YS+Y)	20°C (İYS+Y)	200°C (YS+Y)	200°C (İYS+Y)
M				
KM				
KÇM				
ID	200°C (YS)	200°C (İYS)	400°C (YS+Y)	400°C (İYS+Y)

M				
KM				
KÇM				

ID	400°C (YS)	400°C (İYS)	600°C (YS+Y)	600°C (İYS+Y)
M				
KM				
KÇM				



Şekil 4.31: İyileştirme işleminden önceki ve sonraki geopolimer beton numunelerinin 40X büyütülmüş görüntüleri

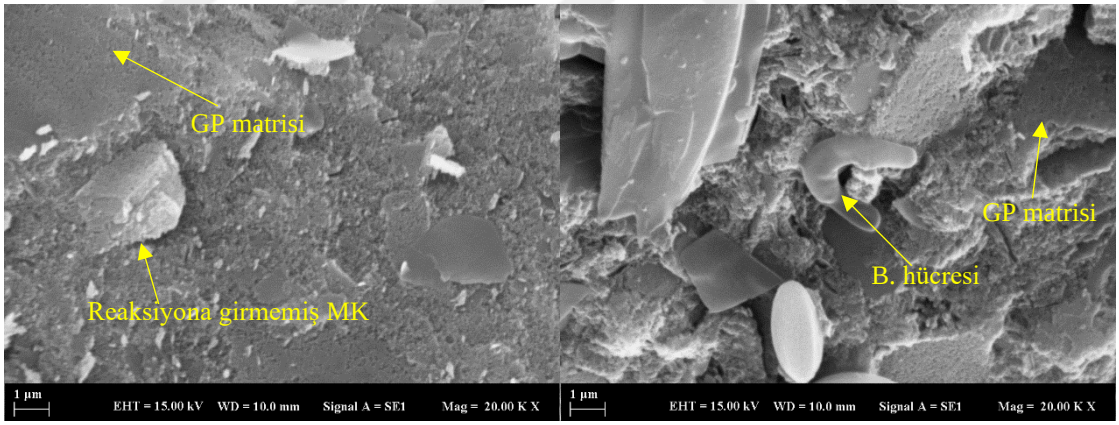
Bu çalışmada, 200°C-600°C arasında değişen sıcaklıklara maruz kalan geopolimer beton numunelerinin yüksek sıcaklık etkisinden dolayı oluşan çatlak genişlikleri genellikle 200 µm'den az olduğunu bulunmuştur. Böylece, 200°C-600°C arasında değişen sıcaklıklara maruz bırakılan numuneler, iyi çatlak iyileştirme performansı göstermiştir. 600°C'nin üzerindeki sıcaklıklara maruz kalan numunelerde oluşan çatlakların bir kısmi 400 µm'den daha geniş olması nedeniyle çatlakların tamamen iyileştirilmediğini görülmüştür. Bu çalışmada, yüksek sıcaklık çatlaklarına ek olarak, 800°C hariç tüm numunelerde 200 µm'den küçük yarmada çekme çatlakları oluşmuştur. Çatlakların genişliği 200 µm'den küçük olduğu için iyi derecede iyileşmiş ve $CaCO_3$ çökeltileri ile kapatılmıştır. 800°C'ye maruz kalan geopolimer beton numunelerinde bazı yüksek sıcaklık çatlakları 400µm'den daha geniş olduğu için yarma sırasında ek çekme çatlakları oluşmamıştır. Ayrıca, 800°C etkisiyle oluşan yüksek sıcaklık çatlaklarının içinde $CaCO_3$ çökeltileri meydana gelmiş ve 400 µm'den daha geniş olan çatlakların yeterli kapanma performansı göstermemiştir. Benzer şekilde önceki yapılan çalışmalarda (Qian ve diğ., 2015, Talaiekhozani ve Abd Majid, 2014, Van Tittelboom ve De

Belie, 2013), 400 µm'den küçük olan çatlakların daha iyi çatlak kapanmasına sahip olduğunu gösterilmiştir. Ayrıca KM ve KÇM numunelerinin çatlaklarının M numunelerine göre biraz daha iyi iyileştiği gözlemlenmiştir. Bunun nedeni, KM ve KÇM numunelerinin kalsiyum içeriğinin M numunelerinin kalsiyum içeriğinden daha yüksek olmasıdır.

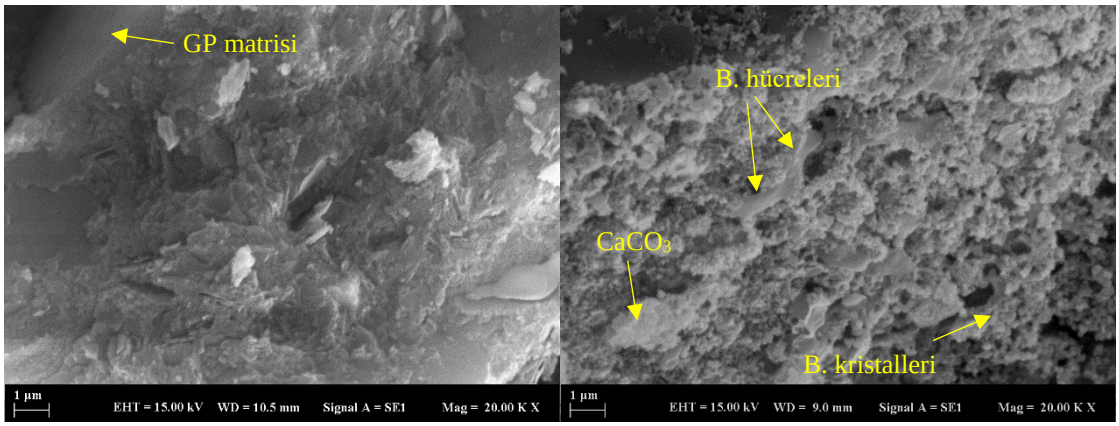
4.2.6. Mikroyapısal Analizlerin Sonuçları

Bu çalışmada, yüksek sıcaklıklara maruz kalan metakaolin esaslı geopolimer beton numunelerin mikro yapıları incelenmiştir. Bu amaçla, en yüksek ve en düşük yarmada çekme dayanımına sahip olan 200°C ve 800°C sıcaklıklara maruz kalan M, KM ve KÇM numuneleri üzerinde mikroyapı analizleri yapılmıştır. Ayrıca, iyileşmenin çıktı ürünü olan $CaCO_3$ varlığını incelemek için numunelerin iyileştirilmesinden önceki ve sonraki mikroyapısal analizleri yapılmıştır.

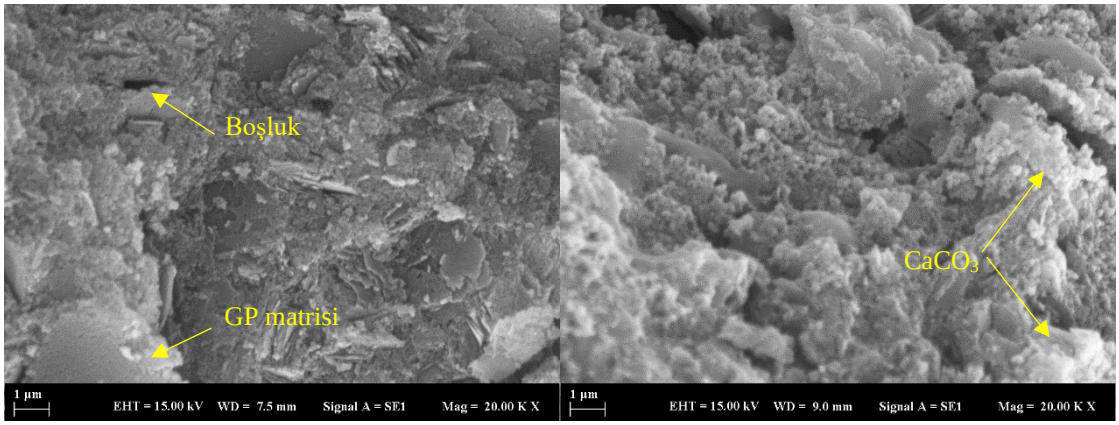
SEM/EDS analizlerini araştırmak için iyileştirilmiş ve iyileştirilmemiş geopolimer numunelerinin çatlak bölgelerinden numuneler alınmıştır. Metakaolin bazlı geopolimer beton numunelerinin SEM mikrografları Şekil 4.32-4.34'te gösterilmektedir.



(a) (b)

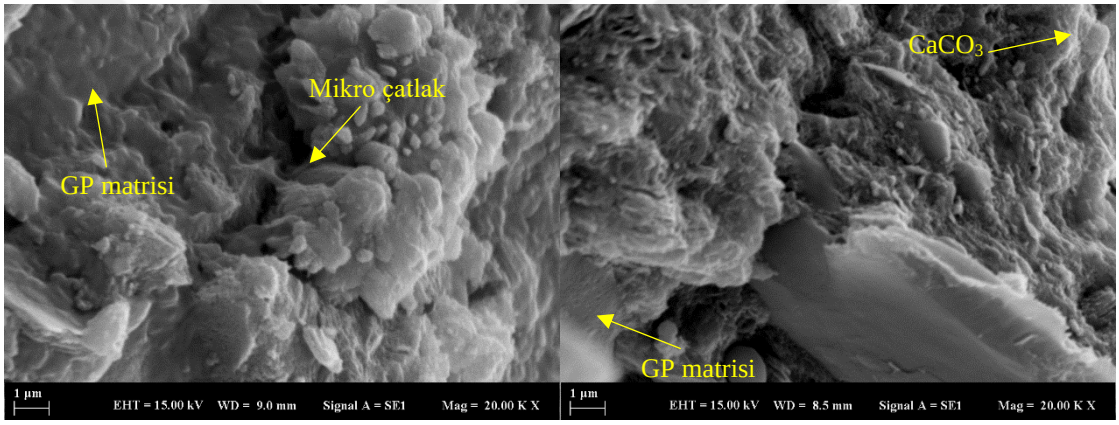


(c) (d)

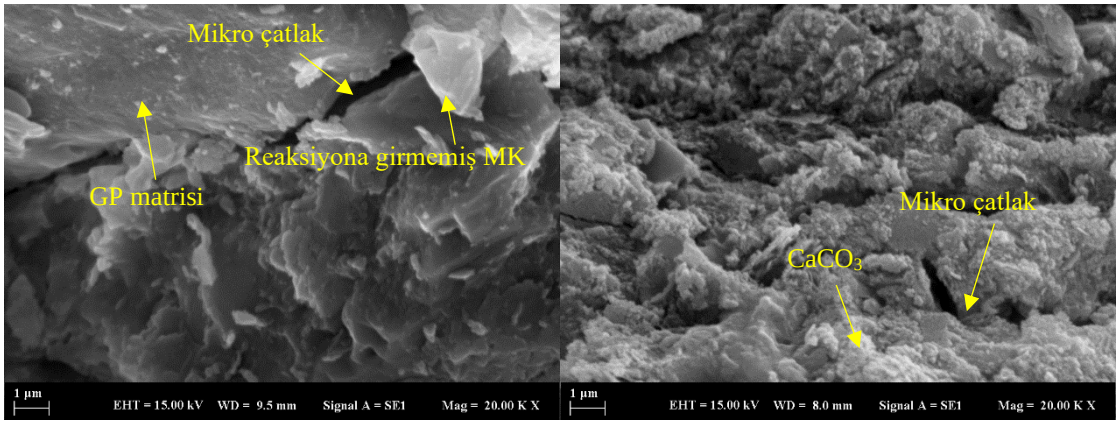


(e) (f)

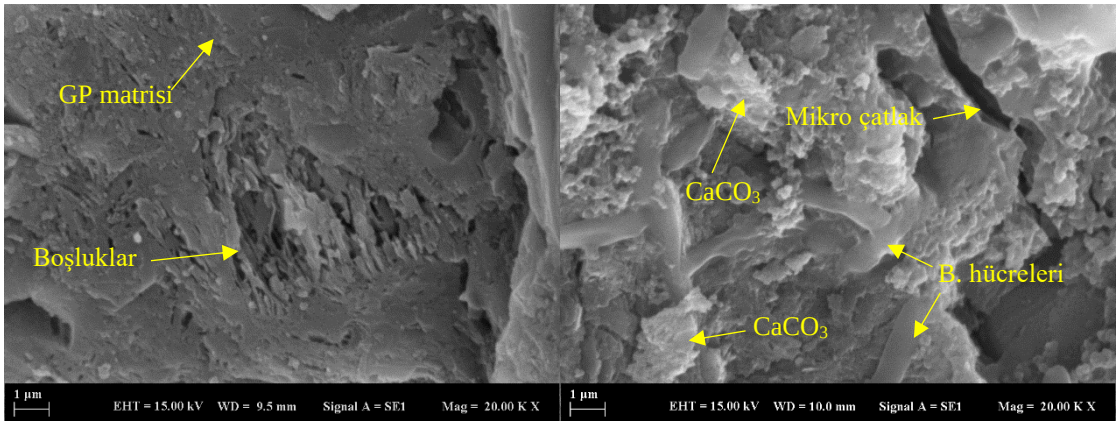
Şekil 4.32: 200°C maruz kalan a) iyileştirilmemiş M numuneleri b) iyileştirilmiş M numuneleri c) iyileştirilmemiş KM numuneleri d) iyileştirilmiş KM numuneleri e) iyileştirilmemiş KÇM numuneleri f) iyileştirilmiş KÇM numunelerinin SEM mikrografları.



(a) (b)

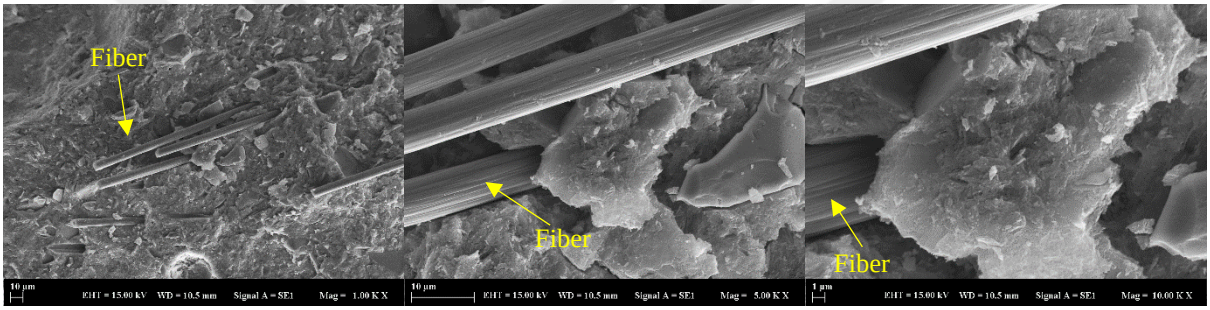


(c) (d)



(e) (f)

Şekil 4.33: 800°C maruz kalan a) iyileştirilmemiş M numuneleri b) iyileştirilmiş M numuneleri c) iyileştirilmemiş KM numuneleri d) iyileştirilmiş KM numuneleri e) iyileştirilmemiş KÇM numuneleri f) iyileştirilmiş KÇM numunelerinin SEM mikrografları.



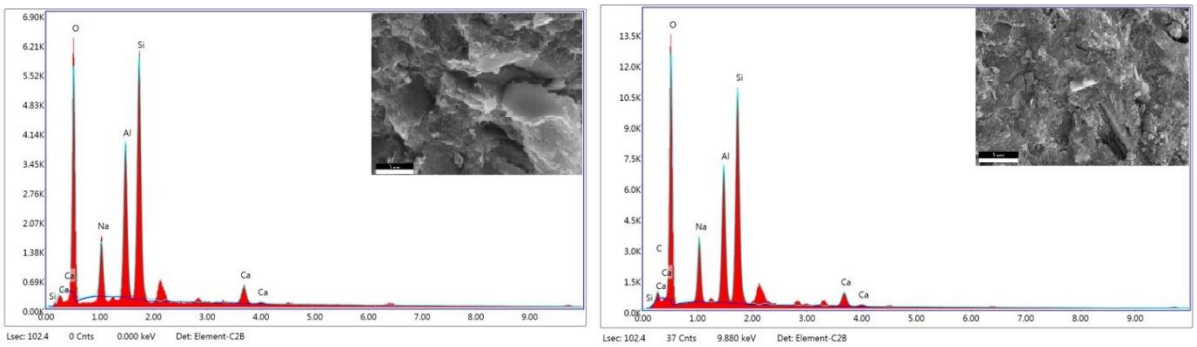
(a) (b) (c)

Şekil 4.34: 200°C'ye maruz kalan KM numunelerinin içindeki lifi gösteren (a) 1000x, (b) 5000x ve 1000x büyütmeli SEM mikrografları.

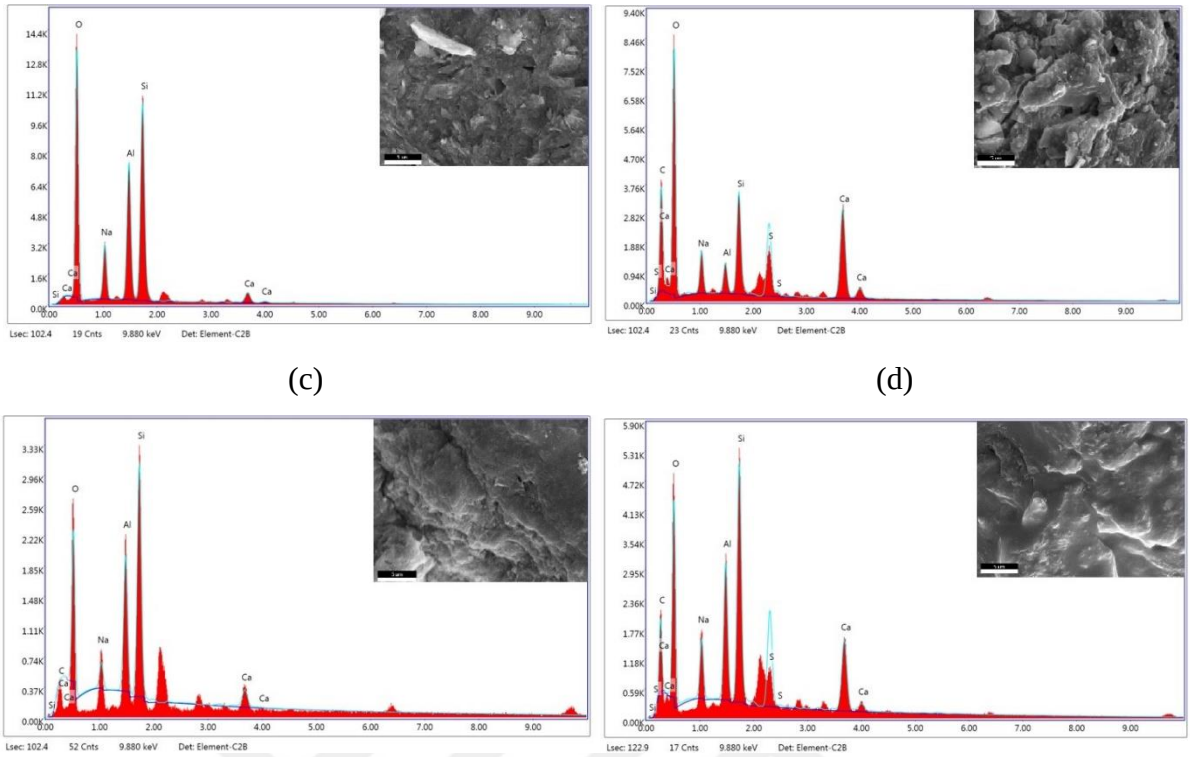
200°C ve 800°C'ye maruz kalan iyileştirilmemiş ve iyileştirilmiş M, KM ve KÇM geopolimer beton numunelerinin SEM mikrograflarını şekil 4.32 ve şekil 4.33'te gösterilmektedir. Genel olarak, tüm iyileştirilmiş numunelerinin iyileştirme işlemi sırasında oluşan $CaCO_3$ çökeltileri içerdiğini görülmüştür. Bu çalışmada SEM mikrograflarının vasıtasıyla metakaolin esaslı geopolimer numunelerde mikrobiyal aktiviteyi ve kalsiyum karbonatın çökelmesini belirlenmiştir. İyileştirilmiş numunelerinin SEM mikrograflarında görüldüğü gibi mikro çatlak ve geopolimer matrisinin üzerinde $CaCO_3$ çökeltileri gelişmiştir. Ayrıca, 200°C'ye maruz kalan iyileştirilmemiş numunelerin mikrograflarında görüldüğü gibi geopolimer matrisinin kompakt ve tutarlı olduğunu bulunmuştur. Aksine, 800°C'ye maruz kalan iyileştirilmemiş numuneler gözenekler ve mikro çatlaklar içerdiğini görülmüştür. Bu sonuçlar, yüksek sıcaklığın geopolimer üzerindeki etkisini araştıran önceki çalışmalarla tutarlıdır (Tammam ve diğ., 2021, Ziada ve diğ., 2021). KM ve KÇM numunelerinin kalsiyum içeriği M numunelerinin kalsiyum

içeriğinden daha yüksek olduğu için SEM analizinde KM ve KÇM numunelerinin çatlaklarının M numunelerine göre daha fazla $CaCO_3$ çökeltileri içerdiği gözlemlenmiştir. Ayrıca önceki çalışmalarda (De Muynck ve diğ., 2008, Van Tittelboom ve diğ., 2010), kullanılan kalsiyum kaynağının bakteriler tarafından çökeltilen $CaCO_3$'ün şeklini doğrudan etkilediğini gösterilmiştir. Bu araştırmada kalsiyum kaynağı olarak kalsiyum laktat kullanılmıştır. Benzer bir çalışmada (Wiktor ve Jonkers, 2011) iyileşme sürecinde kalsiyum laktat kullanılmıştır. Ayrıca, bakteri hücreleri (B. Hücreleri), iyileştirilmiş numunelerinin SEM mikrograflarında görülmüş ve şekil 4.32 (b), 4.32 (d) ve 4.33 (f)'de gösterildiği gibi sarı bir okla işaretlenmiştir. Şekil 4.34'te çeşitli büyütmelerde 200°C'ye maruz kalan KM numunesindeki lif içeriğini gösterilmiştir.

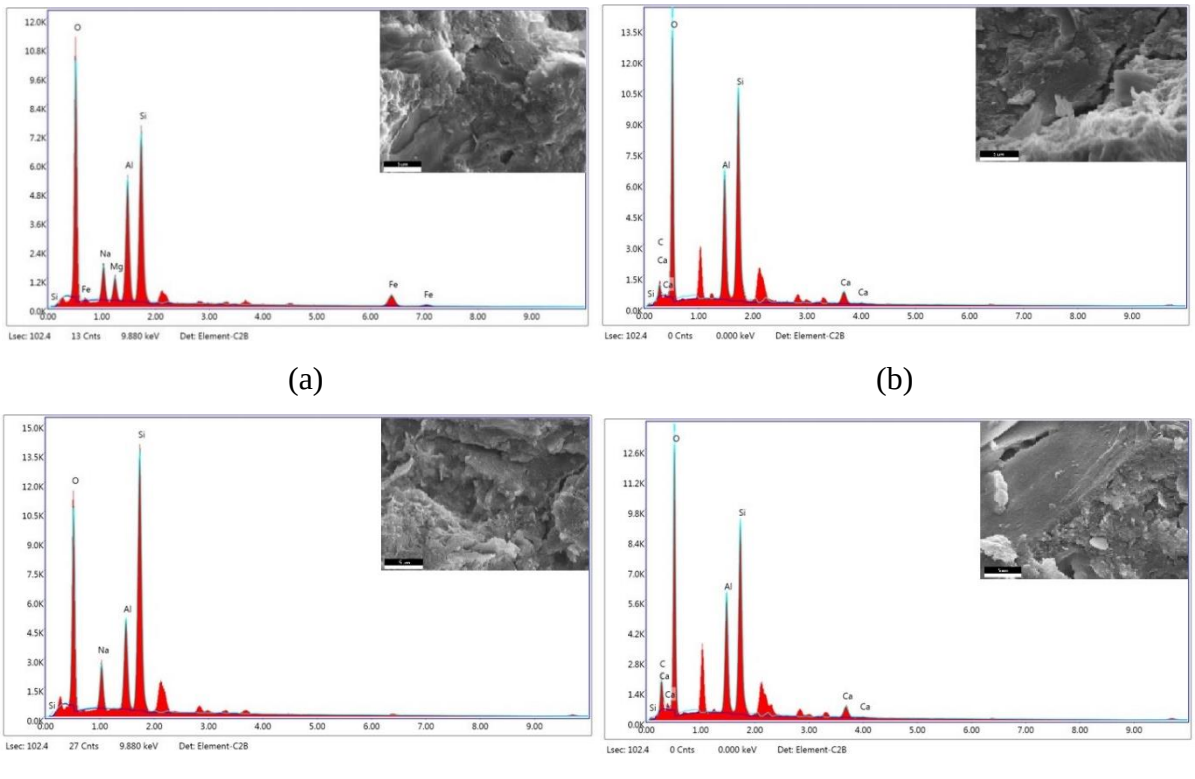
Ayrıca, 200°C ve 800°C'ye maruz kalan iyileştirilmemiş ve iyileştirilmiş M, KM ve KÇM numunelerinin EDS spektroskopileri Şekil 4.35 ve 4.36'da gösterilmektedir. EDS analizlerinde görülen Si, Al, Na, Ca ve O pikleri kullanılarak M, KM ve KÇM numunelerinin genel durumu belirlenmiştir. Ayrıca, $CaCO_3$ çökeltilerinin oluşup oluşmadığını belirlemek için numunelerin iyileşme süreci öncesi ve sonrası $CaCO_3$'ün (Ca, C ve O) ana elementlerinin EDS pikleri incelenmiştir. Burada Si ve Al pikleri geopolimerizasyonun ana pikleri ve reaksiyona girmemiş aktivatör moleküllerini gösteren Na pikleri EDS'lerde yer almıştır. Şekil 4.35 ve 4.36'da iyileştirilmiş numunelerin $CaCO_3$ ana elementlerine sahip olduğunu bulunmuş ve iyileşmemiş numunelerin EDS'lerinde bir C pikine sahip olmadığını gösterilmiştir. İyileşmemiş numunelerde bir C pikinin olmaması, $CaCO_3$'ün olmadığını göstermiştir. Ayrıca bu çalışmada, EDS analizlerinin bulgularının SEM analizinin sonuçlarıyla tutarlı olduğu bulunmuştur. Önceki çalışmalarda benzer şekilde numunelerdeki $CaCO_3$'ün ana elementlerinin iyileşme sürecinden sonra $CaCO_3$ oluşumuyla sonuçlanan bakteriyel etkinin sonucu olduğu belirtilmiştir (Bayati ve Saadabadi, 2021, Khaliq ve Ehsan, 2016, Tanyildizi ve diğ., 2022).

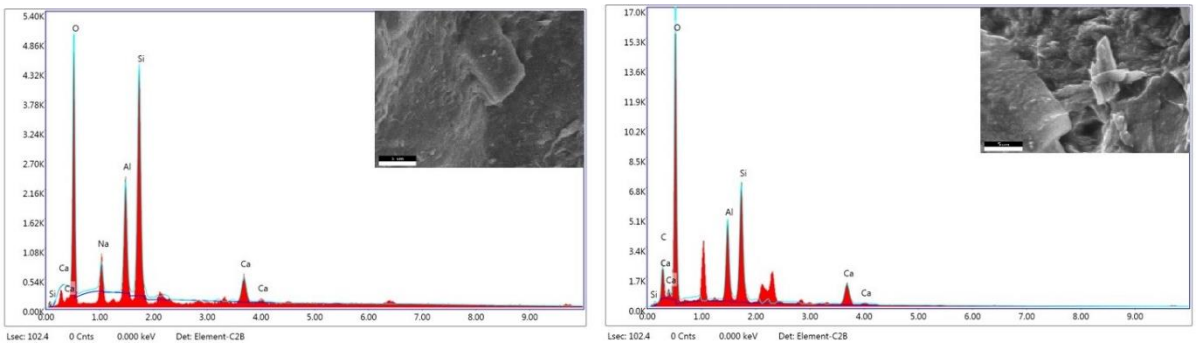


(a) (b)



Şekil 4.35: 200°C'ye maruz kalan a) iyileştirilmemiş M numuneleri b) iyileştirilmiş M numuneleri c) iyileştirilmemiş KM numuneleri d) iyileştirilmiş KM numuneleri e) iyileştirilmemiş KÇM numuneleri f) iyileştirilmiş KÇM numunelerinin EDS'leri.



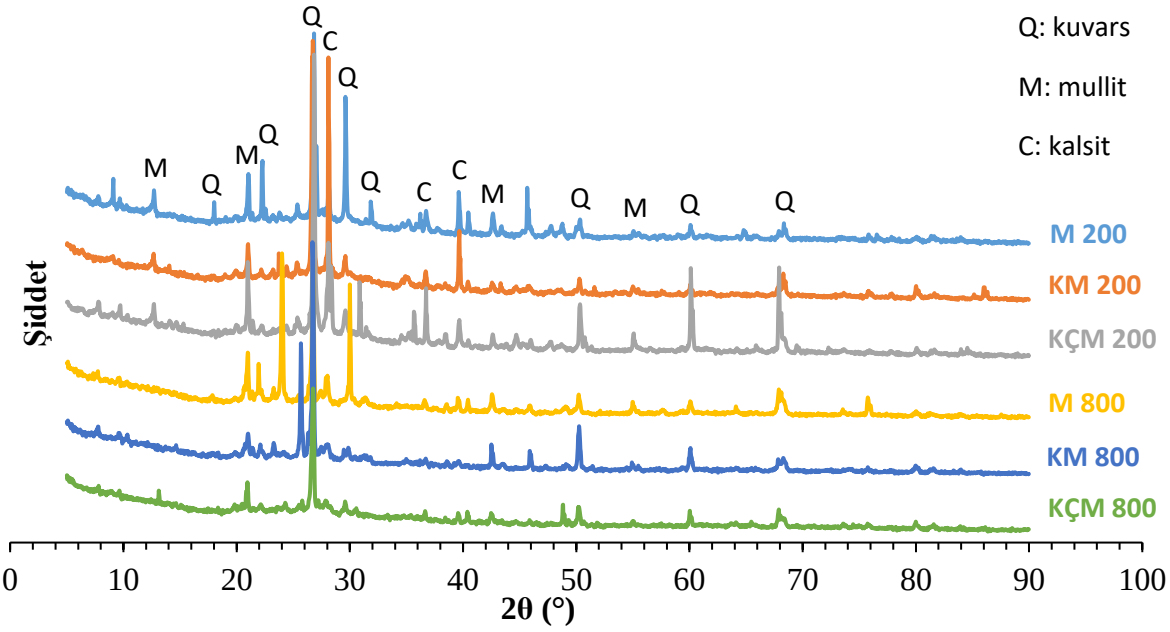


(e) (f)

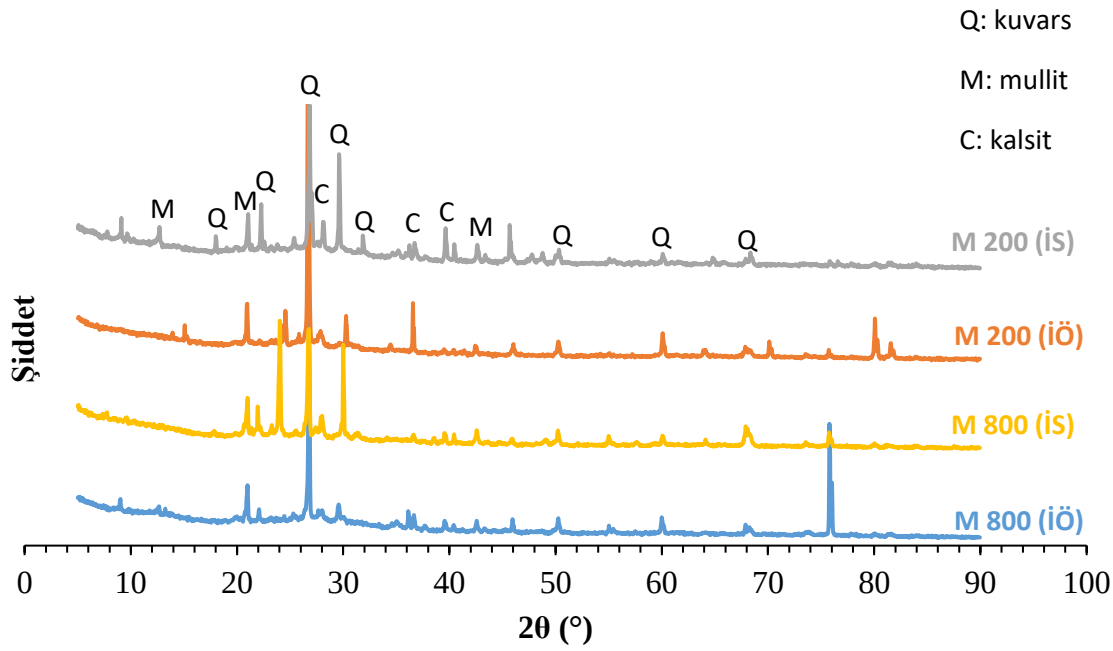
Şekil 4.36: 800°C'ye maruz kalan a) iyileştirilmemiş M numuneleri b) iyileştirilmiş M numuneleri c) iyileştirilmemiş KM numuneleri d) iyileştirilmiş KM numuneleri e) iyileştirilmemiş KÇM numuneleri f) iyileştirilmiş KÇM numunelerinin EDS'leri.

200°C ve 800°C'ye maruz kalan M, KM ve KÇM numunelerinin kimyasal bileşimlerindeki yüksek sıcaklığa bağlı değişiklikleri değerlendirmek için XRD analizi yapılmıştır. Ayrıca, geopolimer beton numunelerinde bakteri iyileşmesi sırasında oluşan $CaCO_3$ oluşumunu incelemek için 200°C ve 800°C'ye maruz bırakılan numunelerin iyileştirme işleminden sonra XRD analizleri yapılmıştır. Şekil 4.37'de 200°C ve 800°C'ye maruz kalan M, KM ve KÇM geopolimer beton numunelerinin iyileştirme işleminden sonra XRD grafikleri gösterilmektedir. Ayrıca, şekil 4.38'de 200°C ve 800°C'ye maruz kalan M numunelerinin iyileştirme işleminden önce (İÖ) ve iyileştirme işleminden sonraki (İS) XRD grafikleri gösterilmektedir. Bu çalışmada verilen XRD analizlerinde 21–33° 2θ civarında amorf fazların varlığını gösteren hafif bir kambur vardır. Ek olarak, XRD grafiklerinde belirgin pikler tespit edilmiş ve bu pikler kuvars (SiO_2), mullit ($Al_6Si_2O_{13}$) ve kalsit ($CaCO_3$) olarak ifade edilmiştir. Şekil 4.38'de gösterildiği gibi sıcaklık derecesi 800 °C'ye yükseltildiğinde $CaCO_3$ zirveleri azalmıştır. $CaCO_3$ zirvelerinin azalması, iyileşmeden dolayı oluşan $CaCO_3$ çökeltilerinin daha az olduğunu ifade etmektedir. Geopolimer betonun aşırı sıcaklıklara maruz kaldığında emme katsayısındaki önemli artışın ana faktörü olarak kabul edilir. Benzer sonuçlar (Zhang ve diğ., 2020a) tarafından bulunmuştur. Ayrıca, numunelerin maruz kaldıkları sıcaklık derecesi 200'den 800 °C'ye yükseldiğinde SiO_2 yoğunluğunun düştüğünü Şekil 4.38'de gösterilmiştir. Sinterleme işlemi büyük miktarda SiO_2 yakmasına yol açarak SiO_2 yoğunluğunun düşmesine neden olmuştur (Zhang ve diğ., 2020a). Sinterleme, yüksek sıcaklıkta atomların yayınımı ve küçük parçacıkların yüzey enerjisinin azalmasıyla gerçekleşir ve metakaolin bazlı geopolimerlerde 500–1000 °C sıcaklıklarda rapor edilmektedir (Duxson ve diğ., 2006, Duxson ve diğ., 2007). Şekil 4.37'de KM ve KÇM numunelerinin kalsit zirveleri, M numunelerinin kalsit zirvelerinden daha yüksek olduğunu görülmüştür. Bunun nedeni, KM ve KÇM numunelerinin M numunelerine göre daha yüksek

kalsiyum içeriğine sahip olmasıdır. Ek olarak, iyileştirilmiş numunelerin kalsiyum zirvelerinin, iyileşmemiş numunelerin kalsit zirvelerinden daha yüksek olduğunu Şekil 4.38'de gösterilmiştir.

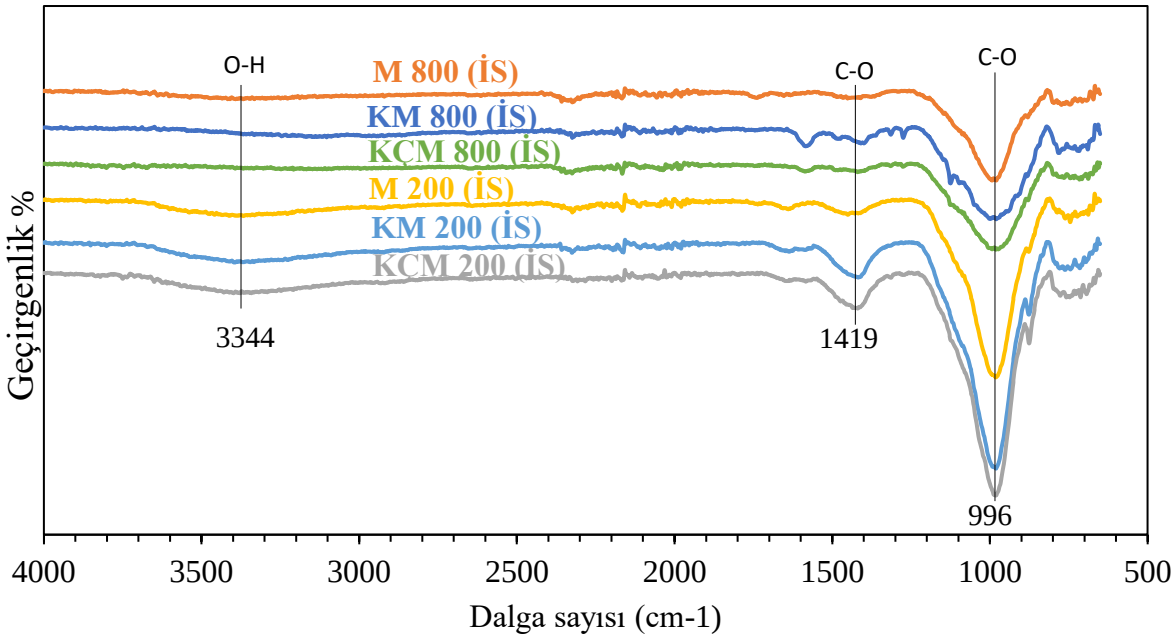


Şekil 4.37: İyileştirme işleminden sonra 200°C ve 800°C M, KM ve KÇM numunelerinin XRD grafikleri**.**

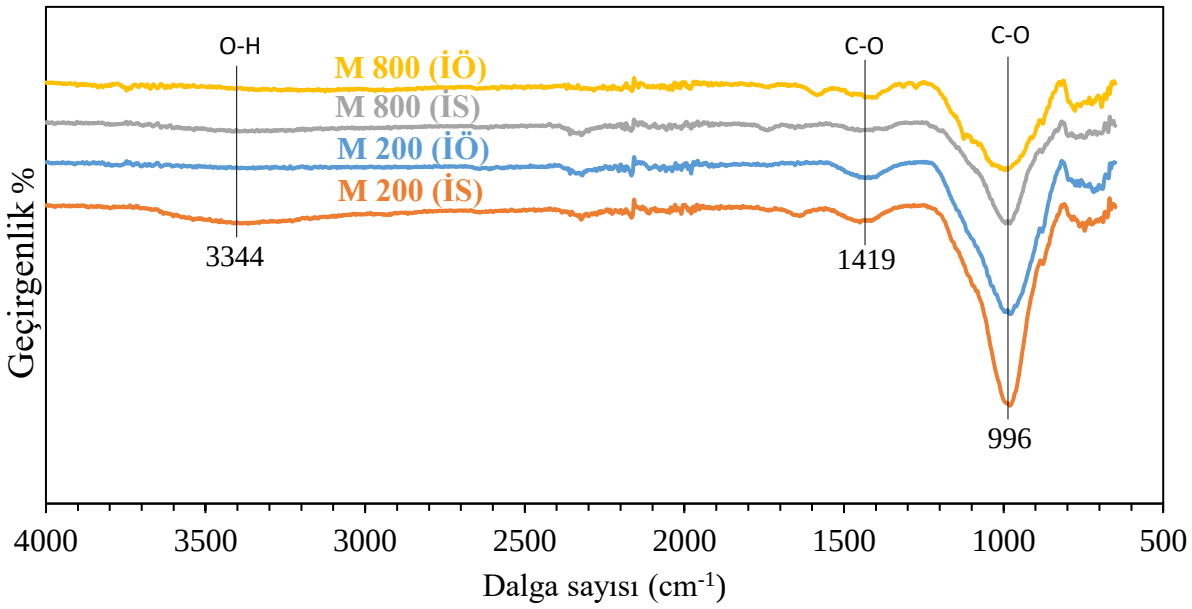


Şekil 4.38: İyileştirme işleminden önce ve sonra 200°C ve 800°C'ye maruz kalan M numunelerinin XRD grafikleri.

Şekil 4.39’da 200°C ve 800°C'ye maruz kalan M, KM ve KÇM numunelerin iyileştirme işleminden sonraki FTIR spektrumları gösterilmektedir. Ayrıca Şekil 4.40’ta 200°C ve 800°C'ye maruz kalan M numunelerinin iyileştirme sürecinden önceki ve sonraki FTIR spektrumlarını gösterilmektedir. Çatlakları dolduran $CaCO_3$ içeriğini belirlemek için iyileşmemiş ve iyileşmiş geopolimer beton numunelerinin çatlak bölgelerinden FITR analizinde kullanılmak üzere numuneler alınmıştır. 3344 cm^{-1} civarında FITR pikleri, hidroksil grubunun (O-H) bükülme titreşimlerine atfedilebilir. Şekil 4.39 ve 4.40’ta numunelerinin maruz kaldıkları sıcaklık artışıyla birlikte 3344 cm^{-1}'deki hidroksil grubunun titreşim tepe kuvvetinin azaldığını görülmüştür. Bunun başlıca nedeni, yüksek sıcaklık etkisinden dolayı oluşan serbest su, kılcal su ve bağlı suyun kaybı nedeniyle zamanla geopolimer numunelerinin su içeriğindeki azalmadan kaynaklanmakta ve dolayısıyla numunelerdeki karakteristik hidroksil grubu tepelerinin kademeli olarak kaybolmasına neden olmaktadır (Yan ve diğ., 2016). Bu sonuç, bir önceki çalışmada (Li ve diğ., 2022) verilen sonuçlarla uyumludur. 996 cm^{-1} ve 1419 cm^{-1} civarında tepe noktasının C–O simetrik gerilme titreşim zirvesine karşılık gelmiştir. Bu çalışmada, bu tepe noktasının $CaCO_3$'ün varlığını değerlendirmek için kullanılmıştır. Önceki yapılan çalışmalar (Trezza ve Lavat, 2001, Wiktor ve Jonkers, 2011) bu sonuçları doğrulamıştır. Şekil 4.39 iyileştirilmiş KM ve KÇM numunelerinin iyileştirilmiş M numunelerinden daha büyük oranda kalsiyum karbonat içerdiğini göstermiştir. Şekil 4.40’ta yüksek sıcaklığın 200°C'den 800°C'ye artışının numunelerin C-O piklerini azalttığı gösterilmektedir. Ayrıca, iyileşen numunelerin C-O piklerinin, iyileşmeyen numunelerinin piklerinden daha belirgin olduğu da gözlenmiştir.

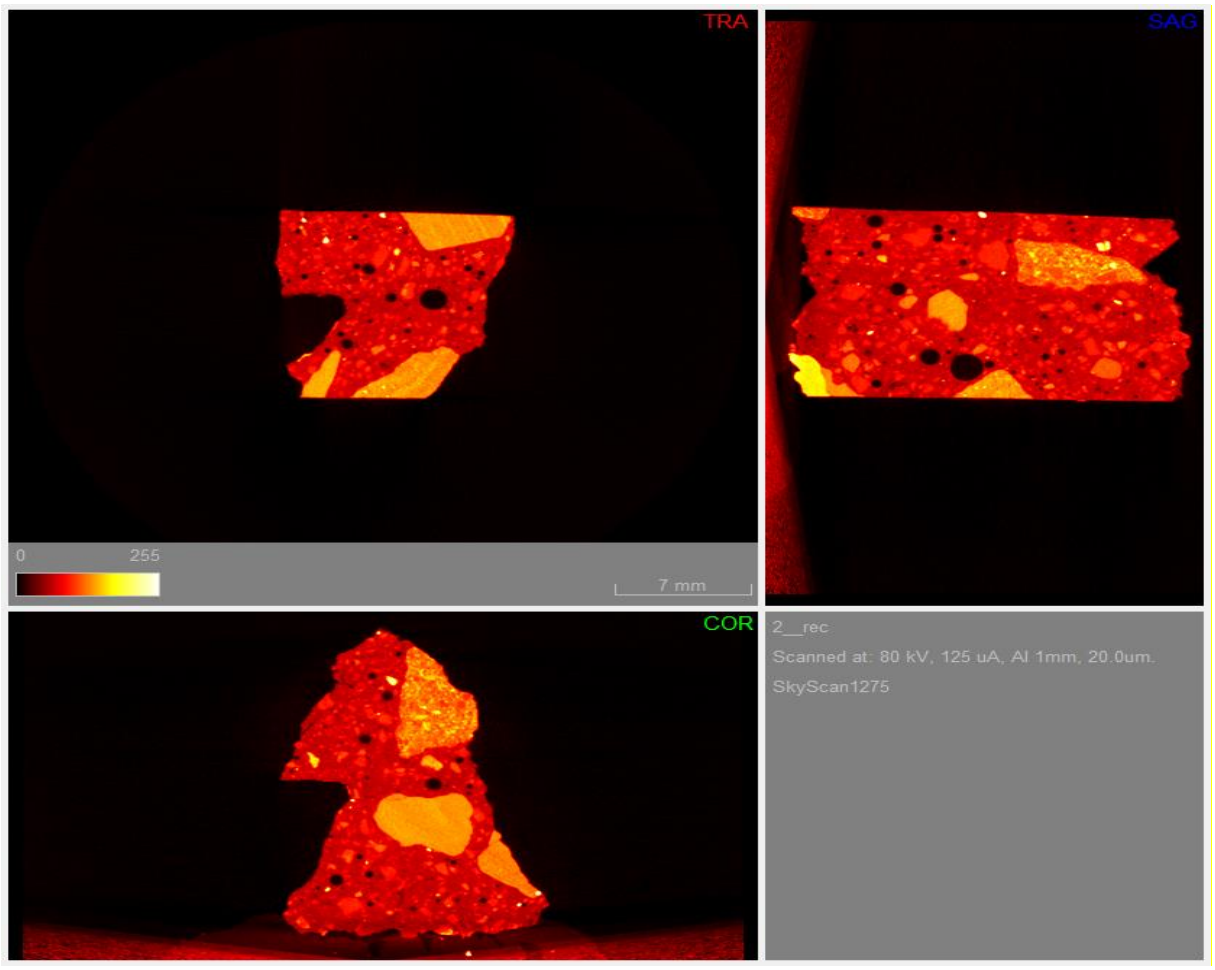


Şekil 4.39: 200°C ve 800°C'ye maruz kalan M, KM ve KÇM numunelerin iyileştirme sürecinden sonraki FTIR analizleri.



Şekil 4.40: 200°C ve 800°C'ye maruz kalan M numunelerinin iyileştirme işleminden önceki ve sonraki FTIR analizleri.

Bu tez çalışmasında yüksek sıcaklığa maruz kalmış en yüksek dayanımlı numunedeki bakterilerin boşluk doldurma kabiliyetini belirleyebilmek için microCT analizi gerçekleştirilmiştir. Yüksek sıcaklığa maruz kalan numuneler içindeki en yüksek dayanımlı numune 200 °C' ye maruz kalmış 6RM kodlu numunedir. Şekil 5.41'de en yüksek dayanımlı olan numunenin microCT görüntüsü verilmiştir.



Şekil 4.41: 200 °C maruz kalmış KÇM numunenin microCT görüntüsü

Şekil 5.41'de MicroCT görüntüsü verilen numunenin MicroCT analizi gerçekleştirilmiştir. MicroCT görüntüsünün analizi sonucunda, numunenin toplam porozitesinin %1.61 olduğu belirlenmiştir. Tüm porozitenin %1.59'unun $CaCO_3$ çökeltisi ise doldurduğu saptanmıştır. MicroCT sonucuna göre, yüksek sıcaklığa maruz kalmış numunede bakteri tabanlı iyileşmenin kullanılmasının numunedeki toplam porozitenin %98.86'ni iyileştirme kabiliyetine sahip olduğu belirlenmiştir.

5. TARTIŞMA VE SONUÇ

Bu tez çalışmasında, S. Pasteurii'nin metakaolin bazlı geopolimer numunelerindeki yüksek sıcaklık çatlaklarını onarma kabiliyetini araştırılmıştır. Aşağıdaki sonuçlar, iyileştirilmemiş ve iyileştirilmiş numuneler üzerinde gerçekleştirilen mekanik ve mikroyapısal testlerin bulgularını özetlemektedir:

- Bu çalışmada enjeksiyon yöntemi, tüm serilerin mekanik özelliklerini iyileştirdiği, kolay uygulanabildiği ve düşük maliyetli olduğu için diğer yöntemlere göre en iyi yöntem olmuştur.

- KM ve KÇM numunelerin içerdikleri K ve KÇ malzemelerinin çekirdeklenme etkisinden dolayı M numunelerden daha kompakttı. Böylece, K ve KÇ malzemeleri, geopolimer betonun basınç dayanımını iyileştirmiş ve KÇM ve KM serileri, M serisine göre daha az su emme değerlerine sahipti. M numunelerine kıyasla KM ve KÇM numunelerinin UPV artışları sırasıyla %1 ve %3.2 olmuştur. Ayrıca, KM ve KÇM numunelerinin yarmada çekme mukavemeti artışları, M numunelerine kıyasla %0.5 ve %2.7 olmuştur.

- Yüksek sıcaklık deneyindeki sıcaklıklar yükseldikçe numunelerin ağırlıkları düşmüştür. Böylece, 800 °C'de en fazla ağırlık kaybedilirken, 200°C'de en küçük değişiklik elde edilmiştir. Ayrıca K ve KÇ malzemeleri metakaolin esaslı geopolimer beton numunelerinde ağırlık değişimini azaltmıştır.

- Yüksek sıcaklık deneylerinden sonra iyileştirilmiş numunelerin yarmada çekme mukavemetinin geri kazanım yüzdeleri %84.60 ile %21.17 arasında değişmiştir. Yarmada çekme mukavemetinin en yüksek geri kazanım yüzdeleri İYS (200°C) numuneleri için, en düşük yüzdeler ise İYS (800°C) numuneleri için olmuştur. Ek olarak, K ve KÇ, metakaolin bazlı geopolimer betonun yarmada çekme mukavemetini ve iyileştirme performansını arttırmıştır.

- $CaCO_3$ çökeltileri, numunelerin kapanmasına ve iyileşmesine neden olmuş ve dolayısıyla emilen su miktarını azaltmıştır. Sonuç olarak, çeşitli sıcaklıklara maruz

kalan ve sonrasında iyileştirilmiş numuneler, iyileştirilmemiş numunelere göre daha az su emme değerlerine sahip olduğu bulunmuştur. Yüksek sıcaklık deneyinden sonra, iyileştirilmiş ve iyileştirilmemiş numuneler arasındaki su emme katsayıları %5.90 ile %18.78 arasında değişmiştir.

- Bu çalışmada, bakterilerle yapılan iyileşmenin küçük çatlaklarda daha etkili olduğunu bulunmuştur. Ayrıca küçük genişlikli çatlakların geniş çatlaklara göre daha az ürünlerin gerektirdiğini söylenebilir. Bu çalışmada, çatlak genişliği ve iyileşme performansı ters orantılı olduğunu bulunmuştur.

- Yangın tehlikesine maruz kalmış yapılara bakteri ile iyileştirilme işlemi uygulayarak yapıların su geçirgenliğinin azaltması ve mekanik özelliklerinin iyileşmesine neden olabilir. Bu şekilde, sunulan malzeme ve iyileştirme yöntemi, barajlar, sulama işleri, deniz yapıları, beton zeminler, köprüler, otoyollar, yapısal bodrum duvarları, tünel kaplamaları gibi doğrudan su ile temas halinde olan yapılarda kullanılabilir.

- Bu tez çalışmasının olumlu sonuçları nedeniyle çeşitli nano malzemeleri kullanarak bakterinin performansı veya farklı bağlayıcı malzemeli geopolimerlerde kendiliğinden iyileşmenin incelenmesi gibi konuların araştırılmasını önerilmektedir.

KAYNAKLAR

ABO-EL-ENEIN, S. A., ALI, A. H., TALKHAN, F. N. & ABDEL-GAWWAD, H. A. 2013. Application of microbial biocementation to improve the physico-mechanical properties of cement mortar. *HBRC Journal,* 9**,** 36-40.

ACHAL, V., MUKHERJEE, A., BASU, P. C. & REDDY, M. S. 2009. Strain improvement of Sporosarcina pasteurii for enhanced urease and calcite production. *Journal of industrial Microbiology and Biotechnology,* 36**,** 981-988.

ANDALIB, R., ABD MAJID, M. Z., HUSSIN, M. W., PONRAJ, M., KEYVANFAR, A., MIRZA, J. & LEE, H.-S. 2016. Optimum concentration of Bacillus megaterium for strengthening structural concrete. *Construction and Building Materials,* 118**,** 180-193.

ASTM C39, A. 2021. ASTM C39, Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens, West Conshohocken, PA. ASTM International (ASTM).

ASTM C348, A. 2014. Standard Test Method for Flexural Strength of Hydraulic-Cement Mortars, ASTM Int, West Conshohocken, PA.

ASTM C496, A. 2017. Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens, West Conshohocken, PA.

ASTM C597, A. 2016. Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete, West Conshohocken, PA.

ASTM C1585, A. 2020. Standard Test Method for Measurement of Rate of Absorption of Water by Hydraulic-Cement Concretes, West Conshohocken, PA.

BACHMEIER, K. L., WILLIAMS, A. E., WARMINGTON, J. R. & BANG, S. S. 2002. Urease activity in microbiologically-induced calcite precipitation. *Journal of biotechnology,* 93**,** 171-181.

BANG, S. S., GALINAT, J. K. & RAMAKRISHNAN, V. 2001. Calcite precipitation induced by polyurethane-immobilized Bacillus pasteurii. *Enzyme and Microbial Technology,* 28**,** 404-409.

BAYATI, M. & SAADABADI, L. A. 2021. Efficiency of bacteria based self-healing method in alkali-activated slag (AAS) mortars. *Journal of Building Engineering,* 42**,** 102492.

BELLUM, R. R., MUNIRAJ, K. & MADDURU, S. R. C. 2020. Influence of slag on mechanical and durability properties of fly ash-based geopolymer concrete. *Journal of the Korean Ceramic Society,* 57**,** 530-545.

BHASKAR, S., ANWAR HOSSAIN, K. M., LACHEMI, M., WOLFAARDT, G. & OTINI KROUKAMP, M. 2017. Effect of self-healing on strength and durability of zeolite-immobilized bacterial cementitious mortar composites. *Cement and Concrete Composites,* 82**,** 23-33.

BILLONG, N., MELO, U. C., NJOPWOUO, D., LOUVET, F. & BONNET, J. P. 2013. Physicochemical characteristics of some Cameroonian pozzolans for use in sustainable cement like materials.

CELIK, A., YILMAZ, K., CANPOLAT, O., AL-MASHHADANI, M. M., AYGÖRMEZ, Y. & UYSAL, M. 2018. High-temperature behavior and mechanical characteristics of boron waste additive metakaolin based geopolymer composites reinforced with synthetic fibers. *Construction and Building Materials,* 187**,** 1190-1203.

CHAHAL, N., SIDDIQUE, R. & RAJOR, A. 2012. Influence of bacteria on the compressive strength, water absorption and rapid chloride permeability of fly ash concrete. *Construction and Building Materials,* 28**,** 351-356.

CHAURASIA, L., BISHT, V., SINGH, L. P. & GUPTA, S. 2019. A novel approach of biomineralization for improving micro and macro-properties of concrete. *Construction and Building Materials,* 195**,** 340-351.

CHEN, S., ZHANG, Y., YAN, D., JIN, J., TIAN, Y., LIU, Y., QIAN, X., PENG, Y. & FUJITSU, S. 2020. The influence of Si/Al ratio on sulfate durability of metakaolin-based geopolymer. *Construction and Building Materials,* 265**,** 120735.

CHENG, T. W., LEE, M. L., KO, M. S., UENG, T. H. & YANG, S. F. 2012. The heavy metal adsorption characteristics on metakaolin-based geopolymer. *Applied Clay Science,* 56**,** 90-96.

DAVIDOVITS, J. 1991. Geopolymers: inorganic polymeric new materials. *Journal of Thermal Analysis and calorimetry,* 37**,** 1633-1656.

DAVIDOVITS, J. 1994. *Properties of Geopolymer Cements*.

DE MUYNCK, W., COX, K., BELIE, N. D. & VERSTRAETE, W. 2008. Bacterial carbonate precipitation as an alternative surface treatment for concrete. *Construction and Building Materials,* 22**,** 875-885.

DOBISZEWSKA, M., PICHÓR, W. & SZOŁDRA, P. Effect of basalt powder addition on properties of mortar. 2019. EDP Sciences, 06002.

DUAN, P., YAN, C., ZHOU, W. & REN, D. 2016. Development of fly ash and iron ore tailing based porous geopolymer for removal of Cu(II) from wastewater. *Ceramics International,* 42**,** 13507-13518.

DUXSON, P., LUKEY, G. C. & VAN DEVENTER, J. S. J. 2006. Thermal evolution of metakaolin geopolymers: Part 1 – Physical evolution. *Journal of Non-Crystalline Solids,* 352**,** 5541-5555.

DUXSON, P., LUKEY, G. C. & VAN DEVENTER, J. S. J. 2007. Physical evolution of Na-geopolymer derived from metakaolin up to 1000 °C. *Journal of Materials Science,* 42**,** 3044-3054.

GAMBO, S., IBRAHIM, K., ALIYU, A., IBRAHIM, A. G. & ABDULSALAM, H. 2020. Performance of metakaolin based geopolymer concrete at elevated temperature. *Nigerian Journal of Technology,* 39**,** 732-737.

GE, Y., YUAN, Y., WANG, K., HE, Y. & CUI, X. 2015. Preparation of geopolymer-based inorganic membrane for removing Ni2+ from wastewater. *Journal of Hazardous Materials,* 299**,** 711-718.

GOROSPE, C. M., HAN, S.-H., KIM, S.-G., PARK, J.-Y., KANG, C.-H., JEONG, J.-H. & SO, J.-S. 2013. Effects of different calcium salts on calcium carbonate crystal formation by Sporosarcina pasteurii KCTC 3558. *Biotechnology and Bioprocess Engineering,* 18**,** 903-908.

GUPTA, S., KUA, H. W. & PANG, S. D. 2018. Healing cement mortar by immobilization of bacteria in biochar: An integrated approach of self-healing and carbon sequestration. *Cement and Concrete Composites,* 86**,** 238-254.

HAMMES, F., BOON, N., DE VILLIERS, J., VERSTRAETE, W. & SICILIANO, S. D. 2003. Strain-specific ureolytic microbial calcium carbonate precipitation. *Applied and environmental microbiology,* 69**,** 4901-4909.

IBRAHIM, S. S., HAGRASS, A. A., BOULOS, T. R., YOUSSEF, S. I., EL-HOSSINY, F. I. & MOHARAM, M. R. 2017. Metakaolin as an active pozzolan for cement that improves its properties and reduces its pollution hazard. *Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering,* 6**,** 86-104.

IMBABI, M. S., CARRIGAN, C. & MCKENNA, S. 2012. Trends and developments in green cement and concrete technology. *International Journal of Sustainable Built Environment,* 1**,** 194-216.

KARTHIK, C. & RAO, R. M. 2016. Properties of bacterial-based self-healing concrete-A review. *International Journal of ChemTech Research,* 9**,** 182-188.

KHALIQ, W. & EHSAN, M. B. 2016. Crack healing in concrete using various bio influenced self-healing techniques. *Construction and Building Materials,* 102**,** 349-357.

KODUR, V. 2014. Properties of concrete at elevated temperatures. *International Scholarly Research Notices,* 2014.

KONG, D. L., SANJAYAN, J. G. & SAGOE-CRENTSIL, K. 2007a. Comparative performance of geopolymers made with metakaolin and fly ash after exposure to elevated temperatures. *Cement and concrete research,* 37**,** 1583-1589.

KONG, D. L. Y. & SANJAYAN, J. G. 2008. Damage behavior of geopolymer composites exposed to elevated temperatures. *Cement and Concrete Composites,* 30**,** 986-991.

KONG, D. L. Y., SANJAYAN, J. G. & SAGOE-CRENTSIL, K. 2007b. Comparative performance of geopolymers made with metakaolin and fly ash after exposure to elevated temperatures. *Cement and Concrete Research,* 37**,** 1583-1589.

LAHOTI, M., WONG, K. K., TAN, K. H. & YANG, E.-H. 2018. Effect of alkali cation type on strength endurance of fly ash geopolymers subject to high temperature exposure. *Materials & Design,* 154**,** 8-19.

LATAWIEC, R., WOYCIECHOWSKI, P. & KOWALSKI, K. J. 2018. Sustainable Concrete Performance—CO2-Emission. *Environments,* 5.

LAW, D. W., ADAM, A. A., MOLYNEAUX, T. K., PATNAIKUNI, I. & WARDHONO, A. 2015. Long term durability properties of class F fly ash geopolymer concrete. *Materials and Structures,* 48**,** 721-731.

LI, M., LUO, R., QIN, L., LIU, H., DUAN, P., JING, W., ZHANG, Z. & LIU, X. 2022. High temperature properties of graphene oxide modified metakaolin based geopolymer paste. *Cement and Concrete Composites,* 125**,** 104318.

LÓPEZ, F. J., SUGITA, S. & KOBAYASHI, T. 2014. Cesium-adsorbent geopolymer foams based on silica from rice husk and metakaolin. *Chemistry Letters,* 43**,** 128-130.

LUO, M., QIAN, C.-X. & LI, R.-Y. 2015. Factors affecting crack repairing capacity of bacteria-based self-healing concrete. *Construction and Building Materials,* 87**,** 1-7.

MAEVSKI, I. Y. 2011. *Design fires in road tunnels,* Transportation Research Board.

MEYER, C. 2009. The greening of the concrete industry. *Cement and Concrete Composites,* 31**,** 601-605.

MITCHELL, A. C. & FERRIS, F. G. 2005. The coprecipitation of Sr into calcite precipitates induced by bacterial ureolysis in artificial groundwater: Temperature and kinetic dependence. *Geochimica et Cosmochimica Acta,* 69**,** 4199-4210.

NOLAN, É., BASHEER, P. A. M. & LONG, A. E. 1995. Effects of three durability enhancing products on some physical properties of near surface concrete. *Construction and Building Materials,* 9**,** 267-272.

OKWADHA, G. D. O. & LI, J. 2010. Optimum conditions for microbial carbonate precipitation. *Chemosphere,* 81**,** 1143-1148.

OLIVIA, M. & NIKRAZ, H. 2012. Properties of fly ash geopolymer concrete designed by Taguchi method. *Materials & Design (1980-2015),* 36**,** 191-198.

ÖZCAN, A. & KARAKOÇ, M. B. 2019. The Resistance of Blast Furnace Slag- and Ferrochrome Slag-Based Geopolymer Concrete Against Acid Attack. *International Journal of Civil Engineering,* 17**,** 1571-1583.

PALOMO, A., GRUTZECK, M. W. & BLANCO, M. T. 1999. Alkali-activated fly ashes: A cement for the future. *Cement and Concrete Research,* 29**,** 1323-1329.

PAN, Z. & SANJAYAN, J. G. 2012. Factors influencing softening temperature and hot-strength of geopolymers. *Cement and Concrete Composites,* 34**,** 261-264.

PAN, Z., SANJAYAN, J. G. & RANGAN, B. V. 2009. An investigation of the mechanisms for strength gain or loss of geopolymer mortar after exposure to elevated temperature. *Journal of Materials Science,* 44**,** 1873-1880.

PARK, B. & CHOI, Y. C. 2018. Quantitative evaluation of crack self-healing in cement-based materials by absorption test. *Construction and Building Materials,* 184**,** 1-10.

PRUD'HOMME, E., MICHAUD, P., JOUSSEIN, E., PEYRATOUT, C., SMITH, A. & ROSSIGNOL, S. 2011. In situ inorganic foams prepared from various clays at low temperature. *Applied Clay Science,* 51**,** 15-22.

QIAN, C., CHEN, H., REN, L. & LUO, M. 2015. Self-healing of early age cracks in cement-based materials by mineralization of carbonic anhydrase microorganism. *Frontiers in microbiology,* 6**,** 1225.

RAMAKRISHNAN, V., PANCHALAN, R. & BANG, S. S. Bacterial Concrete-A Self Remediating Biomaterial. 2001 2001.

RANJBAR, N. & ZHANG, M. 2020. Fiber-reinforced geopolymer composites: A review. *Cement and Concrete Composites,* 107**,** 103498.

RICKARD, W. D. A., GLUTH, G. J. G. & PISTOL, K. 2016. In-situ thermo-mechanical testing of fly ash geopolymer concretes made with quartz and expanded clay aggregates. *Cement and Concrete Research,* 80**,** 33-43.

SAMAHA, H. R. & HOVER, K. C. 1992. Influence of microcracking on the mass transport properties of concrete. *Materials Journal,* 89**,** 416-424.

SENFF, L., HOTZA, D. & LABRINCHA, J. A. 2011. Effect of red mud addition on the rheological behaviour and on hardened state characteristics of cement mortars. *Construction and Building Materials,* 25**,** 163-170.

SEVIM, U. K. 2011. Colemanite ore waste concrete with low shrinkage and high split tensile strength. *Materials and Structures,* 44**,** 187-193.

SILVA, P. D., SAGOE-CRENSTIL, K. & SIRIVIVATNANON, V. 2007. Kinetics of geopolymerization: Role of Al2O3 and SiO2. *Cement and Concrete Research,* 37**,** 512-518.

SINGH, H. & GUPTA, R. 2020. Cellulose fiber as bacteria-carrier in mortar: Self-healing quantification using UPV. *Journal of Building Engineering,* 28**,** 101090.

SU, Y., QIAN, C., RUI, Y. & FENG, J. 2021. Exploring the coupled mechanism of fibers and bacteria on self-healing concrete from bacterial extracellular polymeric substances (EPS). *Cement and Concrete Composites,* 116**,** 103896.

ŞAHMARAN, M., KESKIN, S. B., OZERKAN, G. & YAMAN, I. O. 2008. Self-healing of mechanically-loaded self consolidating concretes with high volumes of fly ash. *Cement and Concrete Composites,* 30**,** 872-879.

TALAIEKHOZANI, A. & ABD MAJID, M. Z. 2014. A review of self-healing concrete research development. *Journal of Environmental Treatment Techniques,* 2**,** 1-11.

TAMMAM, Y., UYSAL, M. & CANPOLAT, O. 2021. Effects of alternative ecological fillers on the mechanical, durability, and microstructure of fly ash-based geopolymer mortar. *European Journal of Environmental and Civil Engineering***,** 1-24.

TANG, D. & TANG, H. 2022. Self-healing diamond/geopolymer composites fabricated by extrusion-based additive manufacturing. *Additive Manufacturing,* 56**,** 102898.

TANYILDIZI, H. 2013. Variance analysis of crack characteristics of structural lightweight concrete containing silica fume exposed to high temperature. *Construction and Building Materials,* 47**,** 1154-1159.

TANYILDIZI, H., ZIADA, M., UYSAL, M., DOĞRUÖZ GÜNGÖR, N. & COŞKUN, A. 2022. COMPARISON OF BACTERIA-BASED SELF-HEALING METHODS IN METAKAOLIN GEOPOLYMER MORTARS. *Case Studies in Construction Materials***,** e00895.

TOBLER, D. J., CUTHBERT, M. O., GRESWELL, R. B., RILEY, M. S., RENSHAW, J. C., HANDLEY-SIDHU, S. & PHOENIX, V. R. 2011. Comparison of rates of ureolysis between Sporosarcina pasteurii and an indigenous groundwater community under conditions required to precipitate large volumes of calcite. *Geochimica et Cosmochimica Acta,* 75**,** 3290-3301.

TREZZA, M. A. & LAVAT, A. E. 2001. Analysis of the system 3CaO·Al2O3–CaSO4·2H2O–CaCO3–H2O by FT-IR spectroscopy. *Cement and Concrete Research,* 31**,** 869-872.

VALENCIA-SAAVEDRA, W. G., MEJÍA DE GUTIÉRREZ, R. & PUERTAS, F. 2020. Performance of FA-based geopolymer concretes exposed to acetic and sulfuric acids. *Construction and Building Materials,* 257**,** 119503.

VAN DEVENTER, J. S. J., PROVIS, J. L. & DUXSON, P. 2012. Technical and commercial progress in the adoption of geopolymer cement. *Minerals Engineering,* 29**,** 89-104.

VAN TITTELBOOM, K. & DE BELIE, N. 2013. Self-healing in cementitious materials—A review. *Materials,* 6**,** 2182-2217.

VAN TITTELBOOM, K., DE BELIE, N., DE MUYNCK, W. & VERSTRAETE, W. 2010. Use of bacteria to repair cracks in concrete. *Cement and Concrete Research,* 40**,** 157-166.

WANG, J., ERSAN, Y. C., BOON, N. & DE BELIE, N. 2016. Application of microorganisms in concrete: a promising sustainable strategy to improve concrete durability. *Applied microbiology and biotechnology,* 100**,** 2993-3007.

WANG, J., VAN TITTELBOOM, K., DE BELIE, N. & VERSTRAETE, W. 2012. Use of silica gel or polyurethane immobilized bacteria for self-healing concrete. *Construction and Building Materials,* 26**,** 532-540.

WIKTOR, V. & JONKERS, H. M. 2011. Quantification of crack-healing in novel bacteria-based self-healing concrete. *Cement and Concrete Composites,* 33**,** 763-770.

XU, J., TANG, Y., WANG, X., WANG, Z. & YAO, W. 2020. Application of ureolysis-based microbial CaCO3 precipitation in self-healing of concrete and inhibition of reinforcement corrosion. *Construction and Building Materials,* 265**,** 120364.

XU, J., WANG, X. & WANG, B. 2018. Biochemical process of ureolysis-based microbial CaCO 3 precipitation and its application in self-healing concrete. *Applied microbiology and biotechnology,* 102**,** 3121-3132.

YAN, S., HE, P., JIA, D., YANG, Z., DUAN, X., WANG, S. & ZHOU, Y. 2016. Effects of treatment temperature on the reduction of GO under alkaline solution during the preparation of graphene/geopolymer composites. *Ceramics International,* 42**,** 18181-18188.

ZHANG, H. Y., QIU, G. H., KODUR, V. & YUAN, Z. S. 2020a. Spalling behavior of metakaolin-fly ash based geopolymer concrete under elevated temperature exposure. *Cement and Concrete Composites,* 106**,** 103483.

ZHANG, Y., YAN, D., HAN, N., AO, Y., CHEN, S., YE, H., FAZLI, H. & YE, T.-N. 2020b. Effects of activator types on degradation mechanisms of metakaolin geopolymer mortars exposed to high temperature. *Journal of Materials in Civil Engineering,* 32**,** 04020369.

ZHANG, Z., PROVIS, J. L., REID, A. & WANG, H. 2014. Geopolymer foam concrete: An emerging material for sustainable construction. *Construction and Building Materials,* 56**,** 113-127.

ZHANG, Z., PROVIS, J. L., REID, A. & WANG, H. 2015. Mechanical, thermal insulation, thermal resistance and acoustic absorption properties of geopolymer foam concrete. *Cement and Concrete Composites,* 62**,** 97-105.

ZHAO, J., ZHENG, J.-J., PENG, G.-F. & SUN, P.-S. 2017. Spalling and cracking modelling of high-performance concrete exposed to elevated temperatures. *Magazine of Concrete Research,* 69**,** 1276-1287.

ZIADA, M., ERDEM, S., TAMMAM, Y., KARA, S. & LEZCANO, R. A. 2021. The Effect of Basalt Fiber on Mechanical, Microstructural, and High-Temperature Properties of Fly Ash-Based and Basalt Powder Waste-Filled Sustainable Geopolymer Mortar. *Sustainability*, 13.

ZIADA, M., TAMMAM, Y. & ERDEM, S. 2022. Research of Alternative Ecological Waste Materials Used in Geopolymers for Sustainable Built Environments. *In:* GONZÁLEZ-LEZCANO, R. A. (ed.) *Urban Sustainability and Energy Management of Cities for Improved Health and Well-Being.* Hershey, PA, USA: IGI Global.