

T.C.

İSTANBUL ÜNİVERSİTESİ-CERRAHPAŞA



DOKTORA TEZİ

GEOPOLİMER HARCIN MİKRO ORGANİZMALAR YARDIMIYLA KENDİLİĞİNDEN İYİLEŞMESİNİN ARAŞTIRILMASI

Berivan POLAT

DANIŞMAN
Doç. Dr. Mucteba UYSAL

II. DANIŞMAN
Dr. Öğr. Üyesi Volkan KORKMAZ

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

İnşaat Mühendisliği Programı

İSTANBUL-2019

Bu çalışma, 26.12.2019 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, İnşaat Mühendisliği Programında Doktora tezi olarak kabul edilmiştir.

Tez Jürisi

Doç. Dr. Mücteba UYSAL(Danışman)
İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa
Mühendislik Fakültesi

Doç. Dr. Savaş ERDEM
İstanbul Üniversitesi Cerrahpaşa
Mühendislik Fakültesi

Dr. Öğr. Üyesi Zeynep BAŞARAN BUNDUR
Özyeğin Üniversitesi
Mühendislik Fakültesi

Prof. Dr. Mehmet Fatih ALTAN
İstanbul Aydın Üniversitesi
Mühendislik Fakültesi

Doç. Dr. Turhan BİLİR
İstanbul Üniversitesi Cerrahpaşa
Mühendislik Fakültesi

,

20.04.2016 tarihli Resmi Gazete'de yayımlanan Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin 9/2 ve 22/2 maddeleri gereğince; Bu Lisansüstü teze, İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa'nın abonesi olduğu intihal yazılım programı kullanılarak Lisansüstü Eğitim Enstitüsü'nün belirlemiş olduğu ölçütlere uygun rapor alınmıştır.

ÖNSÖZ

Doktora sürecim boyunca desteğini esirgemeyen ve sorunlarımı kendi sorunu gibi benimseyerek çözüm arayan danışman hocam Sayın Doç. Dr. Mucteba UYSAL'a sonsuz teşekkürlerimi bildiririm. Tezimin deney aşamalarında bana rehberlik eden, teknik ve psikolojik desteğiyle çalışmalarımın ürüne dönüşmesini mümkün kılan Dr. Öğr. Üyesi Zeynep Başaran BUNDUR'a teşekkürü borç bilirim. Yardımına ihtiyaç duyduğum her an, tüm açık yürekliliğiyle bilgi ve birikimini benimle paylaşan Sayın Doç. Dr. Savaş ERDEM'e şükranlarımı sunarım.

Doktora tezimin deneylerini gerçekleştirebilmem için bana laboratuvarlarının kapısını açan Munzur Üniversitesi Rektörü Sayın Prof. Dr. Ubeyde İPEK'e ve Rektör Yardımcısı Sayın Prof. Dr. Hikmet ESEN'e saygılarımı sunarım. Mikrobiyoloji laboratuvarı mutfağında deneyim kazanmama aracı olan Dr. Öğr. Üyesi Volkan KORKMAZ ve Dr. İlkay ÜNAL'a teşekkür ederim. Tezimin deneylerinde bana yardımcı olan sevgili arkadaşım Arş. Gör. Seval BAYRAM ile öğrencilerim Mert GÜL ve ŞİRİN YILDIZ'a çok teşekkür ederim.

Ayrıca büyük bir özveriyle bu noktaya gelmemi sağlayan, tüm yaşamım boyunca en büyük eğitmenim olan anneme ve sevgili babama, kardeşlik tanımının altını dolduran abilerim Muharrem YILMAZER ve Ümit YILMAZER'e minnetlerimi sunarım.

Sevgili eşim ve meslektaşım Dr. Öğr. Üyesi Alper POLAT'a bu süreçte gösterdiği sonsuz sabrı, sevgisi ve bana kattığı tüm değerler için sevgilerimi sunarım.

Son olarak çocuklarım Alim Toprak ve Ömür Kuzey, küçücük yaşınızda göstermiş olduğunuz bu büyük anlayış için size minnettarım.

Aralık 2019 Berivan POLAT

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ iv
İÇİNDEKİLER v
ŞEKİL LİSTESİ viii
TABLO LİSTESİ xiv
SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ xiv
ÖZET xix
SUMMARY xx
1. GİRİŞ 1
2. GENEL KISIMLAR 3
2.1 BİYOMİNERALİZASYON İLE KALSİYUM KARBONAT PRESİPİTASYONU 3
2.1.1 Bakterilerin Yapısı Ve Çeşitleri 3
2.1.1.1 Fotosentez Yapan Siyanobakteriler 6
2.1.1.2 Denitrifikasyon Yapan Nitrat İndirgeyici Bakteriler 7
2.1.1.3 Amonifakasyon Yapan Mikobakteriler 8
2.1.1.4 Sülfat İndirgeyen Bakteriler 8
2.1.1.5 Üre Hidrolizi Yapan Ürolitik Bakteriler 9
2.1.2 Biyomineralizasyon ile Kalsiyum Karbonat Presipitasyonu 11
2.2 GEOPOLİMER HARÇLAR 17
2.2.1 Polimerleşme Süreci 17
2.2.2 Geopolimerlerizasyon 19
2.2.3 Geopolimer Harçlar İle İlgili Yapılan Çalışmalar 21
2.3 BAKTERİ YARDIMIYLA KENDİNİ İYİLEŞTİREN BETONLAR 27
2.3.1 Betonda Meydana Gelen Çatlaklar 29
2.3.2 Bakterili Beton veya Harçlar ile İlgili Yapılan Çalışmalar 35
3. MALZEME VE YÖNTEM 47
3.1 KULLANILAN MALZEMELER 48
3.1.1 Geopolimer Harç Üretiminde Kullanılan Malzemeler 48
3.1.1.1 Metakaolin 48
3.1.1.2 Cüruf 50
3.1.1.3 Lif… 51
3.1.1.4 Agrega 52
3.1.1.5 Aktivatörler 52

3.1.1.6 Yapı Laboratuvarı Malzemeleri 55
3.1.2 Bakteri Üretiminde Kullanılan Malzemeler 59
3.1.2.1 *Bacillus sporosarcina pasteurii* 59
2.1.2.2 Üre 60
2.1.2.3 Pepton 60
2.1.2.4 Mikrobiyolojik Agar 60
2.1.2.5 Sodyum Klorür 61
2.1.2.6 Kalsiyum Nitrat Tetrahidrat 61
2.1.2.7 Mikrobiyoloji Laboratuvarı Malzemeleri 61
3.2 DENEY SETLERİNİN HAZIRLANMASI VE STANDARTLAR 64
3.2.1 Bakteri Üretimi 64
3.2.2 Geopolimer Harç Üretimi 67
3.2.3 Standartlar 68
3.3 UYGULANAN ÖLÇME YÖNTEMLERİ 69
3.3.1 Mikrobiyolojik Ölçme Yöntemleri 76
3.3.1.1 NaOH - Besi Yeri Titrasyonu 76
3.3.1.2 Bakteri Yoğunluğunun ve Büyüme Eğrisinin Tespiti 77
3.3.1.3 Plaka Sayımı Yöntemi (Breed Yöntemi): 79
3.3.1.4 Bakteri Yoğunluğunun Tahmini (McFarland Yöntemi) 79
3.3.1.5 Bakterilerin Gram Boyama ve Spor Boyama ile Görüntülenmesi 81
3.3.2 Geopolimer Harçta Kullanılan Ölçme Yöntemleri 82
3.3.2.1 Taze Harcın Birim Hacim Kütlesinin Tayini 83
3.3.2.2 Kıvam Tayini (Sarsma Tablası ile Yayılma) Deneyi 84
3.3.2.3 Yığın Yoğunluk, Görünür Porozite ve Su Emme 84
3.3.2. Kılcal Geçirimlilik Deneyi 85
3.3.2.5 Basınç Dayanımı Tayini 86
3.3.2.6 Eğilme Dayanımı Tayini 86
3.3.2.7 Ultrasonik Atımlı Dalga Hızının Tayini 87
3.3.2.8 FTIR Analizi 88
3.3.2.9 SEM VE EDS Analizi 89
3.4 ÖN DENEY SÜRECİNDE YAPILAN İŞLEMLER 69
3.5 ANA DENEY SÜRECİNDE YAPILAN İŞLEMLER 71
4. BULGULAR 90
4.1 ÖN DENEY SÜRECİ BULGULARI 90
4.1.1 Spektrofotometrik Analiz 90

4.1.2 Naoh - Besi Yeri Titrasyonu 91
4.1.3 Geopolimer Harçların Ön Deney Bulguları 91
4.2 ANA DENEY SÜRECİ BULGULARI 97
4.2.1 Fiziksel Ölçümler 97
4.2.2 Görsel Çatlak Kapatma Başarısı 98
4.2.3 Ultrases Ölçüm Sonuçları 107
4.2.4 Kılcal Geçirimlilik Deneyi Sonuçları 108
4.2.5 Basınç ve Eğilme Dayanımları 110
4.2.6 SEM Görüntüleri ve EDS Analizleri 113
4.2.7 FTIR Analizleri 128
5. TARTIŞMA VE SONUÇ 131
KAYNAKLAR 135
ÖZGEÇMİŞ 149

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 2.1: Siyanobakterler aracılığı ile $CaCO_3$ oluşumu. 6

Şekil 2.2: Azot döngüsü. 7

Şekil 2.3: Sülfat indirgeme mekanizması 9

Şekil 2.4: Üre ayrışma yolları (Laidler ve Hoare , 1950) 10

Şekil 2.5: Sporosarcina Pasteurii bakterisinin yapısı ve üreaz enzimi üretim mekanizması (Ha, et al., 2001). 15

Şekil 2.6: GH Taksonomisi. 26

Şekil 3.1: Metakaolin esaslı geopolimer. 49

Şekil 3.2. Kullanılan sentetik lif ve YFC. 52

Şekil 3.3: Farklı molaritelerde hazırlanmış NaOH çözeltileri 54

Şekil 3.4: a) Basınç ve eğilme presi b)Etüv c) Su altı terazisi 55

Şekil 3.5: a) Yayılma tablası b) Vicat aleti. 56

Şekil 3.6: a) Mikser b) Metal kalıp 57

Şekil 3.7: a) ve b) Taramalı elektron mikroskobu. 58

Şekil 3.8: a) FTIR cihazı b) Ultrases geçiş hızı cihazı. 59

Şekil 3.9: a) Otomatik pipet b) Erlen c) Mezür ve pH metre. 62

Şekil 3.10: a) Otoklav b) Distile cihazı 62

Şekil 3.11: a) Çalkalamalı inkübatör b) Spektrofotometri 63

Şekil 3.12: a) Steril kabin b) Optik mikroskop 64

Şekil 3.13: a) Uzun süreli bakteri stoğu b) -80 derece soğutucu 64

Şekil 3.14: a) Besiyerinin hazırlanması b) Santrifüj ile çökeltilmiş bakteri örneği 65

Şekil 3.15: İnkübatörde bakteri kültürü örnekleri. 66

Şekil 3.16: a) Katı agar plakaların hazırlanması b) Ekimi tamamlanmış ağarlar.....67

Şekil 3.17: NaOH titrasyon testinin yapılışı. 69

Şekil 3.18: a) Metakaoline emdirilmiş bakteri b) Distile su içerisine toplanmış bakteri. 72

Şekil 3.19: Bir kısım numunenin 7. gün görüntüsü. 73

Şekil 3.20: Numunelerin pH ve sıcaklık ölçümü. 73

Şekil 3.21: Su emme testi düzeneği. 74

Şekil 3.22: Kür ortamından çıkarılan numunelerin ultrases ölçümü ve çatlaklarının gözlenmesi. 75

Şekil 3.23: $Ca(NO_3)_2$ ilave edilmiş bakterili kür ortamı. 76

Şekil 3.24: Dilüsyon serilerinin hazırlanması. 79

Şekil 3.25: a) Hazırlanan McFarland serileri b)Bakteri sporu yoğunluğunun kıyaslanması. 81

Şekil 3.26: a) Gram boyamada kullanılan boyalar b) Bacillus sporosarcina pasteurii bakterisinin optik 82

Şekil 4.1: *Bacillus sporasarcina pasteurii* bakterisinin büyüme grafiği.....90

Şekil 4.2: Bakteri-NaOH etkileşiminin agar ortamında gözlenmesi.....91

Şekil 4.3: Molariteye bağlı sıcaklık, yayılma ve pH değişimi 92

Şekil 4.4: 1. Seriler için kür tipine göre basınç dayanımı sonuçlarının grafik üzerinde görünümü.....94

Şekil 4.5: Geopolimer harcın kür şartlarına, yayılmaya ve zamana bağlı dayanımı. 95

Şekil 4.6: 2. Seri numunelerin kılcal su geçirimlilik oranları. 96

Şekil 4.7: Numunelerin kür öncesi ve sonrası ağırlık değişimleri. 98

Şekil 4.8: K1 ortam ısısında kürlenen numunenin kür öncesi ve sonrası optik ve fiziksel görünümü.....99

Şekil 4.9: K2 numunesinin kültür içerisinde kürlenme öncesi ve sonrası optik ve fiziksel görünümü.....100

Şekil 4.10: M12-1 numunesinin besiyeri kürü öncesi ve sonrası optik ve fiziksel görünümü. 100

Şekil 4.11: M12-2 numunesinin besiyeri kürü öncesi ve sonrası optik ve fiziksel görünümü. 101

Şekil 4.12: M12-3 numunesinin kültür içerisinde kürlenme öncesi ve sonrası optik ve fiziksel görünümü.....101

Şekil 4.13: M8-1 numunesinin besiyeri kürü öncesi ve sonrası optik ve fiziksel görünümü. 102

Şekil 4.14: M8-2 numunesinin kültür içerisinde kürlenme öncesi ve sonrası optik ve fiziksel görünümü.....102

Şekil 4.15: M8-3 numunesinin besiyeri kürü öncesi ve sonrası optik ve fiziksel görünümü. 103

Şekil 4.16: M4-1 numunesinin kültür içerisinde kürlenme öncesi ve sonrası optik ve fiziksel görünümü.....103

Şekil 4.17: M4-2 numunesinin besiyeri kürü öncesi ve sonrası optik ve fiziksel görünümü. 104

Şekil 4.18: M4-3 numunesinin besiyeri kürü öncesi ve sonrası optik ve fiziksel görünümü. 104

Şekil 4.19: S12-1 numunesinin besiyeri kürü öncesi ve sonrası optik ve fiziksel görünümü. 105

Şekil 4.20: S12-2 numunesinin kültür içerisinde kürlenme öncesi ve sonrası optik ve fiziksel görünümü.....105

Şekil 4.21: S12-3 numunesinin besiyeri kürü öncesi ve sonrası optik ve fiziksel görünümü. 106

Şekil 4.22: S8-1 numunesinin kültür içerisinde kürlenme öncesi ve sonrası optik ve fiziksel görünümü.....106

Şekil 4.23: S8-2 numunesinin besiyeri kürü öncesi ve sonrası optik ve fiziksel görünümü. 107

Şekil 4.24: Numunelerin iyileştirme kürü öncesi ve sonrası ultrases geçiş süreleri değişimi. 108

Şekil 4.25: Numunelerin kür öncesi ve sonrası kılcal su emme yüzdeleri.....110

Şekil 4.26: Numunelerin 7. ve 60. gün basınç dayanımları, basınç dayanımı değişimleri ve eğilme dayanımları. 112

Şekil 4.27: Ultrases geçiş hızı- Basınç Dayanımı korelasyonu.....113

Şekil 4.28: a) Kontrol (K) numunesi 7. gün 4000X SEM görüntüsü b) 70 X SEM görüntüsü c) EDS görüntüleme alanı d) EDS analizi. 114

Şekil 4.29: a) 60 gün kuru ortamda iyileştirme yapılmadan bırakılmış kontrol numunesinin (K-1) 4000X SEM görüntüsü b) 70 X SEM görüntüsü c) EDS görüntüleme alanı d) EDS analizi. 115

Şekil 4.30: a) 60 gün kültürde iyileştirilmiş kontrol numunesinin (K-2) 4000X SEM görüntüsü b) 70 X SEM görüntüsü c) EDS görüntüleme alanı d) EDS analizi. 115

Şekil 4.31: a) M12 numunesi 7. gün 4000X SEM görüntüsü b) 70 X SEM görüntüsü c) EDS görüntüleme alanı d) EDS analizi.....116

Şekil 4.32: a) 60 gün besiyerinde iyileştirilmiş M12-1 numunesi 4000X SEM görüntüsü b) 70 X SEM görüntüsü c) EDS görüntüleme alanı d) EDS analizi. 117

Şekil 4.33: a) 60 gün besiyerinde iyileştirilmiş M12-2 numunesi 4000X SEM görüntüsü b) 70 X SEM görüntüsü c) EDS görüntüleme alanı d) EDS analizi. 117

Şekil 4.34: a) 60 gün bakteri kültüründe iyileştirilmiş M12-3 numunesi 4000X SEM görüntüsü b) 70 X SEM görüntüsü c) EDS görüntüleme alanı d) EDS analizi.....118

Şekil 4.35: a) M8 numunesi 7. gün 4000X SEM görüntüsü b) 70 X SEM görüntüsü c) EDS görüntüleme alanı d) EDS analizi. 119

Şekil 4.36 a) 60 gün besiyerinde iyileştirilmiş M8-1 numunesi 4000X SEM görüntüsü b) 70 X SEM görüntüsü c) EDS görüntüleme alanı d) EDS analizi. 119

Şekil 4.37: a) 60 gün kültürde iyileştirilmiş M8-2 numunesi 4000X SEM görüntüsü b) 70 X SEM görüntüsü c) EDS görüntüleme alanı d) EDS analizi. 120

Şekil 4.38: a) 60 gün besiyerinde iyileştirilmiş M8-3 numunesi 4000X SEM görüntüsü b) 70 X SEM görüntüsü c) EDS görüntüleme alanı d) EDS analizi. 120

Şekil 4.39: a) M4 numunesi 7. gün 4000X SEM görüntüsü b) 70 X SEM görüntüsü c) EDS görüntüleme alanı d) EDS analizi. 121

Şekil 4.40: a) 60 gün bakteri kültüründe iyileştirilmiş M4-1 numunesi 4000X SEM görüntüsü b) 70 X SEM görüntüsü c) EDS görüntüleme alanı d) EDS analizi. 122

Şekil 4.41: a) 60 gün besiyerinde iyileştirilmiş M4-2 numunesi 4000X SEM görüntüsü b) 70 X SEM görüntüsü c) EDS görüntüleme alanı d) EDS analizi. 122

Şekil 4.42: a) 60 gün besiyerinde iyileştirilmiş M4-3 numunesi 4000X SEM görüntüsü b) 70 X SEM görüntüsü c) EDS görüntüleme alanı d) EDS analizi. 123

Şekil 4.43: a) S12 numunesi 7. gün 4000X SEM görüntüsü b) 70 X SEM görüntüsü c) EDS görüntüleme alanı d) EDS analizi. 124

Şekil 4.44: a) 60 gün besiyerinde iyileştirilmiş S12-1 numunesi 4000X SEM görüntüsü b) 70 X SEM görüntüsü c) EDS görüntüleme alanı d) EDS analizi. 124

Şekil 4.45: a) 60 gün bakteri kültüründe iyileştirilmiş S12-2 numunesi 4000X SEM görüntüsü b) 70 X SEM görüntüsü c) EDS görüntüleme alanı d) EDS analizi. 125

Şekil 4.46: a) 60 gün besiyerinde iyileştirilmiş S12-3 numunesi 4000X SEM görüntüsü b) 70 X SEM görüntüsü c) EDS görüntüleme alanı d) EDS analizi. 125

Şekil 4.47: a)S8 numunesi 7. gün 4000X SEM görüntüsü b) 70 X SEM görüntüsü c) EDS görüntüleme alanı d) EDS analizi. 126

Şekil 4.48: a) 60 gün bakteri kültüründe iyileştirilmiş S8-1 numunesi 4000X SEM görüntüsü b) 70 X SEM görüntüsü c) EDS görüntüleme alanı d) EDS analizi. 127

Şekil 4.49: a) 60 gün besiyerinde iyileştirilmiş S8-2 numunesi 4000X SEM görüntüsü b) 70 X SEM görüntüsü c) EDS görüntüleme alanı d) EDS analizi. 127

Şekil 4.50: Kontrol numunesi grubu FTIR analizi sonuçları. 129

Şekil 4.51: M12 numune grubu FTIR analizi sonuçları. 129

Şekil 4.52: M8 numune grubu FTIR analizi sonuçları. 129

Şekil 4.53: M4 numune grubu FTIR analizi sonuçları. 130

Şekil 4.54: S12 numune grubu FTIR analizi sonuçları. 130

Şekil 4.55: S8 numune grubu FTIR analizi sonuçları. 130

TABLO LİSTESİ

Sayfa No

Tablo 2.1: Bakteri gruplarına bağlı mikrobiyal CaCO3 oluşum mekanizmaları.....13

Tablo 2.2: Üreaz üreten bakteriler ile kalsit ve üreaz üretim miktarları.....14

Tablo 2.3: Bakterili beton ile geleneksel betonun basınç dayanımlarının karşılaştırılması. .43

Tablo 3.1: Malzeme ve yöntem bölümünün akışı ve içerikleri.. 47

Tablo 3.2: Metakaolin kimyasal analizi (%). 49

Tablo 3.3: Cürufun kimyasal analizi (%). 51

Tablo 3.4: Sentetik lifin özellikleri.....51

Tablo 3.5: Standart kum granülometrisi ve sınır değerler. 52

Tablo 3.6: Sodyum hidroksitin kimyasal özellikleri.....54

Tablo 3.7: Sodyum Silikatın kimyasal yapısı.....55

Tablo 3.8: *Bacillus sporosarcina pasteurii* bakterisinin genel tanımlama verileri. 60

Tablo 3.9: Harç karışımı oranları (g).....68

Tablo 3.10: Harç karışımı oranları (%).....68

Tablo 3.11: 1. seri örnekler ve kür ortamları. 70

Tablo 3.12: 2. seri örnekler ve kür ortamları. 71

Tablo 3.13: Ana deney numuneleri ve karışım oranları. 72

Tablo 3.14: Numuneler, molariteleri, çatlak genişlikleri ve kür ortamları. 75

Tablo 3.15: Bakteri kültürü- NaOH titrasyonu.....77

Tablo 3.16: McFarland standartı serileri, karışım oranları ve yaklaşık bakteri yoğunluğu değerleri. 80

Tablo 4.1: Reaksiyon ısıları, pH ve priz süreleri. 92

Tablo 4.2: 1. Seriler için kür tipine göre basınç dayanımı sonuçları. 93

Tablo 4.3: 2. Seri için basınç dayanımı, yayılma ve taze harç br hacim ağırlığı sonuçları. ..95

Tablo 4.4: Numunelerin yoğunluk, su emme ve görünür porozite sonuçları. 97

Tablo 4.5: Numunelerin kür öncesi ve sonrası görsel çatlak kapatma durumu (%).....99

Tablo 4.6: Numunelerin kür öncesi ve sonrası ultrases geçiş hızı ölçüm değerleri. 107

Tablo 4.7: Numunelerin 7. gün kür öncesi ve 60. gün kür sonrası kılcal su geçirimlilik miktarları. 109

Tablo 4.8: Numunelerin 7. gün ve 60. gün basınç değerleri ve 60. gün eğilme değerleri...111

SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ

Simgeler	Açıklama
A	: Alan (cm^2)
Al_2O_3	: Alüminyum oksit
AlO_4	: Alüminat
C_2S	: Dikalsiyum silikat
C_3S	: Trikalsiyum silikat
C_3A	: Trikalsiyum alüminat
C_4AF	: Tetrakalsiyum alüminoferrit
CaO	: Kalsiyum oksit
$Ca(OH)_2$	: Kalsiyum hidroksit
$CaCO_3$	: Kalsiyum karbonat
$CaSO_4$	: Kalsiyum sülfat
$Ca_2(PO_4)_2$	: Kalsiyum fosfat
CSH	: Kalsiyum silikat hidrat
CO_2	: Karbondioksit
D	: Silindirik malzemenin çapı
f_c	: Basınç dayanımı, MPa (N/mm2)
f_{cf}	: Eğilme dayanımı, MPa (N/mm^2)
F	: Yük (N)
Fe_2O_3	: Demir Oksit
HCO_3^-	: Bikarbonat
k_c	: Kılcal su emme katsayısı
L	: Mesnet silindirleri arasındaki açıklık
SiO_2	: Silisyum dioksit

SiO_4 : Silikat

m : kütle

Na_2O : Sodyum oksit

NaOH : Sodyum hidroksit

Na_2SiO_3 : Sodyum metasilikat

Na_2SiO_2 : Sodyum silikat

NO_3^- : Nitrat

NO_2^- : Nitrit

NH_3 : Amonyak

NH_2 : Azotdioksit–elementer azot

OH^- : Oksit

P_g : Görünür porozite

Q : t zaman aralığında emilen su miktarı

t : Süre (sn)

V : Hacim

W_K : Kuru numunenin havadaki ağırlığı

W_A : Su ya da sıvı emdirilmiş numunenin su içindeki asılı ağırlığı

W_D : Su ya da sıvı emdirilmiş (doymuş) numunenin havadaki ağırlığı

µm : Mikrometre

ρ_b : Yığın yoğunluk

ρ_{dk} : Doygun katı yoğunluk

ρ_{gk} : Görünür katı yoğunluk

ρ_m : Birim hacim kütlesi

ρ_s : Sıvı yoğunluğu

Ω : Su emme

Kısaltmalar	Açıklama
EDS	: Enerji dağılımlı spektrometri
GH	: Geopolimer harç
SPÇ	: Standart Portland çimentosu
MK	: Metakaolin
M	: Molarite
SEM	: Taramalı elektron mikroskobu
UK	: Uçucu kül
YFC	: Yüksek fırın cürufu
DMSZ	: Deutsche Sammlung von Mikroorganisem und Zellkulturen

ÖZET

DOKTORA TEZİ

GEOPOLİMER BETONUN MİKRO ORGANİZMALAR YARDIMIYLA KENDİLİĞİNDEN İYİLEŞMESİNİN ARAŞTIRILMASI

Berivan POLAT

İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman : Doç. Dr. Mucteba UYSAL

II. Danışman : Dr. Öğr. Üyesi Volkan KORKMAZ

Çimento üretimi neden olduğu büyük çaplı karbondioksit salınımı nedeniyle çevreye büyük zarar vermektedir. Geopolimer beton ise çimentosuz içeriğiyle çevre dostu, durabilite etkilerine daha dayanıklı ve geleneksel betonun yerini almaya hazırlanan yeni nesil bir beton türüdür. Bakteriler ile çimento esaslı betonların iyileştirilmesi (biyobeton, biyomineralizasyon, biyoiyileşme, biyoçimentolaşma) özellikle son birkaç yıldır çalışılmakta olan ve olumlu sonuçlarıyla akademiyi araştırmaya teşvik eden bir alandır. Geopolimer betonun bakteri ile iyileştirilmesi ile ilgili çalışmalar ise literatürde yok denilecek kadar azdır.

Bu tez kapsamında, metakaolin esaslı geopolimer harcın mikroorganizma yardımıyla iyileştirilmesinin detaylı bir araştırması yapılmıştır. Kullanılan bakteri tipi, yaşamsal döngüsü sonucu kalsiyum karbonat çökelmesi sağlayan *Bacillus sporasarcina pasteurii* (DSMZ 33)'dir. Deneysel çalışmalar uygun yöntemle üretilen geopolimer harçta biyolojik iyileşmenin başarılı olduğunu göstermiş, bununla ilgili yöntem ve teknikler ortaya konulmuştur.

Aralık 2019, 170. sayfa.

Anahtar kelimeler: Geopolimer beton, kendiliğinden iyileşme, bakteriyel beton.

SUMMARY

THE INVESTIGATION OF SELF-HEALING OF GEOPLYMER MORTAR BY USING MICROORGANISMS

Ph.D. THESIS

Berivan POLAT

Istanbul University-Cerrahpasa

Institute of Graduate Studies

Department of Civil Engineering

Supervisor : Assoc. Prof. Dr. Mucteba UYSAL

Co-Supervisor : Assist. Prof. Dr. Volkan KORKMAZ

Cement production is causing great damage to the environment due to the large scale CO_2 emissions. Geopolymer concrete is a new generation type of concrete which is environmentally friendly, durable to durability effects and prepared to replace traditional concrete with its cementless content. Improvement of concrete by using bacteria (bio-concrete, biomineralization, bio-healing, bio-cementing) is an area that has been working especially for the last few years and encourages the academy to research with its positive results. However, studies on the self healing of geopolymer concrete with bacteria are negligible in the literatüre.

Within the scope of this thesis, improvement of metakaolin based geopolymer mortar with microorganism was investigated in detail. The type of bacteria used is *Bacillus sporasarcina pasteurii* (DSMZ 33), which provides calcium carbonate precipitation as a result of its life cycle. Experimental studies have shown that the biological healing of geopolymer mortar produced by the appropriate method is successful. In addition, methods and techniques for healing have been introduced.

December 2019, 170. Pages.

Keywords: Geopolymer concrete, self-healing, bacterial concrete.

1. GİRİŞ

Beton son yüzyılda en çok kullanılan yapı malzemesidir. Ancak sıcaklık değişimleri, kürlemenin iyi yapılamaması ya da erken dönemdeki mekanik etkiler gibi pek çok nedenden ötürü betonda çatlaklar meydana gelmektedir. Çatlak oluşan betonda ise geçirimsizlik sağlanamamaktadır. Bu nedenle betonun ömrü boyunca durabilitesinin korunması gerekir. Çatlakların onarımı için ise hızlı ve kolay uygulanabilir yöntemlere ihtiyaç vardır. Böylece yapı ömrü uzatılarak yeniden yapım maliyeti azaltılabilir. Bu nedenle biyomineralizasyon ile geleneksel betondaki çatlakların onarımı, son yıllarda bilim insanları tarafından yoğun olarak araştırılmaktadır.

Diğer yandan standart Portland çimentolu (SPÇ) betonun üretimi sırasında doğaya yüksek oranda karbondioksit salınmaktadır. Bunun yanında maliyet fazlalığı, öz kaynakların tüketimi, onarımının zor olması gibi dezavantajları da mevcuttur. Bu nedenlerle bir yandan geleneksel betonun dezavantajları için çözüm aranırken diğer yandan daha çevreci ve yeni nesil betonların kullanılabilirliği için araştırmalar yapılmaktadır. Geopolimer betonlar (GH) bu noktada geleneksel betonun yerini alabilecek çevreci bir alternatif olarak ortaya çıkmaktadır.

Bu tezin amacı, geopolimer harçta meydana gelen çatlakları biyomineralizasyon ile kapatma potansiyelinin araştırılması ve bu amaca en uygun yöntemin önerilmesidir. Literatürde kalsiyum karbonat ($CaCO_3$) çökelten bakterilerin zemin iyileştirmede ve geleneksel betonda çatlak onarımı yaptığını gösteren çalışmalar mevcuttur. Ancak geopolimer harç ya da betondaki çatlakların bakteri yardımıyla onarımı araştırılması gereken bir konudur.

Bu amaçla tezin ön deneyleri kapsamında, öncelikle harcın matris fazı olan metakaolin (MK), yüksek pH değerine sahip aktivatör ve yaşamsal döngüsü için ortam kısıtları olan bakterinin buluşturulabileceği en doğru yöntem araştırılmıştır. Bunun için ilk olarak farklı kür koşullarında en yüksek basınç dayanımına sahip MK esaslı geopolimer harç karışımı tespit edilmiştir. Daha sonra geopolimer harç üretiminde kullanılan sodyum silikat ($Na_2SiO_{2)}$ ve sodyum hidroksit (NaOH) aktivatörlerinin bakteri canlılığı üzerinde etkileri incelenerek en uygun bakteri üretim ve harç karışım yöntemi tespit edilmiştir. Elde edilen bu veriler

kullanılarak ana deneyler için 5 farklı içerikte, 2 farklı kür ortamında ve farklı çatlak genişliklerinde toplam 16 farklı kombinasyonda numune seti hazırlanmıştır. 7. günde kontrollü eğilme basıncı altında çatlak oluşumu gerçekleştirilmiş ve numune setleri 60. güne kadar bakteriyel ajan içeren ve içermeyen besiyeri sıvısı içerisinde kendiliğinden iyileşmeye bırakılmıştır.

Bu tez çalışması sonucunda MK esaslı geopolimer harçların doğru yöntemler kullanıldığı takdirde herhangi bir kimyasal süreçten geçirilmeden bakteri yardımıyla onarımının mümkün olduğu tespit edilmiş, bunun için gereken en uygun kür ve üretim yöntemleri ortaya konulmuştur.

Bu methodun tüm beton ve betonarme matrisli yapı elemanlarında kullanılabileceği düşünülürse, hem geopolimer betonun kullanımıyla çimento üretiminde çevreye salınan CO_2 engellenecek, hemde bakteriler ile erken dönem çatlakları kapatılarak yapı elemanının ömrü uzatılabilecektir. Böylece daha çevreci, daha güvenli ve daha ekonomik yapı elemanları elde edilebilir. Bunun yanı sıra bakteriyel ajanlarla geopolimer esaslı prefabrik yapı malzemeleri üretilerek bunların çatlak ve istenmeyen yüksek porozite gibi kusurları iyileştirilebilir.

2. GENEL KISIMLAR

2.1 BİYOMİNERALİZASYON İLE KALSİYUM KARBONAT PRESİPİTASYONU

Biyomineralizasyon, canlı bakterilerin mineral üretme sürecidir. Bakteriler dünya yüzeyinde ve dünya yüzeyinin altında çok fazla miktarda bulunurlar. Ancak betonda kullanılan bakterilerin kalsiyum karbonat presipitasyonu yapabilmesi gerekir. Bunun için betonun yüksek alkali ortamına uyum sağlayabilme, spor form oluşturma, oksijen tüketerek çoğalma, küçük boşluklarda yaşayabilme gibi bazı özelliklere sahip olması gerekir. Bakteri yardımıyla kalsiyum karbonat presipitasyonunun anlayabilmek için öncelikle bakterileri ve yapılarını bilmek gerekir.

2.1.1 Bakterilerin Yapısı Ve Çeşitleri

Doğada küresel, çubuksu, spiral gibi farklı şekillerde bulunabilen, birkaç mikrometre uzunluğunda, tek hücreli, prokaryot (hücre çekirdeği bulunmayan) mikroorganizmalara bakteri denir. İlk olarak Antonie van Leeuwenhoek (1976) tarafından görüntülenebilen bakterilerin çoğu ya küresel (coccus) ya da çubuksu (basil) şekilli olur. Virgül (vibrio) veya spiral (spirillum) şekilli olanları da mevcuttur. Bakterilerin bir kısmı patojenik olurken, çoğunluğu hastalık oluşturmazlar.

Bakteriler lipid bir hücre zarı, sitoplazma , ribozom, mezozom, nükleotid (DNA), plazma zarı ve kamçıdan (flagellum) meydana gelir. Bu canlılarda iki tip hücre duvarı mevcuttur. Gram pozitifler peptidoglikan ve teikoik asit tabakasından oluşan kalın hücre duvarı içerirken, gram negatiflerde birkaç peptidoglikan tabakasından oluşan hücre zarı etrafında lipopolisakkaritler ve lipoproteinler içeren ikinci bir hücre zarı bulunur. Bakterilerin büyük çoğunluğu gram negatiftir. Bu tanımlamalar, hücrelerin gram boyasıyla tepkimesine göre ortaya çıkmıştır.

Gram pozitif bakteri cinslerinden bazıları endospor denilen dayanıklı bir forma geçebilirler. Endosporlarda, stoplazma içinde DNA ve ribozom bulunur. Stoplazmanın etrafını korteks tabakası sarar. Dıştan ise su geçirmez ve sert bir tabaka ile sarılıdırlar. Endospor oluşturan bakteriler fiziksel ve kimyasal değişimlere dayanıklı, radyasyondan etkilenmeyen ve bünyesindeki besinle milyonlarca yıl yaşayabilen organizmalardır.

Genel bakteri çeşitliliği, bakterilerin enerji (beslenme) kaynağı olarak kullandıkları elementlere göre değişmektedir. Bu tanıma göre bakteriler enerji kaynağına göre 3 ana tipte sınıflandırılırlar. Fototroflar güneş enerjisini, Litotroflar inorganik bileşikleri, Bacillusların içinde olduğu Organotroflar ise organik bileşikleri enerji kaynağı olarak kullanırlar (Hecker M, 2001).

Mikroorganizmalar tarafından kullanılan bileşikler beş elemente göre ayrışır. Bu elementler kükürt, azot, oksijen, hidrojen ve karbondur. Kükürt, sülfat olarak alınır, sülfid seviyesine düşürülür ve daha sonra biyosentetik amaçlı kullanılır. Bununla birlikte, bu bakterilerin beslenmesi, azaltılmış kükürt bileşiklerinin mevcudiyetine bağlıdır. Metajenik bakteriler sadece sülfür kaynağı olarak hidrojen sülfür varlığında büyür. Tiyobakilli ve bir dizi fototrofik bakteriler, sülfid, elementel kükürt veya tiyosülfatı kullanır, bunlar için elektron vericisi azot gereklidir. Doğal olarak amonyak, nitrat, nitrit, azot içeren organik bileşikler ve moleküler azot şeklinde oluşur. Tercih edilen azot kaynağı, pratik olarak tüm mikroorganizmalar tarafından kullanılabilen amonyaktır. Nitrat ayrıca birçok mikroorganizma tarafından alınır ve kullanılır ancak organik maddelere katılmadan önce, amonyağa indirgenmesi gerekir. Nitrit, nitrat-nitrit solunumunun ve Nitrosomonas ve ilgili türlerin metabolik faaliyetlerinin ürünüdür. Bazı organizmalar onu amonyağa veya N_2'ye indirger. Alternatif olarak, nitrit Nitrobacter türleri tarafından nitrat için oksitlenebilir. Birkaç bakteri moleküler azotu sabitleyebilir ve onu amonyağa indirgeyebilir. Bu kapasite yalnızca belirli prokaryotlarda bulunur, ancak ökaryotlarda bulunmaz. Son olarak, organik bileşikler birçok mikroorganizma için azot kaynağı olarak görev yapar. Genellikle bu bileşikler, amonyağın biyosentezlerde bulunabileceği şekilde indirgenir. Kullanılan organik bileşikler arasında ise CO_2, CO, H_2, H_2S, NH_3, H_2O, O_2, NO_5 ve SO vardır. Organik bileşikler parçalanabilirler. Mikroorganizmalar da bu bozulmada önemli bir rol oynar. Hücrenin ana bileşenleridir. Bu bileşikler mikroorganizmalarda enerji üretimi için önemli substratlardır (Gottschalk, 2012).

Yukarıdaki kimyasal bileşikler solunum yapan organizmalar tarafından enerji kaynağı olarak kullanırlar. Bu tepkimede elektronlar redoks tepkimesi ile substrattan bir son elektron alıcısına taşınırlar. Tepkime sonucu ortaya çıkan enerji ATP sentezinde kullanılır. Oksijenin elektron alıcısı olarak görev yaptığı organizmalara "Aerobik organizmalar", nitrat, sülfat, CO_2 vb inorganik bileşiklerin elektron alıcısı olduğu organizmalara ise "Anaerobik organizmalar"

denir. Anaerobik organizmalar denitrifikasyon, sülfat indirgenmesi ve asetogenez süreçleri ile ekolojiye katkı sağlarlar.

ATP (Adenozin trifosfat) nükleotidi; C, H, O, N ve P içeren, bütün canlı hücrelerinde enerji dönüşümününde aktif olan organik bileşiklerdir. Yapısında adenin, riboz ve üç fosfat grubu içerir. ATP, ADP ve P'den, elektron taşıma fosforilasyonu veya substrat seviyesi fosforilasyonuyla sentezlenir. ATP sentezi için enerji ya fiziksel (hafif) ya da kimyasal enerji olarak sağlanır. Adenin azotlu organik bazı, beş karbon barındıran riboz şekeri ile bağlandığında adenozin yapısı oluşur. Adenozine birinci fosfat grubu bağlandığında adenozin monofosfat (AMP), ikinci fosfat grubu bağlandığında adenozin difosfat (ADP) bileşiği ve 3. grubun bağlanmasıyla da ve adenozin trifosfat (ATP) adı verilir. ATP'nin fosfat grupları arasında yer alan iki bağına "yüksek enerjili fosfat bağı" denir. Bu bağlar kırıldığında enerji açığa çıkar. Canlı hücreler bu enerjiyi hücre içerisinde gerçekleşen metabolik faaliyetlerde kullanır. ATP'nin kimyasal formülü $C_{10}H_{16}N_5O_{13}P_3$ şeklindedir. Bu çalışmada kullanılan ürolitik bakteri de enerjisini yukarıda anlatılan şekilde temin etmektedir.

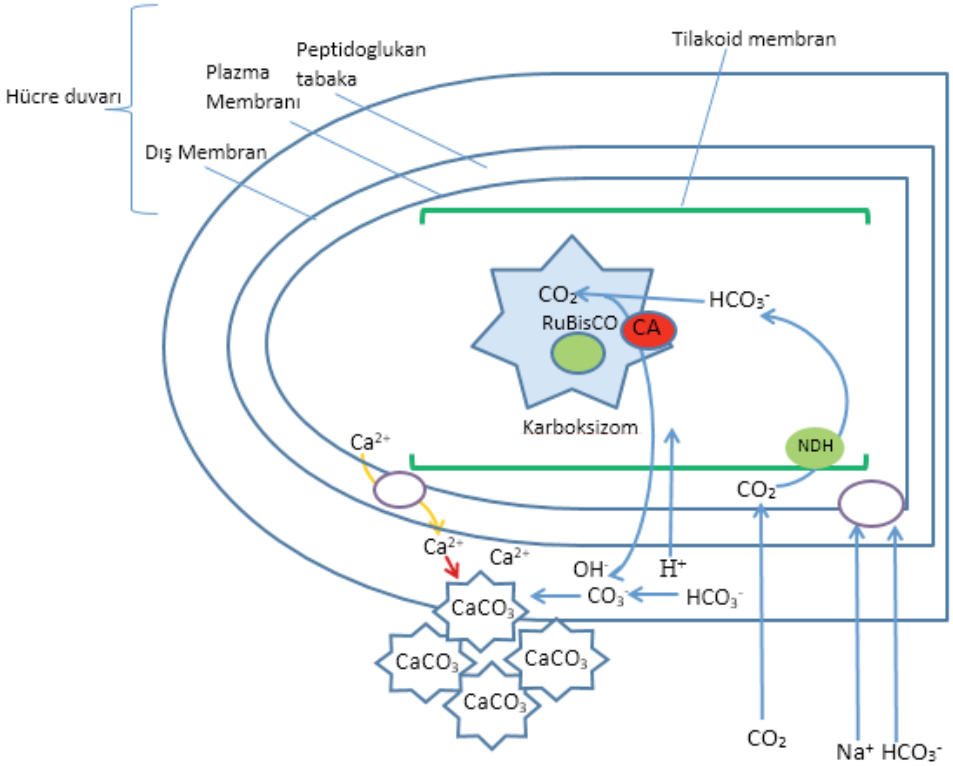
Bakterilerin tamamı eşeysiz üreme ile ikiye bölünerek çoğalırlar. Büyüme aşamaları 3 dönemde gerçekleşir, 1. dönem olan lag fazı, üremeye hazırlandıkları yavaş dönem olarak gerçekleşirken, logaritmik fazda üssel büyüme gerçekleşir. Bu fazda ortaya çıkan jenerasyon zamanı (g) terimi hücre sayısının iki katına çıkma süresidir. Son dönem durağan faz olarak adlandırılır ve bu dönemde organizma tarafından mevcut besinler tüketilerek strese hazırlık dönemi olarak gerçekleştirilir (Hecker M, 2001).

$CaCO_3$ presipitasyonu yapan bakteriler yukarıda verilen parametrelere göre şu şekilde sınıflandırılmıştır.

- Fotosentez Yapan Siyanobakteriler
- Denitrifikasyon Yapan Nitrat İndirgeyici Bakteriler
- Sülfat İndirgeyen Bakteriler
- Üre Hidrolizi Yapan Ürolitik Bakteriler

2.1.1.1 Fotosentez Yapan Siyanobakteriler

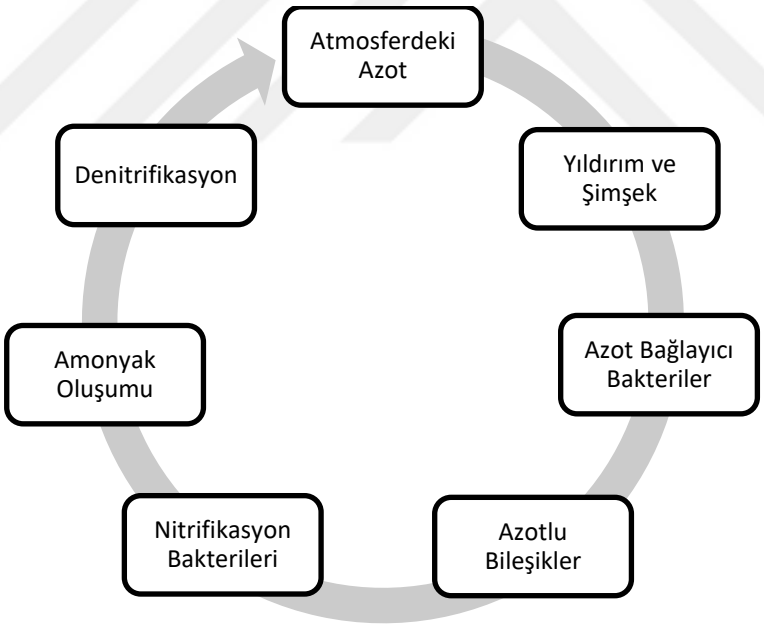
Siyanobakteriler, enerjilerini fotosentez yoluyla sağlayan, mavi renkte, özellikle denizlerde nitrojen döngüsünü sağlayan ototrof bir bakteri türüdür. Klorofil pigmentiyle birlikte mavi renkli fikosiyanin bulundurdukları için mavi renkte görünürler. Hidrojen ve elektron kaynağı olarak H_2O molekülü kullanarak O_2 gazı açığa çıkarırlar (Şekil 2.1). Karada da yaşayabilirler ve bulundukları ortamda $CaCO_3$ oluşumunu sağladıkları bildirilmiştir (Mavromatis ve diğ., 2012), (Rahman ve Halfar, 2014). Bu bakteriler yaptıkları fotosentez nedeniyle HCO^-_3 (bikarbonat) molekülünü CO_2 ve OH^- iyonlarına ayrıştırdığından ötürü ortamın pH'ını artırırlar. Bikarbonat iyonları, ortamda mevcutsa Ca_2^+ iyonları ile bileşik oluşturur ve $CaCO_3$ kristalleri olarak çökelirler (Kamennaya ve diğ., 2012). Vaithiyalingam ve diğ. (2014) yaptıkları çalışmada, Oscillatoriawillei BDU130791 ve Phormidiumvalderianum BDU20041 adlı iki farklı siyanobakter türünü kullanarak sonuçta $CaCO_3$ oluşumu gözlemlemişlerdir.



Şekil 2.1: Siyanobakterler aracılığı ile $CaCO_3$ oluşumu.

2.1.1.2 Denitrifikasyon Yapan Nitrat İndirgeyici Bakteriler

Atmosferin %78' i azottan meydana gelir. Azot ise canlılardaki temel besin maddelerinden biridir. Hem canlı hem de ölü organizmalarda bulunan azot, "azot çevrimi" denilen bir döngü içinde doğada sürekli dolanım halindedir. Biyolojik denitrifikasyon da bu çevrimin önemli aşamalarından biridir (Uslu ve Türkman, 1987). Bu döngü Şekil 2.2'de verilmiştir. Kısaca NO_3^- (nitrat) ve NO_2^- (nitrit) bileşiklerinin anaerobik koşullarda bakterilerce önce NH_3 (amonyak)'a, sonra NO_2 (azot dioksit–elementer azot)'e indirgenmesine denitrifikasyon (nitrat solunumu) denir. Bu reaksiyon dizisinde NH_3 öncelikle Nitrosomonas ve Nitrosococcus cinsi bakteri cinsleri tarafından H^+ iyonları tüketilerek OH^- iyonları üretilmekte, buna bağlı olarak ortamın pH'ı yükselmeye başlamaktadır. Bu reaksiyonun çıktısı olan CO_2, ortamdaki Ca_2^+ ve OH^- iyonları ile reaksiyona girmekte, sonuçta $CaCO_3$ kristalleri oluşmaktadır (Del Río ve diğ., 2015) (Ivanov ve Chu, 2008).



Şekil 2.2: Azot döngüsü.

Beton dayanımının artırılması ve endüstriyel atıkların uzaklaştırılması içinde iki farklı denitrifikasyon yapan bakteri denenmiş, Pseudomonasaeruginosa ve Diaphorobacternitroreducens bakterilerinin $CaCO_3$ kristalleri oluşturduğu görülmüştür (Erşan ve diğ., 2015).

2.1.1.3 Amonifakasyon Yapan Mikobakteriler

Mikobakteriler, aside dirençli, çubuklar halinde, hareketsiz, sporsuz, kapsülsüz ve aerobik özelliğe sahip mikroorganizmalardır. Amonifikasyon ise amonyak meydana getirmek üzere aminoasitlerden amino grubunun çıkarılması olayıdır. Bu işlem aracılığıyla bitki, hayvan veya diğer atıklardaki aminoasit proteinlerinin yıkımıyla NH_3 (amonyak) meydana gelir (Denklem 2.1).

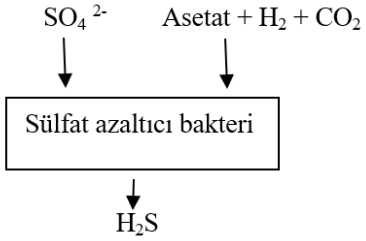


(2.1)

Amonyak ortamın pH'ını artırır ve CO_3^- (karbonat) iyonları ile Ca_2^+ iyonları birleşir ve $CaCO_3$ çökeltisi oluşturur (Al-Thawadi, 2011). *Myxococcus xanthus* bakterisi amonifikasyon yapmakta olup, ortam pH'ını 8 den 8,7 ye kadar yükseltirken, boşluk dağılımının %24-%32'den, %24-%26 oranına kadar azalttığı gözlenmiştir (Rodriguez-Navarro ve diğ., 2003). Başka bir çalışmada ise, *Myxococcus xanthus* ile meydana gelen karbonat çökelmesinin ortamdaki uranyum radyoaktifini arındırdığı bildirilmiştir (Jimenez-Lopez ve diğ., 2007).

2.1.1.4 Sülfat İndirgeyen Bakteriler

Sülfat indirgeyen bakteriler, yaygın olarak toprak, su, nehir suyu, yeraltı boru hatları ve petrol ve gaz kuyuları ve diğer anoksik ortamlarda bulunan bir anaerobik mikroorganizmadır. Bu bakteriler ortalama 30-40°C (max 55-60) sıcaklıkta ve pH 7-8 aralığında yaşayabilirler. Bu bakteriler sülfat iyonlarını kullanarak asidik ve toksik bir ürün olan hidrojen sülfür (H_2S) oluşturmakta, çok az ya da hiç oksijen bulunmayan ortamlarda enerji üretmek içinde hidrojen sülfürü kullanmaktadırlar. Böylece sülfat ve karbonlu bileşikleri HCO_3^- (bikarbonat) ve SO_3^{2-} 'e (sülfit) dönüştürmektedir (Şekil 2.3) Bikarbonat kararsız bir bileşik olduğundan karbondioksit ve oksit iyonlarına ayrılmakta, böylece ortam pH'ı artarak karbonat çökelmesi meydana gelmektedir.



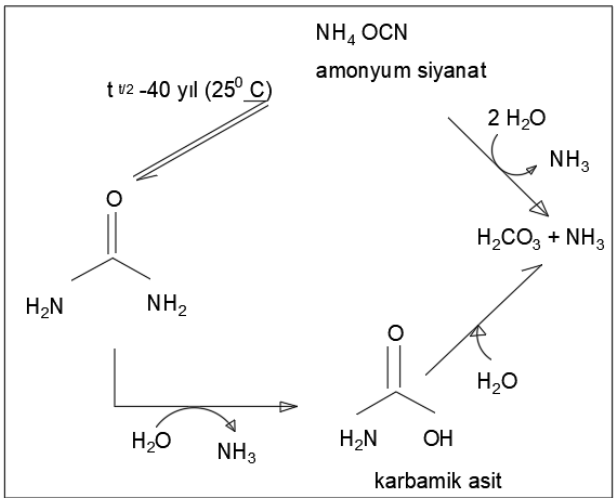
Şekil 2.3: Sülfat indirgeme mekanizması

2.1.1.5 Üre Hidrolizi Yapan Ürolitik Bakteriler

Ürolitik bakteriler, üre hidrolizi gerçekleştirerek enerji sağlamakta ve ayrışmış üre biyokimyasal reaksiyonlar sonucu $CaCO_3$ ürününü vermektedir. Bu mikroorganizmalar, toprak dâhil olmak üzere hemen hemen tüm ekosistemlerde bulunmaktadırlar.

Azot (N), tüm organizmalar için temel bir makro besindir ve proteinlerin, DNA'nın ve diğer önemli biyolojik moleküllerinin oluşumunda gereklidir. Azot içerikli organik bir bileşik olan ürenin (CH_4N_2O) molar kütlesi yaklaşık 60 gram ve erime sıcaklığı da 133°C'dir.

Şekil 2.4'de ürenin ayrışma yolları gösterilmektedir. Alttaki yol, biyolojik olarak hızlı üreaz ile katalize edilen üre hidrolizini gösterir. Üre katalize edilen reaksiyonun yarılanma süresi, 25°C'de sadece 20 ms'dir ve bugüne kadar bilinen en yetkin enzimlerden birini üretmektedir (Laidler ve Hoare , 1950), (Estiu G ve Merz , 2004), (Callahan ve diğ., 2005). Üst yol ise, sulu çözeltide ürenin çok yavaş, katalize edilmemiş eliminasyon reaksiyonunu gösterir. Üre, 25 ° C'de yaklaşık 40 yıllık yarı ömrü (t½) olan çok kararlı bir moleküldür ve bu nedenle, çözelti içinde kendiliğinden hidrolize olmaz (Shaw ve Bordeaux , 1955), (Callahan ve diğ., 2005). Bununla birlikte, enzim üreaz, bir üre molekülünün hidrolize edildiği bir reaksiyonu katalize ederek, iki amonyak molekülü (NH_3) ve bir karbonik asidi (H_2CO_3) karbamik asit (H_3CNO_2) oluşumuyla meydana getirir. Bu nedenle, ürenin (NH_3) hidrolizinin önemli ve uygun bir oranda meydana gelmesi için üreaz mevcut olmalıdır (Mobley ve Hausinger, 1989), (Mobley ve diğ., 1995), (Krajewska, 2009). Her iki yoldaki son adım da çok hızlı ve kendiliğinden ortaya çıkar. Her iki bozunma yolunun sonucu, bir molekül üre molekülünden iki molekül amonyak ve bir karbonik asit molekülünün oluşmasıdır.



Şekil 2.4: Üre ayrışma yolları (Laidler ve Hoare , 1950).

Mikrobiyal olarak uyarılan kalsit çökeltisi, kalsiyum karbonat oluşumunun gerçekleşeceğini ifade eder ve sonunda oluşan $CaCO_3$ kullanılan malzemelerin yüzeylerinde birikir. Kalsit bir karbonat mineralidir. $CaCO_3$'ün diğer birçok polimorfları arasında, kalsit termodinamik olarak en kararlı olanıdır (Kladi ve diğ., 2002). Mikrobiyal kalsit çökeltisi, kalsitin biyokimyasal reaksiyonlarında biyo-çökelmeye katkıda bulunan önemli bir üründür. Üreden kalsiyum karbonat oluşum mekanizması kısaca şu şekildedir: Üreaz-pozitif bakteriler tarafından gerçekleştirilen kimyasal reaksiyonlar sonucu amonyak ve karbondioksit oluşur, bu sürece üre hidrolizi denir. Üre hidrolizinden çıkan bu ürünler pH değerini artırır ve böylece ortamı alkali hale gelir. Alkalite artışı ile birlikte, negatif yüklü bakteriyel hücre duvarı, dışarıdan sağlanan besin çözeltisindeki pozitif yüklü kalsiyum iyonlarını çekerek kalsit çökeltisi meydana getirir, başka bir deyişle $CaCO_3$'ün biyolojik olarak çökelmesi gerçekleşir (Castanier ve diğ., 2000) , (De Muynck ve diğ., 2010). Sonuçta kalsiyum karbonat, bakterinin çekirdeklenme bölgelerinde biriktirilir ve çatlakları ve gözenekleri kapatır.

Üreden alkalofik mikroorganizmalar yardımıyla kalsiyum karbonat oluşma mekanizmasının tamamı ise Denklem 2.2 ve 2.7 arasında gösterilmektedir. Üreaz enzimi mikroorganizma tarafından üretilir. Üre ve üreaz biyokimyasal reaksiyona girmekte, sonuçta 1 mol NH_3 (amonyak) ve 1 mol NH_2COOH (karbamik asit) oluşturmaktadır (Denklem 2.2).Bunlar da herhangi bir işleme gerek duymadan 1 mol NH_4^+ (amonyum)ve 1 mol karbonik asite (H_2CO_3) dönüşmektedir (Denklem 2.3). Bu reaksiyon sonucu oluşan amonyum ve karbonik asit kolayca ayrışabilir özelliktedir. Bu nedenle karbonik asit) HCO_3^- (bikarbonat) ve H^- iyonlarına ayrışır

(Denklem 2.4), amonyak ise H_2O ile birleşir ve 2 mol NH_4^+ ve 2 mol OH^-'e ayrışmaktadır (Denklem 2.5). Bu işlemler sırasında pH artmakta, bunun sonucunda da öncelikle ortamdaki pozitif yüklü Ca^{+2} molekülleri negatif yüklü bakteri hücresi ile birleşmektedir (Denklem 2.6). Son olarak ise bu alkali ortam içinde ayrışma sonucu oluşmuş HCO_3^- iyonları bu yapıyla birleşip karbonat oluşturmaktadır (Denklem 2.7) (Hall-Stoodley ve diğ., 2004) (Patro Sanjaya ve diğ., 2015). Üreden alkalofik mikroorganizmalar yardımıyla kalsiyum karbonat oluşma mekanizmasının reaksiyonları sırasıyla şu şekildedir:

$$CO(NH_2)_2 + H_2O \longrightarrow NH_2COOH + NH_3 \quad (2.2)$$

$$NH_2COOH + H_2O \longleftrightarrow NH_3 + H_2CO_3 \quad (2.3)$$

$$H_2CO_3 \longleftrightarrow HCO_3^- + H^+ \quad (2.4)$$

$$2NH_3 + 2\,H_2O \longleftrightarrow NH_4 + 2OH^- \quad (2.5)$$

$$Ca^{2+} + \text{Hücre} \longleftrightarrow \text{Hücre} + Ca^{2+} \quad (2.6)$$

$$\text{Hücre} + Ca^{2+} + CO_3^{2-} \longrightarrow \text{Hücre} - CaCO_3 \quad (2.7)$$

Çözelti içindeki NH_3 ve NH_4^+ arasındaki denge noktası, çözeltinin pH'ına bağlıdır. Nötr veya bazik pH'ta (pH> 7), NH_3 oluşacak ve emisyon yoluyla kaybolacaktır (pH 9.3'te NH_3 formunda yaklaşık %50). Asidik pH'ta (pH<7), NH_3'ün çoğu, buharlaşamayan katyonik amonyuma dönüştürülür (pH 5,5'te ve NH_4^- formunda yaklaşık %99) (Alderighi ve diğ., 1999). Yapılan bir çalışmada ürenin kullanımı esnasında ki dönüşüm pH değerinin yükselmesine sebep olduğu belirtilmiştir (Dejong ve diğ., 2006).

2.1.2 Biyomineralizasyon ile Kalsiyum Karbonat Presipitasyonu

İnorganik dokuların bozunması ve parçalanması sürecine mineralizasyon, organik dokuların bozunması ve parçalanması sürecine ise humifikasyon denir. Mineralizasyon kısaca organik maddelerin kendilerini oluşturan inorganik maddelere dönüşmesi olarak da belirtilmiştir (Ståhlberg ve diğ., 2006). Mineralizasyon döngüsü doğada kendi kendine gerçekleşmektedir. Biyomineralizasyon ise canlı organizmaların oluşturduğu tüm ya da kısmî mineralleşmeye verilen isimdir. Bakteriyel $CaCO_3$ çökelmesi, bir biyomineralizasyon işlemidir. Biyomineralizasyon bir mineral nükleasyonuna (çekirdeklenmesine) ve mineral ürünlerin

büyümesine yol açan ve biyolojik olarak aracılık edilen bir süreçtir (Tang ve Dove, 1997) (Lowenstam ve Weiner, 1989). Yapılan bir çalışmada iki biyomineralizasyon modu tanımlanmıştır: Biyolojik olarak indüklenen biyomineralizasyon (BIB) ve sınırları belirlenmiş biyomineralizasyon (BOB) (Lowenstam , 1981). BIB'de bir organizma, yerel mikro çevresini, minerallerin kimyasal çökeltilmesi için uygun koşulları sağlayarak değiştirir, böylece biyomineraller, doğrudan hücresel yapılarla ilişkili değildir. BOB'de bir organizma, içinde veya üzerinde inorganik parçacıkların yetiştirildiği organik matris üretir, bu nedenle BOB sırasında hücre içi veya hücre duvarı üzerinde bir nükleasyon gözlenir (Mann, et al., 1989). Biyomineralizasyon döngüsü sonucu meydana gelen biyopolimerler düzenli alt ünitelerden oluşmaktadır. Bu biyopolimerlerin en önemlileri kalsiyum iyonu (Ca_2^+) ile oluşturulan $CaSO_4$ (kalsiyum sülfat), $Ca_3(PO_4)_2$ (kalsiyum fosfat), $CaCO_3$ (kalsiyum karbonat) gibi mineralli bileşiklerdir (Knoll, 2003). Biyomineralizasyon sürecinde etkili olan kristal nükleasyonu, faz, kristal morfolojisi ve kristallerin büyüme dinamiği bu biyopolimer yapılarca denetlenmektedir. (Kalaiselvi ve diğ., 1999).

Bakteriler ile $CaCO_3$ çökelmesinin yapıldığı reaksiyonlar denklem 2.8 ve 2.9'da gösterilmiştir. Bu noktada bakteriyel üreaz miktarı ve aktivite derecesi bu oluşum için son derece önem sarfetmektedir (Wang ve diğ., 2016).

Bakteriyel üreaz oluşumu şu şekildedir:

$$Ca(NH_2)_2 + 2H_2O \longrightarrow 2NH_4^+ + CO_3^- \quad (2.8)$$

$$Ca^{+2} + CO_3^{-2} \longrightarrow CaCO_3 \quad (2.9)$$

Alkali ortamdaki organik bileşenleri parçalayarak CO_2 ve H_2O'ya dönüştürebilen bakteri grupları aynı zamanda çimentolu sistemlerde de kullanılmaktadır. CO_2 pH'ı yüksek ortamlarda kolaylıkla CO_3^-'e dönüştürülür ve ortamda Ca^{+2} iyonu bulunduğunda da $CaCO_3$ çökelmesi gerçekleşir.

Bacillus cohnii, Bacillus pseudofirmus ve *Bacillus alkalinitrilicus* suşları ile yapılan çalışmalarda asetat ve laktat gibi organik bileşenlerin oksidasyonu ile $CaCO_3$ presipitasyonu tetiklenmiş ve umut verici sonuçlar elde edilmiştir (Jonkers ve diğ., 2010), (Wiktor ve Jonkers, 2011).

Reaksiyon prosesi denklem 2.9, 2.10 ve 2.11'de verilmiştir:

$$CH_3COO^- + 2O_2 \longrightarrow HCO_3^- + CO_2^+ \quad (2.10)$$

$$CO_2^+ + H_2O \longleftrightarrow H^+ + HCO_3^- \longleftrightarrow 2H^+ + CO_3^{-2} \quad (2.11)$$

$$2H^+ + CO_3^{-2} + 2OH^- + Ca^{+2} \longrightarrow CaCO_3 \quad (2.12)$$

Mikroorganizmalar tarafından yapılan karbonat çökeltisinin farklı yolları vardır.

- Amonifikasyon: Mikobakteriler tarafından,
- Sülfat indirgenmesi: Sülfat indirgeyen bakteriler tarafından,
- Fotosentez: Siyanobakter ve Alglar tarafından,
- Denitrifikasyon: Nitrat indirgeyen bakteriler tarafında $CaCO_3$ n,
- Üre hidrolizi: Üreolitik bakteriler tarafından gerçekleştirilir.

Araştırmacılar bu mekanizmaları oluşturan bakterileri genel olarak aşağıdaki gibi gruplamışlardır (Tablo 2.1). (Dhami ve diğ., 2013), (Achal ve diğ., 2015).

Tablo 2.1: Bakteri gruplarına bağlı mikrobiyal CaCO3 oluşum mekanizmaları.

BAKTERİ GRUBU	BAKTERİ ÇEŞİTLERİ	METABOLİZMA	REAKSİYON	YAN ÜRÜN
Siyanobakter ve Alg	*Nostoccalcicola Oscillatoriawillei Anabaenacycadae BacillusPasteurii*	Fotosentez	$2HCO^-_3+Ca_2^+ \rightarrow CH_2O + CaCO_3 + O_2$	O_2, CH_2O
Nitrat İndirgeyen Bakteriler	*Nitrosomonas*türleri *Nitrobakter*türleri	Denitrifikasyon	$CH_2COO^-+2,6H^++1,6NO^-3 \rightarrow 2CO_2+0,8N2 + 2,8H2O$ $Ca2^+ + CO2 + 2OH \rightarrow \mathbf{CaCO_3} + H_2O$	CO_2^+ N_2, NO^+ N_2O
Miksobakteriler	*Myxococcusxanthus Desulfovibriodesulf.*	Amonifikasyon	$NH3+H2O \rightarrow NH4^+ + OHCa2^+ + HCO_3 \rightarrow \mathbf{CaCO_3} + H^+$	NH_3
Sülfat İndirgeyen Bakteriler	*Desulfobacterium autotrophicum*	Sülfat İndirgenmesi	$SO_4^2 + 2[CH_2O] + OH^- + Ca^{2+} \rightarrow \mathbf{CaCO_3} + CO_2 + 2H_2O + HS$	$HSCO_2$ HS^-
Ürolitik Bakteriler	*Bacillussphaericus Bacillusmegaterium Diaphorobacter nitroreducens*	*Üre hidrolizi*	$CO(NH_2)_2+2H_2O+Ca2^+ + Cell \rightarrow 2NH_4^+ + Cell\text{-}\mathbf{CaCO_3}$	NH_4^+

Bakterilerin büyük çoğunluğu kalsit çökeltimi yapmakta iken, sülfat indirgeyen *SRB isolate LVform6 ve UnspecifiedSRB's* bakterisi gibi dolomit çökelten veya farklı türde bileşikler çökeltebilen bakterilerin mevcudiyeti bilinmektedir (Castanier ve diğ., 1999).

Kalsiyum karbonat yeryüzündeki en yaygın minerallerden biridir. Çökelmesi oldukça yaygındır, doğal kayaçlar oluşturur ve deniz suyu, tatlı su ve topraklar gibi ortamlarda bulunur (Ehrlich, 1998) (Castanier ve diğ., 1999).

Betonda kullanılabilecek ve $CaCO_3$ presipitasyonu yapan bakteriler anaerobik ya da aerobik bakteriler olabilir. Anaerobik bakteriler, oksijensiz yaşama, iş görme ve büyüme becerisi olan bakterilerdir ve betonun basınç dayanımını %25-%30 oranında artırabilir (Mohanadoss ve diğ., 2015). Aerobik bakteriler ise büyümek ve çoğalmak için oksijen kullanan bakterilerdir. Kendini iyileştiren betonda şu ana kadar kullanılan ve sonuç veren aerobik bakterilerin başlıcaları *Bacillus sporasarcina pasteurii, Bacillus sphaericus, Escherichia coli, Bacillus subtilis, Bacillus cohnii, Bacillus pseudofirmus, Bacillus halodurans ve Bacillus massiliensis*'dir.

Tablo 2.2'de üreaz aktivitesi ve kalsit oluşturma kapasiteleri açısından günümüze kadar araştırılmış bazı bakterilerin karşılaştırılması verilmiştir (Anbu ve diğ., 2016).

Tablo 2.2: Üreaz üreten bakteriler ile kalsit ve üreaz üretim miktarları.

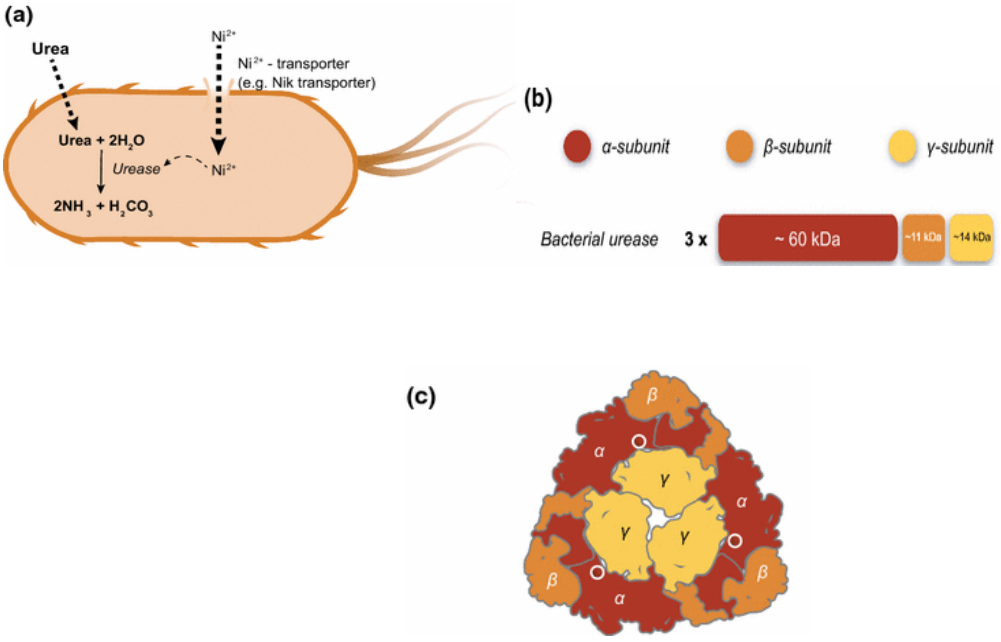
BAKTERİ	İZOLASYON BÖLGESİ	ÜREAZ AKTİVİTESİ	KALSİT ÇÖKELMESİ	REFERANSLAR
Bacillus sp. CR2	Maden atık toprağı, Urumqi, China	432 U/ml	2,32 mg/cell	Achal ve Pan (2014)
L. sphaericus CH5	Terkedilmiş maden alanı, Gangwondo, Korea	–	980 mg/100 ml	Kang vd. (2014)
SporosarcinaPasteurii	Fenotipik mutant suş	550 U/ml	–	Achal vd. (2009)
B. Pasteurii NCIM 2477	NCIM'den elde edilen kültür, Pune, India	18 U/ml	–	Sarada vd. (2009)
K. flava CR1	Maden cevheri tozu, Urumqi, China	472 U/ml	–	Achal vd. (2011)
B. megateriumSS3	Kalkerli toprak, Andhra Pradesh, India	690 U/ml	187 mg/100 ml	Dhami vd. (2013, 2014)
B. thuringiensis	Kalkerli toprak, Andhra Pradesh, India	620 U/ml	167 mg/100 ml	Dhami vd. (2013)
Halomonassp. SR4	Maden artığı, China	374.5 U/ml	–	Achal vd. (2012)

Bacillus sporasarcina pasteurii bakterisi:

Bacillus grubu, üreaz ve kalsit üretimi için kullanılan yaygın bir bakteri türüdür. Bu kategoride en çok kullanılan bakteriler *Bacillus sphaericus*, *Bacillus sporasarcina pasteurii* ve *Bacillus megaterium* türü bakterilerdir.

Lloyd ve Sheaffe (1973) tarafından yapılan bir çalışmada, altı toprak örneğinden izole edilen bakterilerin %17-%30'unun üreaz ürettiği saptanmıştır. En yaygın ve ilk olarak çalışılan ülseratif toprak bakterilerinden biri (Geleneksel olarak *Bacillus sporasarcina pasteurii* diye bilinmektedir.) Sporosarcina Pasteurii'dir (J. Larson ve Kallio, 1954), (Burbank ve diğ., 2012), (Li ve diğ., 2013). Bu bakteri türü, ağır metallerin ve radyonüklidlerin iyileştirilmesi, betonda çatlakların giderilmesi ve toprak iyileştirme gibi çoklu uygulamalar için kullanılan ana organizmadır (Whiffin ve diğ., 2007), (Sarada ve diğ., 2009), (Gorospe ve diğ., 2013), (Li ve diğ., 2013).

Sporosarcina Pasteurii, diğer üreazlar için üreaz üretmektedir. Üreaz üretimi, çoğu bakteri için pH veya mevcut nitrojen gibi çevresel faktörlere cevap olarak düzenlenmektedir (Mobley ve diğ., 1995) ve üreolitik bakterilerde yaygın olarak sitoplazmada yer almaktadır (Şekil 2.5a). α, β ve γ olarak adlandırılan üç alt birimden oluşur (Şekil 2.5b, c) (Ha, et al., 2001).



Şekil 2.5: Sporosarcina Pasteurii bakterisinin yapısı ve üreaz enzimi üretim mekanizması (Ha, et al., 2001).

Sporosarcina Pasteurii aşırı koşulları tolere edebilen, büyüme için optimum pH'ı 9 olan, patojenik olmayan ve endospor üreten bir bakteridir. Buna göre, birçok araştırmacı mikrobiyal indüklenmiş karbonat presipitasyonu (MICP) için bu suşu geniş çaplı olarak araştırmıştır (Bang ve diğ., 2001), (Hammes ve diğ., 2003), (Mitchell ve Ferris, 2005), (Achal ve diğ., 2009), (Okwadha ve Li, 2010), (Tobler ve diğ., 2011), (Qabany ve diğ., 2012), (Gorospe ve diğ., 2013). Bang ve diğ. (2001) çimentolu sistemlerde bakteriyel iyileştirme mekanizmasını ilk kez araştıran kişilerdir (Bang, Ramachandran ve diğ., 2001). B. Pasteurii hücreleri, besin ortamı bileşenleri ve kum karışımı ile harç küplerinde yapay olarak oluşturulmuş çatlakları (en= 3,175 mm, derinlik = 9.525 mm) manuel olarak doldurmuştur. Ardından, örnekler üre-$CaCl_2$ ortamında 28 gün süresince kürlenmiştir. Örneklerin çatlakları biyokarışım ile dolmuş ve bakteri miktarına bağlı olarak bakterisiz kontrollerle karşılaştırıldığında %10-%27 oranında basınç dayanımında artış göstermiştir (Ramakrishnan ve diğ., 2001). Çatlak onarımının sadece yüzeydeki çatlaklarda başarılı olduğunu dipte kalan çatlakların organizmanın gerekli besin ortamı bileşeni ve Ca^{+2} olan erişimi kısıtlandığından ve oksijen azaldığından daha dipte yer alan çatlaklarda iyileşme olmamıştır. Yazarlar bunun sebebi olarak çatlağın yüzeyinde oluşan ilk $CaCO_3$ kristallerinin bakteri için oksijene erişimi engellemesinden kaynaklandığı yorumunu yapmıştır. Literatüre bakıldığında vejetetatif bakterilerin veya sporların beton içerisine çimento hamuru için kullanılan suyla birlikte, belirli oranlarda besin ve $CaCO_3$ öncülerini de içerecek şekilde karıştırıldığı görülmektedir (Basaran, 2013), (Jonkers ve diğ., 2010).

Bakteriler her ne kadar betonun alkali ortam şartlarına uygun olarak seçilse de maksimum pH=9 seviyelerinde yaşayan ve vejetatif formda çimento hamuruna eklenen bacillus suşlarının betonun pH>12 ortamında uzun süre canlılığını koruyamadığı yapılan pek çok araştırma ile ortaya konulmuştur. Bu durumda; çalışmalar bakterilerin yalnızca vejetatif formları üzerinde değil, endospor ve kapsüllü formları üzerine de yoğunlaşmıştır.

Endospor formdaki bakteriler uygun olmayan şartlar ile karşılaştığında sitoplazma yüzeyini minimuma indirip, metabolizma hızını düşürerek spor formunu alır. Ancak endospor formda kullanılsalar dahi kullanılan bakteriler çimentonun hidratasyonu sırasında boşlukların hidratasyon ürünleriyle dolması sonucunda boşluk çapı yetersizliğinden yine canlılıklarını yitirir. Bakteri sporlarının boyutlarının yaklaşık 1.5-2 µm olduğu bilinmekte ve hidratasyon sonucu boşluk çapları 1µm'ye kadar düşmektedir (Jonkers ve diğ., 2010). Bakteri yaşamına etki eden tüm bu olumsuzlukları gidermek için sporların çeşitli polimerler, hidrojeller, silika,

zeolit ve benzeri malzemeler ile bakteri enkapsülasyonunun yapılması yoluna gidilmiştir. (De Muynck ve diğ., 2008), (Wang ve diğ., 2012), (Wang ve diğ., 2016). Poliüretan kullanımı bakteri enkapsülasyonunda su geçirmeyen ve sıklıkla kullanılan bir malzemedir (Bang ve diğ., 2001), (Bachmeier ve diğ., 2002). Ancak poliüretanın bakterilerin ihtiyacı olan ortama ulaşması için difüzyon kısıtları oluşturması dezavantajdır (Basaran, 2013).

2.2 GEOPOLİMER HARÇLAR

Hava kirliliğine yol açan sera gazlarının en önemlilerinden birisi de %7'lik oranla karbondioksit gazıdır. Çimento üretimi ise karbondioksit salınımına sebep olan ana unsurlardan birisidir. Bu bağlamda bugünkü üretim teknikleri göz önüne alındığında, inşaat sanayisi sürekli olarak çevreye zarar veren bir sektördür. Son yıllarda yeşil çevre konseptiyle birlikte yenilenebilir enerji sistemlerinin kullanımı, var olan kaynakların daha az tüketimi, çevreye daha az zararlı atık salımı gibi konular önem kazanmaktadır. Böylece çevre dostu malzemelerle ilgili yapılan bilimsel araştırmalar da yoğunluk kazanmaya başlamıştır. Buna paralel olarak inşaat sektöründe de çimentonun yerini alabilecek yeni malzemelerin üretimi araştırılmaya başlanmış ve çimentosuz beton adı altında anılan geopolimer betonlar piyasaya sürülmeye başlanmıştır.

Geopolimer betonları anlamak için öncelikle polimerleşme süreci ve geopolimerizasyon hakkında bilgi sahibi olmak gerekir.

Doğada bulunan minerallerin kimyasal bileşimleri ve kristal yapıları farklı teknikler ile değiştirilerek yeni malzemeler meydana getirilmektedir. Üretilen bu yeni malzemeler "geopolimer veya inorganik polimer" olarak adlandırılır.

2.2.1 Polimerleşme Süreci

Tek moleküllere monomer, monomerlerin bir araya gelerek birleşmesi sonucu ortaya çıkan büyük molekül zincirine polimer denir. Polimer zincirinde yinelenen monomerlerin sayısı polimerleşme derecesini ifade eder. Polimerleşme derecesi polimer maddelerde molekül büyüklüğünü belirler. Örneğin elyaf, farklı kimyasal maddelerin sentezlenmesiyle oluşan polimerleşme reaksiyonunun bir ürünüdür. Polimerizasyon ise monomerde bulunmayan aktivatörlerin ilave edilmesiyle meydana gelen bir reaksiyonu ifade eder. Aktivatörler aracılığıyla aktif merkezler oluşarak monomerler birleşir, böylece polivinilklorür ve

polivinilalkol gibi polimer maddeler elde edilir. Poliadisyon, bir çift bağ içeren moleküle, diğer bir molekülün katılması şeklinde olan poliüretan vb. polimerleşme reaksiyonlarıdır. En az iki reaktif gruptan meydana gelen monomerlerin reaksiyonu sonucunda küçük molekül ağırlıklı bileşiklerin (su, amonyak vb.) açığa çıktığı reaksiyonlara da polikondenzasyon denir. Buradaki ürünler ise poliester, poliamid, poliüretan vb. polimerlerdir.

Polimerler kelime anlamı itibariyle çoklu zincir anlamına gelen ve organik karbon minerallerinin birbirine kovalent bağlarla bağlanarak zincir oluşturması sonucu bu zincirlerin wanderwalls bağlarla bir arada tutulması ile oluşmuş bileşiklerdir. Bu sayede her zincir iç içe geçerek bir yumak oluşturur ve bu polimerin mikro yapısını oluşturmaktadır. Bu sürecin sonundaki kalsiyum karbonat oluşumu alkalofik mikroorganizmalar tarafından farklı biyokimyasal proseslerle gerçekleştirilen bir olaydır.

Pek çok sentetik ve doğal polimer madde mevcuttur. C, N, O, H elementlerinden monomerleri oluşan polimerler organik polimer olarak anılır ve canlıların kimyasında sıklıkla bulunurlar. İnorganik polimerler ise monomerlerinin ana bileşeninin halojen, metal, metaloid ve maden elementlerinden oluştuğu polimerlerdir. Genel olarak polimerler kovalent bağ yapısındadır. Kovalent bağlar, molekül ve elementler arasında son enerji düzeylerinde elektron paylaşımı ile oluşur (Arıöz, 2009).

İki tür polimer yapısı mevcuttur:

Termoplastik polimerler (Katılma polimerizasyonu): Monomer zincirleri birbirinden ayrıdır ve birbiri üzerinde kayabilir. Monomerler uzun zincir şeklinde bağlanırlar. Moleküller arasındaki Vanderwalls bağları zayıf, monomerler arasındaki uzun zincir bağı ise kuvvetlidir. Isıyla birlikte aralarındaki bağ gevşeyerek akıcı kıvama geçer, böylece şekil değişimine izin verir. Yarı kristal ya da amorf yapıda olduğundan tekrar tekrar şekillendirilebilirler.

Termoset polimerler (Yoğuşma polimerizasyonu): Yüksek ısı ve basıncın uygulandığı vulkanize işlemi uygulanarak üretilir. Sert ve akıcı yapıda olmayan çapraz bağ yapıdadır. Bu polimerler termoplastik polimerlerden farklı olarak monomerlerin molekül yapısında bulunan bir ürünün yan ürün olarak ayrılması ve diğer farklı yapıdaki monomerlerin uygun bağları oluşturarak yüksek basınç ve ısı altında birleşimi ile oluşur. Üretimden sonra tekrar şekillendirilemezler.

2.2.2 Geopolimerizasyon

Geopolimer ismi ilk olarak 1978 yılında Fransız bilim adamı Prof. J. Davidovits tarafından inorganik moleküllerin oluşturduğu yapılar için kullanılmıştır (Davidovits, 1981). Davidovits daha sonra doğada aglomerasyon ile oluşan kayaçların yapay yollar ile laboratuvarlarda üretilebileceğini göstermiştir.

Geopolimerler inorganik, sert, 1250°C sıcaklığa kadar kararlıdırlar ve yanıcı değildirler (Davidovits, 1988). Bu malzemeler, 100°C'den düşük sıcaklıklarda alkali bir çözelti ile aktivasyonu sonucu organik polimerler gibi polikondenleşebilir. Geopolimerizasyon, alümino-silikat oksitlerin polimerik Si-O-Al bağları veren alkali polisilikatlarla kimyasal reaksiyonunu içerir (Davidovits, 1991), (Davidovits, 2008).

Matris fazını oluşturan toprak ve aktivatör sıvı olarak alkali silikatların toplam Si:Al molar oranı tüm geopolimerizasyon ürünlerinin molekül yapısı üzerinde belirleyicidir. Zeolit kristali benzeri tuğla, seramik ve yangından koruyucu malzemeler üretilirken bu oran 1 olarak alınabilir. Eğer geopolimerizasyon işlemi kristal yada amorf düzendeki geopolimer çimentolar, geopolimer betonlar, ileri teknoloji kullanılarak üretilen geopolimerizasyon ürünleri ve radyoaktif atık depolama yapılarının üretiminde kullanılacaksa bu durumda Si:Al oranı 2 olarak alınmalıdır. Oran 3'e çıkarıldığında polimerik yapı daha likit bir hale gelmektedir. Bu oran 3'ün üzerinde kullanıldığında ise geopolimerizasyon ürünü olarak dolgu malzemeleri ve köpük malzemeler üretilebilir. Si:Al>15 olduğu durumda 2 boyutlu moleküler ağ yapısında geopolimer pastası oluşur ve bu yapı savaş uçaklarında kullanılabilecek nano kompozit yangın ve ısı dayanımı yüksek malzemelerin üretiminde kullanılabilmektedir (Hua ve Van Deventer, 2000).

Malzemeden beklenen özelliklere göre geopolimerin tepkime termo-kinematiği incelenerek ihtiyaca uygun malzeme üretilmesi mümkündür. Na, K, Ca benzeri alkalinitesi yüksek olan tuzlar alkali metallere elektron verirler ve Si ve Al' un oksijen atomlarını ortak kullanarak kimyasal bağ kurmasını sağlarlar. Si-O-Al moleküllerinden oluşan bu yapıya sialat (alkali silikon okso-alüminat) adı verilir. Polimer bağ yapısının oksijenli dizilişinin sıklık düzeyine ve element sayısına göre sialat (Si-O-Al-O-), polisialatsiloxo ya da polisialatdisiloxo oluşmaktadır. Sialat yapısı SiO_4 ve AlO_4 molekülleri arasında tüm oksijen atomlarının tetrahedral bağlar kurması ile oluşur. Geopolimer tepkimesinde kulanılan ham maddeler ve

aktivatör çözelti içindeki sialat ve alüminatın Si/Al molaritesi oranları kristal diziliminin formunu, bu vesileyle de malzeme özelliklerini etkiler. Alkali tuzların polimerizasyona etkisi ise şu şekildedir. Yoğuşmuş silis dumanı (SiO_2) ve alüminyumoksit (Al_2O_3) geopolimer tepkimesinde aktif olarak rol alan öncü bileşiklerdir. Geopolimer oluşma süreci bu alümino-silikat oksitlerin alkali hidroksit tuzlarda çözünmesi ile başlamış olur. Karışımda kullanılan hammaddenin incelik modülü ne kadar yüksekse Al ve Si içeren moleküller o ölçüde daha fazla çözünürler. Bu etmen reaksiyonun gelişimi üzerinde etkilidir. Alkali tuzların polimerizasyona katkısı ortamı alkali yaparak bir nevi katalizör olarak görev almasıyla meydana gelir. Alkali ortam hidroksil iyonlarının da etkisiyle silikat ve alüminatların çözünüşünü katalize ederek hızlandırır. Ancak aktivatör oranının çok yüksek olduğu durumlarda aşırı alkali ortam silikat anyonları arasındaki bağları gevşetir. Geopolimer üretiminde alkali tuzlarla birlikte kullanılan camsuyu - sodyum silikat (Na_2SiO_3) veya gibbsit- sodyum alüminat ($Na_2O-Al_2O_3$) tuzların ve UK içerisindeki ana bileşenlerin daha düzenli çözünebilmesi için kullanılırlar. Böylece geopolimer malzeme daha işlevsel hale gelir. Bu kimyasalların eklendiği çözeltiler katı-jel çözeltiler olarak isimlendirilirler. Bu kimyasalları likit forma geçirmek için su ile çözeltilerinin oluşturulması gerekir. Ancak kullanılan su miktarının gereğinden fazla olması malzemenin basınç dayanımı azaltmaktadır. Ayrıca alümino silikat jel çözeltilerinin meydana gelme süreci büyük ölçüde ham maddelere uygulanan kür sıcaklığına ve kür süresine de bağlıdır. (Hua ve Van Deventer, 2000).

Geopolimer prosesi özellikle Si, Al, Mg, Ca, P, K, Na gibi mineral moleküllerini içeren monomerlerin birbirleri arasında polikondenzasyonu sonucu oluşan kovalent kompleks zincir bağlı polimerler kurması ile oluşur. 750 ºC'de kalsine olmuş MK kilinin alkali tuz ve alkali silikatlar ile aktifleştirilmesi ile elde edilen çözeltisinin, düşük ısıda (40–100 ºC) fırınlanmasıyla elde edilen ürünler geopolimer malzemelerin en iyi özelliklerini gösterdiği şartlardır (Silva ve Crentsil, 2008) (Hardjito ve diğ., 2005).

Duxson ve diğ. (2005) yaptıkları çalışmada Si / Al molar oranı> 1.65 olan numunelerin daha yüksek basınç dayanımı ve young modülü gösterdiklerini bulmuşlardır. Bu değerin üstünde ise reaksiyona girmemiş türlerin daha yüksek miktarına bağlı olarak mekanik özellikler azalır.

MK gibi alümino–silikat yapıdaki diğer toprak katılarla alkali silikat ve alkali tuzların düşük ısıda tepkimeye girmesi ile başlayan bu süreçte elde edilecek ürünün fiziksel özellikleri, katı

hammadde kompozisyonu, kimyasalların karışım oranları, uygulanan kalsinasyon işlemi ısısı ve süresi veya ısıl küre bağlı olarak değişmektedir (Zeybek, 2009).

Tanımlanmış 9 tip geopolimer malzeme mevcuttur.

- Camsuyu esaslı geopolimer, polisiloksonat (Si: Al=1:0)
- Kaolin hidrosodalit esaslı geopolimer, polisialat (Si: Al=1:1)
- MK esaslı geopolimer, poly(sialate-siloxo) (Si: Al=2:1)
- Kalsiyum esaslı geopolimer, (Ca, K, Na)-sialate, (Si: Al=1, 2, 3)
- Kayaç esaslı geopolimer, poly(sialate-multisiloxo) (1< Si: Al5)
- Silika esaslı geopolimer, sialate ve siloxo bağlı poly(siloxonate) (Si: Al>5)
- UK esaslı geopolimer
- Fosfat esaslı geopolimer
- Organik maden esaslı geopolimer (Anon., 2018)

2.2.3 Geopolimer Harçlar İle İlgili Yapılan Çalışmalar

Basit bir yaklaşımla geopolimerizasyon, fırınlanmış kilin yapısında yer alan alüminat ve silikatların oksijen atomu elektronlarını ortak kullanarak kovalent bağlı bileşikler oluşturması şeklinde ifade edilebilir. Geopolimer malzemelerin yapısındaki çoğunlukla ısı ile aktifleştirilmiş olan doğal silikon ve alümin mineraller (alüminyum ve silisyum oksitli bileşikler), alkalin ile aktive edilerek moleküler arası bağları güçlendirilmekte ve polimer meydana getirilmektedir. Geopolimerler kristal ya da amorf yapıda olabilirler. Özellik bakımından doğal kayaçlara benzerler. Bu şekilde elde edilen çimentolara ise alkali aktivasyonlu çimentolar veya inorganik polimer çimento adı verilmektedir.

Geopolimer beton, kuruma rötresi kontrol edilebildiğinde ince ve dar yapı elemanları için kullanımı elverişli, Portland çimentolu betonlara kıyasla hidratasyon ısısı daha düşük, donatı korozyonuna karşı daha etkili ve asit saldırıları karşısında daha dirençlidir. Bu özellikleriyle amorf benzeri cam yapıdaki geopolimer beton özellikle istinat duvarı yapımında, betonarme su tankı, baraj ve öngermeli köprü yapımında, yangın ve ısıya dayanıklı yapı malzemelerinde, sağlığa zararlı kimyasallar ve nükleer atıkların bertaraf edilmesinde ve kimyasallara dirençli ürün yapımında normal betonlara tercih edilmektedir. Kısaca geopolimer betonlar özellikle kimyasal direnç, ısıl direnç ve yangın direncinde Portland çimentolu betonlara göre

üstünlüklere sahiptir. Bu özellikleriyle askeri, inşaat, maden ve atık yönetimi gibi alanlarda uygulanma potansiyeline sahiptir.

Geopolimer çimento, yüksek alkali (K-Ca) -Poly (sialate-siloxo) bir çimentodur. Geopolimerizasyon denilen inorganik bir polikondensasyon reaksiyonundan kaynaklanır. Geopolimer çimento, oda sıcaklığında hızla sertleşir ve sadece 4 saat sonra 20 MPa'a kadar basınç dayanımı sağlar. 20°C'de hidrolik bağlayıcı harçlara uygulanan standartlara uygun olarak test edildiğinde 28 günlük basınç mukavemeti, 70-100 MPa aralığındadır. Yüksek erken dayanım, düşük büzülme, donma-çözülme dayanımı, sülfat dayanımı ve korozyon direncini içeren avantajlı özellikleri, onları yüzey bertaraf tesislerinde uzun süreli saklama için ideal kılar. Bu yüksek alkali çimentolar hiçbir alkali-agrega reaksiyonu oluşturmaz (Davidovits, 1994).

Geopolimer harçların içeriğinde MK, UK, cüruf ve agreganın yanı sıra alkali aktivasyon maddesi olarak katalizör sıvılar kullanılır. Alkali aktivasyon sisteminde kullanılan farklı kombinasyonlar mevcuttur. Bunlar alkali silika, hidroksit, damıtılmış su vb. olabilmektedir. Bu süreç alümino-silikat malzemelerin geopolimerizasyonu, hammaddenin çözülmesi, taşınma veya oryantasyon ve reaksiyon ürünlerinin polikondenzasyonunu içeren karmaşık bir kimyasal süreçtir (Li ve diğ., 2010), (Van D. ve diğ., 2010), (Provis, 2014), (Pacheco-Torgal ve diğ., 2016). Geopolimer harçlar, standart Portland çimentosu (SPÇ) tabanlı harçların yerini almak için yüksek potansiyele sahip yeni nesil inorganik bağlayıcılardır (Van Deventer ve diğ., 2012).

Geopolimer alanında yapılan ilk araştırmalar, 1940 yılınla Purdon ile yüksek fırın cürufunun alkaliler ile aktivasyonu üzerine başlamıştır. Cüruf, ağırlıkça %10'a kadar varan oranlarda sodyum hidroksit ile aktive edilmiş ve 25 MPa'a kadar dayanım elde edilmiştir. Bu öncü çalışma da sodyum hidroksitin cürufun priz almasında katalizör olarak görev yaptığı belirtilmiştir (Purdon, 1940).

Bu çalışmayı Portland çimentolu hammaddelerin eksikliğinin yaşandığı 1950'lerde Rusya'da yapılan çalışmalar izlemiştir. Volkanik kayaçların zeolitlere dönüşüm sürecindeki yapıyı takip eden Glukhovski (1959), Eski Mısırlılar ve Romalılar döneminde kullanılan harçları inceleyerek zemin çimentosu adı verdiği bağlayıcıları geliştirmiştir. Bu bağlayıcılar endüstride kullanılan alkali atıklarla cürufların karışımı ile meydana gelmekteydi. O dönem için bu ürün konut, demiryolu, beton sulama ve drenaj kanalları, döşemeler ve prefabrik bloklarda kullanılmıştır (Glukhovsky, 1959)

1970’lerde ise Davidovits Fransa’nın o dönem maruz kaldığı katastrofik yangınlara çözüm ararken alkali aktive edilen geopolimer bağlayıcılarla ateşe ve ısıya dayanabilen ve plastiğe benzer bir malzeme üretmek istemiştir. Araştırmaları sonucunda alkali silikat ve metakaolin tabanlı sıvı bir bağlayıcı bulmuş ve daha sonraları metakaolin esaslı olarak ürettiği bu malzemelere geopolimer ismini vermiştir (Davidovits, 1989).

Daha sonraki yıllarda ise geoçimento (Krivenko, 1994), alkali aktive edilmiş çimento (Palacios ve Palomo, 2004), inorganik polimer beton (Sofi ve diğ., 2007) vb. isimlerle anılmış ve günümüze kadar araştırılmaya devam edilmiştir.

Geopolimer betonların standart Portland çimentolu harçlara olan üstünlüklerinden birisi asit direncinin daha yüksek olmasıdır. Bu durum geopolimer betonun gıda endüstrisinde ve atık yönetimi alanlarında kullanımı için oldukça önemlidir. UK esaslı geopolimer betonun %5 asetik asit ve sülfürik asite maruz bırakıldığı bir çalışmada alkali aktivatörlerin asit direnci bakımından önemli bir etkisi olduğu ve geopolimerlerdeki daha düşük kalsiyum içeriğinin bu performansta etkili olduğu belirtilmiştir. Özellikle NaOH aktivatörü ile hazırlanan harçlarda ağırlık değişimi %2 ile sınırlı kalırken standart Portland çimentolu betonlarda bu oran %10’un üstüne çıkmıştır (Bakharev, 2005).

GH üretiminde amorf Si ve Al içeren herhangi bir doğal mineral veya endüstriyel yan ürün kullanılabilir. MK, UK ve cüruf tabanlı geopolimerlerin karşılaştırıldığında daha yüksek su ihtiyacı doğuran MK bazlı geopolimerler diğer hidratlara göre dayanım açısından daha avantajlıdır. UK tabanlı geopolimerler ise daha yüksek durabilite sunarken, cüruf bazlı polimerlerin erken yaş mukavemeti ve asit dayanımı yüksektir (Duxson ve diğ., 2007).

NaoH konsantrasyonunun uçucu kül esaslı GH dayanımı, eğilme dayanımı ve su emme değerlerine etkisinin incelendiği araştırmada NaOH konsantrasyonu ve kuruma süreleri değiştirilerek toplam 9 karışım, 8M, 12M, 16M NaOH konsantrasyonlarında ve 24 saat, 48 saat ve 72 saat olarak kürleme süresi ile hazırlanmıştır. Araştırmanın sonuçları, NaOH konsantrasyonunda artış ile basınç dayanımında bir artış olduğunu göstermiştir. Sertleşme süresi, kürlenme süresindeki artışla da arttırılmıştır, ancak 48 saat kürlenme süresinden sonra basınç dayanımı artışı anlamlı olmamıştır. Bu araştırmada 60 ° C'de kürleme ile 46 MPa'ya kadar basınç dayanımı ve 3 MPa’a kadar eğilme dayanımı elde edilmiştir. Su emme testi

sonuçları, küplerin su emme oranının NaOH konsantrasyonu ve sertleşme süresindeki artışla azaldığını gösterdiği bildirilmiştir (Mishra ve diğ., 2008).

Bazı yazarlar (Pacheco-Torgal, 2008a) geopolimerik harç ile tamir edilen beton numunelerin ve bir günlük kürlemenin, 28 günlük kürlemeden sonra mevcut ticari onarım ürünleri ile tamir edilen örneklerden daha yüksek bağlanma gücüne sahip olduğunu göstermiştir. Böylece GH beton tamiri alanında kullanılabilecek potansiyele sahip olan üçüncü bir harç kategorisini olarak tanımlanmıştır (Pacheco T. ve diğ., 2012a).

Geopolimer harçların basınç dayanımı, SiO_2/ Al_2O_3 oranı ve sıvı-katı oranlarından etkilenmektedir (Van Jaarsveld ve Van Deventer, 1999), (Zhang ve diğ., 2009), (De Vargas ve diğ., 2011). Alkali içeriğiyle birlikte basınç dayanımları değişen geopolimer betonlarda alkali içeriğinin artmasıyla birlikte artış, silika içeriğinin artmasıyla ise düşüş görülmktedir. Zhang ve ark. (2009), yalnızca NaOH ile aktivasyonun, Si / Na oranına bağlı olarak, kristal zeolit veya başka bir zeolitin nanosize kristallerini oluşturabilirdiğini, sodyum silikat eklenmesinin kristalit oluşumunu önemli ölçüde azaltıp boşluk miktarını artırararak dayanımını düşürdüğünü ifade etmişlerdir.

Geopolimer betonların işlenebilirliği büyük ölçüde aktivatör molaritesine, su içeriğine ve süperplastikleştirici katkı kullanımına bağlıdır (Montes ve Alouche, 2013). Geçmiş dönemlerde farklı katkıların GH üzerine etkileri yoğun bir şekilde çalışılmıştır (Kusbiantoro ve diğ., 2013), (Nematollahi ve Sanjayan, 2014), (Jang ve diğ., 2014). Sükrozun çözünmeyen metal kompleksleri oluşturduğu ve dolayısıyla hidratasyon işlemini geciktirdiği, diğer yandan sitrik asitin priz süresini azaltarak hidrasyon işlemini hızlandırdığı belirtilmiştir (Kusbiantoro ve diğ., 2013). Ticarileşmiş süper plastikleştiriciler arasında hem naftalin hem de polikarboksilat bazlı süperplastikleştiricilerin işlenebilirliği artırabildiği bulunmuştur (Nematollahi ve Sanjayan, 2014), (Jang ve diğ., 2014). Bununla birlikte, polikarboksilat bazlı süperplastikleştiriciler kullanıldığında, basınç dayanımında yaklaşık 1/3 oranında azalma meydana getirdiği ve UK / cüruf bazlı hidratlamayı geciktirebildiği gözlenmiştir.

Geopolimer harçlarda kür sıcaklığının beton dayanımına etkilerini araştıran bir çalışmada harçlar 10,20,30,40,60 ve 80°C'lerde kürlenmiştir. Sonuçta 10°C'de kürlenen betonun priz süresi 4 güne kadar uzamış, kür sıcaklığı yükseldikçe priz süresi kısalmıştır. 80°C'de kürlenen harç 1 saatte çok yüksek dayanım seviyelerine ulaşmış ancak betondaki boşluklar da buna

paralel olarak artmıştır. Yüksek sıcaklıkta kürlemenin erken dayanımı yüksek olmasına rağmen geç dayanıma etkisi tam tersidir (Rovnanik, 2010). Buna ilaveten bu reaksiyonlardaki UK / MK'nin hidratasyon ürünlerinin sodyum alüminosilikat hidrat jelleri olduğu da bulunmuştur (Singh ve diğ., 2015).

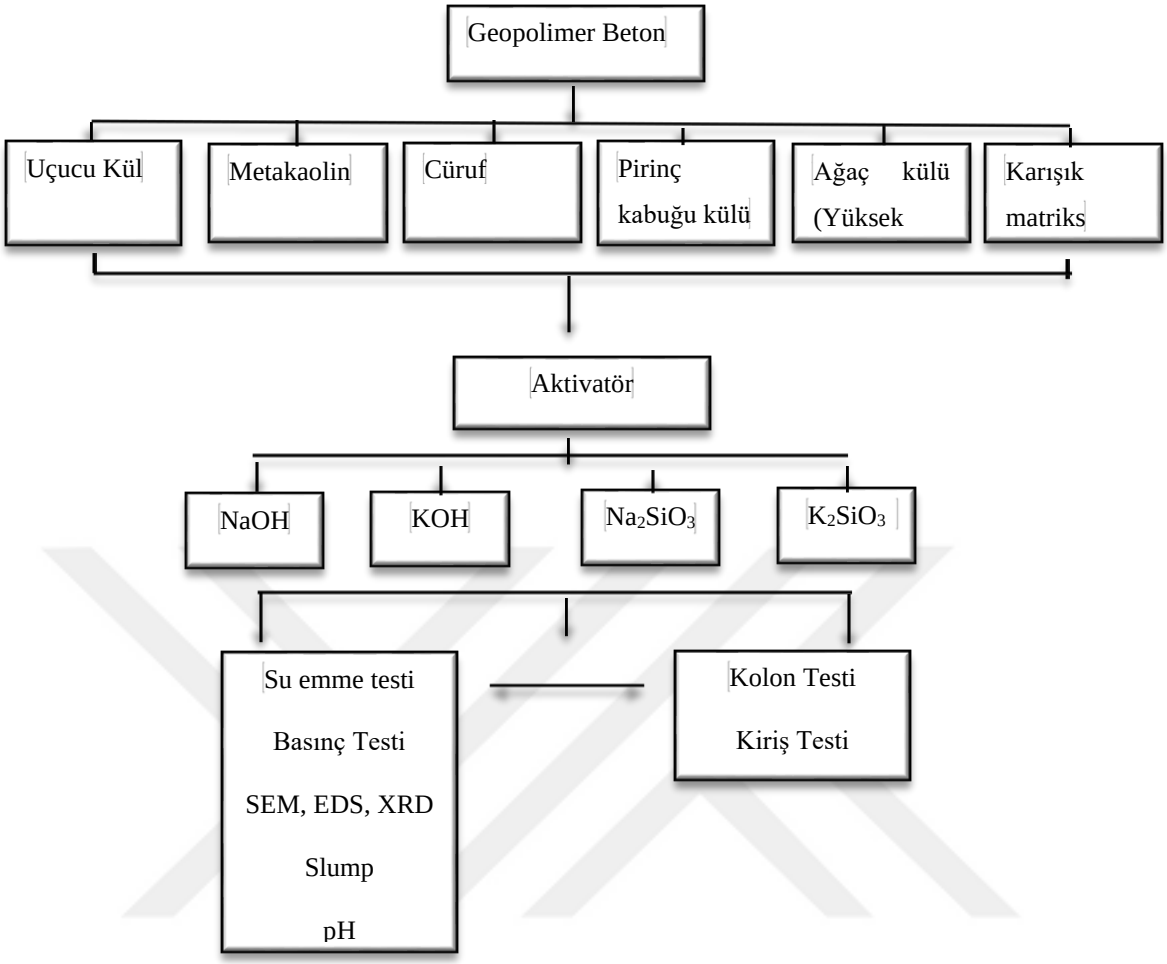
Klorlu ortamdaki geopolimer harcın bünyesindeki korozyon potansiyeli, galvanik akım ve yarı hücre potansiyeli araştırılarak önemli ölçüde aktivatör cinsine bağlı olduğu belirtilmiştir. KOH ve NaOH aktivatörlerinin kullanıldığı harçlarda standart Portland çimentolu harçlara yakın bir korozyon değeri elde edilirken $Ca(OH)_2$ aktivatörünün kullanıldığı harçlarda çok daha düşük değerler elde edilmiştir (Park ve diğ., 2015).

Geopolimer betonların geçirgenliklerinin tespiti için yapılan araştırmada, Portland çimento esaslı beton ve geopolimer betonun açık boşluk hacimleri ve su emme kapasiteleri karşılaştırılmıştır. Elde edilen veriler geopolimer betonun standart betona oranla %37,62 açık boşluk oranında azalma olduğu ve %38,38 oranında daha az su emdiğini ortaya çıkarmıştır (Srinivas ve Rao, 2017).

4 ayrı bağıl nemde ve iki farklı kuruma ortamında (doğrudan ve kademeli kurutma) kürlenen, birbirinden farklı çeşit ve dozlarda aktivatörlerle hazırlanmış olan geopolimer harcın kuruma büzülmesi değerleri karşılaştırılmıştır. Kuruma büzülmesi deformasyonlarının kuruma hızı ile ilişkili olarak relatif nemin kademeli azaltıldığı durumda daha fazla olduğu ortaya çıkmıştır (Ye ve diğ., 2017).

Cürufla %5, %10 ve %15 oranlarında yer değiştirilen silis dumanının geopolimer harca dayanımı incelenmiş, su kürü ve plastik örtü kürüne tabi tutulan numunelerin 28 ve 90 günlük basınç dayanımları karşılaştırılmıştır. Silis dumanının gözenekleri doldurarak geçirgenliği azalttığı, CSH jeli oluşumuna katkıda bulunduğu ve daha yüksek basınç dayanımı sağladığı belirlenmiştir. Ancak kür şeklinin erken dayanımda etkisinin olmadığı (maksimum 3 MPa'a kadar) , geç dayanımda ise daha etkili olduğu ortaya konulmuştur (Rostami ve Behfarnia, 2017).

Şekil 2.6'da (Chau-Khun ve diğ., 2018) GH çalışmaları ile ilgili bir sınıflandırma yapmıştır. Bu sınıflandırmada geopolimer betonlarda kullanılan alkali malzemesi, aktivatör ve kullanılan test yöntemleri esas alınmıştır.



Şekil 2.6: GH Taksonomisi.

Uysal vd. (2018) tarafından MK-cüruf esaslı geopolimerlerin, çevre dostu olmanın yanı sıra kabul edilebilir mekanik ve dayanıklılık performansı açısından en iyi kompozitler olduğu belirtilmiştir. Yapılan çalışmada, MK kısmen iki atık madde olan kolemanit ve silika dumanı ile yer değiştirilmiş ve bu malzemelerin, sonuçta ortaya çıkan geopolimer ortak pozitelerin davranışı üzerine etkisi fiziksel özellikler açısından incelenmiştir. Tarama elektron mikroskobu (SEM) ve XRD analizleri ile birlikte ultrasonik darbe hızı, aşınma direnci, eğilme ve basınç dayanımı testleri açısından lifli olmayan örnekler ile polipropilen fiber takviyeli olanlar arasında bir karşılaştırma yapılmıştır. Kontrol numunesi ile kıyaslandığında kolemanit ve silika dumanı numuneleri sırasıyla, %14,61 ve % 29,44 eğilme mukavemeti, % 2,02 ve % 11,48 basınç dayanımı, % 10,59 ve % 20 aşınma direncine sahiptir. Polipropilen liflerin eklenmesi genellikle numunelerin eğilme mukavemetinin ve aşınma direncinin geliştirilmesine yardımcı olmuştur. Mikroyapısal analiz sonuçlarında matrisin iyi bir geopolimerizasyon gösterdiği ve

genel olarak değiştirilen atık malzemelerinin faydalı olduğunu kanıtlamıştır (Uysal ve diğ., 2018).

GH için farklı kür alternatifleri literatürde mevcuttur. Isı ile kürleme en kısa sürede en yüksek dayanımı veren yöntem olarak bilinmektedir ancak biyokatkılarla kendiliğinden kürleme yöntemleri de denenmekte ve başarılı sonuçlar alınmaktadır (Karthika ve diğ., 2019).

Geopolimer betonun taşıyıcı yapı elemanlarında kullanımı durumunda UK bazlı GH kirişin ve kolonun yapısal davranışının SPÇ betonarme kirişlere benzer olduğu bulunmuştur (Sumajouw ve Rangan, 2006), (Rahman ve Sarker, 2011). Ancak GH kolonlarda gevrek kırılma meydana geldiği de bildirilmiştir (Sumajouw ve Rangan, 2006). Ancak GH plakalarda, süneklik ve enerji absorpsiyonunun çimento esaslı beton plakalara göre daha iyi olduğu bulunmuştur (Rajendran ve Soundarapandian, 2013) (Nagan ve Karthiyaini, 2014).

2.3 BAKTERİ YARDIMIYLA KENDİNİ İYİLEŞTİREN BETONLAR

Çimentolu bağlayıcılar ya da son dönemde üzerinde yoğun olarak çalışılan çimentosuz aktive edilmiş bağlayıcılar, basınç ve yangın dayanımının yüksek olması, düşük maliyeti ve kolay uygulanabilirliği ile özellikle çok katlı yapılarda cazip bir seçenek haline gelmiştir. Ancak kısa vadede meydana gelen ve çimentonun hidratasyonu sırasında oluşan rötre büzülmeleri, uzun vadede yük altındaki beton elemanda meydana gelen çekme çatlakları, olumsuz hava ve ortam şartları sebebiyle oluşan çatlak ve deformasyonlar gibi durabilite sorunları çimento türevi malzemelerle oluşturulan betonun olumsuz özellikleri olarak karşımıza çıkmaktır. Bu sistemler her ne kadar geçirimsiz ve özenli bir şekilde tasarlansa da yapısında mikro ölçekli çatlaklardan başlayarak pek çok zarar verici çatlaklar oluşabilmektedir. Bu çatlaklardan ilerleyen zararlı su, asit vb. sıvılar betonun içlerine kadar ilerleyerek hem çatlak boyutunun artmasına hem de agresif sıvıların donatıya kadar ulaşıp korozif etki yapmasına sebep olmaktadır. Böylece zamanla betonun dayanımı tasarım dayanımının altına inmektedir. Betonlarda oluşan çatlakların onarımı mevcut yöntemlerle zor ve pahalı olduğundan son yıllarda daha sünek, çatlak oluşumunu kısıtlayan, oluşan çatlakları kendisi iyileştiren ve onaran beton arayışına girilmiştir.

Betonda meydana gelen çeşitli çatlamalar sonucu beton ya da betonarme elemanda dayanım kaybı meydana gelir ve güvenlik problemi ortaya çıkar. Bunun sonucunda ise yapının ya

yeniden yapımı ya da betonun onarımı gereklidir. Yeniden yapım, maliyetli, zaman alıcı ve çevresel olarak da zararlı bir yöntemdir. Bu nedenle beton çatlaklarının onarımı yoluna gidilmektedir. Ancak günümüzde betonun onarımı ve güçlendirmesi de betonun yeniden yapımı kadar zahmetlidir. Bu sorunun daha çevresel ve ekonomik bir yöntemle çözümü için çeşitli araştırmalar yapılmakta, bu noktada da kendini iyileştiren beton araştırmaları öne çıkmaktadır. Kendiliğinden iyileşen bir beton yapmanın arkasındaki temel mekanizma, bakterilerin çözünebilir organik besin maddelerini çatlakları kapatan çözünmez inorganik kalsit kristallerine dönüştürebilmesidir.

Beton elemandaki mikroçatlak, çatlak ve süreksizliklerin herhangi bir dış etkene bağımlı olmadan iyileşme yeteneği kendiliğinden iyileşme (self-healing) olarak ifade edillir. Kendiliğinden iyileşmenin başlıca nedeni, beton içerisindeki kalsiyum iyonu ile çözülmüş CO_2 arasındaki reaksiyon sonucunda kalsiyum karbonat oluşumuna atfedilir (Edvardsen, 1999), (Cowie ve Glassert, 1992). Bu iyileştirme, kullanılan malzemenin doğal bir eğilimi ise otojen iyileştirme, bir ajan ya da katkı aracılığıyla meydana geliyorsa otonom iyileştirme adını alır.

Otojen iyileşme: Beton malzemelerde meydana gelen otojen iyileştirme, ana fazın ileri derecede hidratasyonu ile ya da hidratasyon sonrası kalsiyum karbonat presipitasyonu ile oluşabilmektedir. Ana fazın içerisine optimum oranda lif eklenerek çatlak dağılımı ve genişliğinin kontrol edilebildiği tasarlanmış çimentolu kompozitlerin (ECC-engineered cementitious composites) otojen iyileştirme açısından oldukça başarılı olduğu bilinmektedir.

Otonom iyileşme: Çimentolu sistemlerde iyileşme ile ilgili öncül çalışmada (Dry, 1994) çimento matrisinde yer alan liflerden akıllı kimyasal salımını içeren kendiliğinden iyileşme mekanizmasını önerilmiştir. Bunu izleyen süreçlerde bu öneri, iç ve dış etkiler nedeniyle bozunan ve çatlayan çimento matrisli elemana bio-ajan salarak iyileştirme yöntemine doğru geliştirilmiştir. Çimentolu sistemlerdeki kendiliğinden otonom iyileşme, mikrobiyolojik salınım sonucu kalsifikasyon sentezleyebilen bakterilerin kalsiyum karbonat ($CaCO_3$) üretme sürecidir.

Ancak ister otojen olarak olsun, isterse otonom olarak olsun yapı elemanındaki çatlağı onarabilmek için öncelikle betonda oluşabilecek çatlakları anlamak ve nedenlerini bilmek gereklidir.

2.3.1 Betonda Meydana Gelen Çatlaklar

Çatlaklar, donatı korozyonu, plastik rötre, kalıp-zemin hareketleri, donma-çözülme, sıcaklık artışı, ıslanma-kuruma, deprem, yorulma ya da mesnet çökmesi gibi yapısal nedenler, sülfat atağı ve alkali-agrega reaksiyonları gibi çeşitli nedenlerden dolayı yapılarda bulunan doğal olarak ortaya çıkan zarar verici olgulardır. Çatlaklar nedenine bağlı olarak, çatlama, dökülme, deformasyon, dayanım ve rijitlik kaybı, geçirimlilikte artma ve korozyon gibi durumlarla sonuçlanmaktadır. Genel olarak makro ve mikro çatlaklar olarak ikiye ayrılırlar. Betondaki mikro çatlaklar yapısal bozulmaya yol açarlar. Geleneksel tamir sistemi, harçların çatlaklara uygulanması şeklinde yapılır. Bu uygulama zaman alıcıdır ve tekrarlayan tamir faaliyetlerini gerektirir. Yeraltında veya yüksekteki çatlaklara erişmek ise daha da zor olabilir. Betondaki çatlaklar çeşitli nedenlerden kaynaklanabilir. Bu nedenler arasında, betonun aşırı yük altında olması, yapıda oturma meydana gelmesi, rötre yapması, donma-çözülmeye uğraması, yangına veya yüksek sıcaklığa maruz kalması, sülfat etkisinde olması gibi pek çok neden sayılabilir.

Özetlemek gerekirse betonun herhangi bir noktasında oluşan çekme gerilmeleri çekme birim şekil değiştirme kapasitesini aştığında betonda çatlaklar oluşur. Çatlakları 3 ana başlıkta sayabiliriz:

a) Betonun yapısında oluşan değişimler: Kuruma rötresi, sıcaklık farkından kaynaklanan genleşme ve büzüşmeler, plastik oturmalar.
b) Beton içinde bulunan maddelerin genleşmesi: Donatı korozyonu ya da ASR korozyonu sonucu oluşan genleşmeler.
c) Dış etkiler: Kimyasal etkiler, aşırı yükleme ya da farklı oturmalar.

Çatlak oluşumları beton plastik veya sertleşmişken oluşabilir. Taze beton çatlakları, plastik oturma ve büzülme çatlakları, kalıptan ve zeminden kaynaklanan hareketler, donma-çözülme yada ıslanma kuruma etkisi vb. nedenlerle oluşmaktadır. Sertleşmiş beton çatlakları ise çeşitli rötre olayları, sıcaklık değişimleri, kimyasal, fiziksel ya da biyolojik nedenlerle betonun bozulması, donma-çözülme, donatı korozyonu, ASR, ACR, boy-hacim değişimleri, ıslanma-kuruma, yüksek sıcaklık ve yangın, sülfat etkisi, DEF, tomasit oluşumu, karbonatlaşma, yapısal nedenler, mekanik dayanımın zorlanması, mesnet çökmesi, sünme, zemin oturmaları vb. nedenlerle oluşur.

Taze Beton Çatlakları:

Plastik Büzülme Çatlakları: En çok döşeme gibi yüzeyi geniş elemanlarda rastlanır. Kimyasal reaksiyona girmeyen fazla suyun kapilarite yoluyla yukarı çıkmasıyla oluşur. Terleme, kusma adı verilen bu olay betonun yerleştirilmesinden 2-4 saat sonra yüzeyde parlama şeklinde görülür ve hızlı kuruma sonucu oluşur. Bünyesel rötre ile birlikte çatlak oranı artar. Döşeme köşeleri ile 45^{o} açı yapar ve tipik olarak 2-3 mm'dir. Kaliteli betonlarda terleme hızı, karışım suyu fazla olan ve iyi sıkışmamış betonlara göre daha yavaş olacağından su yukarı daha zor tırmanır ve rötre çatlakları daha fazla oluşur. Betonun kürlenmesi ile en aza indirilebilir.

Plastik Oturma Çatlakları: Agrega taneleri kalıp içerisinde aşağı doğru inerken çimento ve su yüzeye doğru çıkar. Bu çökme hareketi kalıp tarafından engellenirse yerel çatlaklar oluşur ve yüzeyde zamanla soyulabilen ince bir tabaka oluşur. Çatlaklar boylamasına olup, donatıların yerlerini belli edecek şekilde oluşur. Terlemenin azaltılması, vibrasyon, düşük s/ç oranı, akışkanlaştırıcı kullanımı ve etkili kürleme ile engellenebilir. Pas payı yetersizse kapak atma olayı meydana gelir.

Kalıp ve Zemin Hareketi Çatlakları: Beton hala plastik kıvamdayken kalıpların hareket etmesi veya zemin hareketlerinden kaynaklı oturmalar sonucu priz almakta olan betonda meydana gelen çatlaklardır. Genellikle mikro düzeydedir ve hem içyapıda hemde dış yapıda görülebilir.

Sertleşmiş beton çatlakları:

Yükleme İle İlgili Çatlaklar: Basınç, çekme, eğilme, kesme, burulma vb. etkilerle ortaya çıkar. Çatlağa dik yönde çekme gerilmesi aramak gerekir. Yüke bağlı geniş çatlak oluşumları, statik ve betonarme proje yanlışlıklarından, malzeme ve uygulama hatalarından kaynaklanır.

Deformasyonlarla İlgili Çatlaklar: Temellerin farklı oturmaları, büzülme ve sıcaklık farklarından kaynaklanan şekil değişimleri neden olur.

Erken Termik Rötre: Çimento Hidratasyon ısısının tüm kütleyi ısıtmaya yetmemesi sonucu soğuyan ve kuruyan kütlede bir iki gün içinde çatlaklar oluşur. Çatlaklar yüzeysel ve harita şeklindedir. Islanınca belirginleşirler. Baraj betonlarında önemli sorunlar ortaya çıkarırlar. Ayrıca bacalarda kullanım sırasında düşey çatlaklar oluşur. Ani sıcaklık değişimlerinde önlem alınmadığı taktirde köprü, döşeme gibi elemanlarda çatlaklar oluşur.

Hidrolik Rötre: Kurumadan dolayı hacimde oluşan azalma nedeniyle meydana gelir. Prizin başladığı andan itibaren 5-6 ay sürebilir. Islanma sonucu yeniden genleşme meydana gelir. Bu olay yapı ömrü boyunca devam eder.

Karbonatlaşma Rötresi: Özellikle prefabrik elemanlarda meydana gelir. $Ca(OH)_2$ 'nin CO_2 ile reaksiyonuyla oluşan suyun buharlaşmasıyla oluşur.

Oturma Çatlakları: Oturma az ise çoğunlukla kapı-pencere, bölme duvar gibi elemanların kenarlarında, çok ise, taşıyıcı elemanlarda meydana gelir.

Donatı İle İlgili Çatlaklar: Pas ürünleri oluşturdukları hacim artışı nedeniyle betonda da hasara neden olurlar. Başlangıçta çatlama olarak görülüp zamanla pas payı tabakasının atmasına kadar gidebilir.

Çatlakları etkileyen parametreler: Betonarme yapılara asıl zarar veren çatlakların projelendirme ve detay hataları ile beton üretimi hatalarından kaynaklandığı bilinmektedir.

Sertleşmiş betonda çatlamaya yol açan diğer fiziksel etkenleri nedenleri aşağıdaki gibi sıralanabilir.

- Çatlamaya yol açan etkiler: Islanma-kuruma,
  Donma-çözülme,
  Boy-hacim değişikliği,
  Yüksek sıcaklık ve yangın,
  Aşırı yükleme,
  Tekrarlı yükleme sonucu yorulma.

Taze betonda donma-çözülme: - 5 ^oC'de karışım suyunun %92'si donar. Betondaki suyun donmasıyla agregalar ile çimento arasındaki fiziksel bağ kopar ve aderans sağlanamaz. Donan su nedeniyle priz gecikir ya da gerçekleşmez. Pratik olarak betonun -10/-12^oC'de priz yapmadığı kabul edilir. Hava sıcaklığı artınca priz devam eder ancak betonun homojenliği bozulur.

Sertleşmiş betonda donma-çözülme: Sertleşmiş bir beton don altında kalınca, harcın içindeki kapiler boşluklardaki su donar ve genleşir. Her donma-çözülme de genleşme miktarı artar. Bu genleşme çatlak oluşumuna sebep olur.

ACI 201'e göre donma-çözülmeye maruz kalacak betonlarda s/ç oranı 0,5 geçmemesi ve 24 MPa basınç dayanımına ulaşılana kadar betonun dondan korunması önerilir. Aynı şekilde bu betonlarda maksimum agrega çapına göre % 4,5-% 7,5 arasında hava sürükleyici kullanılması hava sürükleyici kullanılması önerilmektedir. Katkı maddesi olarak priz hızlandırıcı ya da suyun donma derecesini düşüren ürünler kullanılabilir (Potasyum karbonat, kalsiyum ve sodyum nitrit).

TS EN 206-1 standartı ise don etkisinde olan betonlarda en düşük beton sınıfını C30/37, maksimum s/ç oranını 0,45, en düşük çimento dozajını 340 kg/m^3 ve sürüklenen minimum hava içeriğini % 4 olarak belirlemiştir. 24 saat beton dondan korunmalı ve ıslak kürden kaçınılmalıdır.

Su emmesi ve geçirimliliği çok az (<% 0,5) ve basınç dayanımı çok yüksek (>150 MPa) olan mermer, granit, bazalt gibi kaliteli agregaların donma çözülmeye dayanıklı olduğu kabul edilir ve bu agregalarda maksimum dane boyutu sınırlanmaz. Agreganın dona dayanıklılığını belirlemeye yarayan 2 tür deney vardır. İlki, agreganın Na_2SO_4 veya $MgSO_4$ çözeltisinde bekletilerek etüvde kurutulmasıyla yapılır. Bu donma-çözülme etkisinin yapay olarak laboratuvarda elde edilmesini sağlar. Deney sonunda parçalanan agrega miktarı elek analizi deneyiyle belirlenir. Diğer bir yöntem ise su emmiş agreganın dondurularak daha sonra su içinde çözdürülmesiyle yapılır. Donma havada yapılırsa 20 defa, su içinde yapılırsa 10 defa tekrarlanır. Parçalanan agrega miktarı yine elek analizi deneyiyle belirlenir.

Betonun donma dayanıklılığını tespit için ASTM C666'ya göre beton su içinde ya da havada dondurularak suda çözdürülür. En çok kullanılan yöntem, dinamik elastisite modülünün değişimini ölçmektir. Böylece gözle görülmeyen düzeydeki hasarlar da belirlenebilir. Deneye 300 devir donma-çözülme ya da, ilk değerden %40 düşene kadar devam edilir.

K. F.= Deney sonucu ulaşılan devir sayısı x orijinal modülün yüzdesi) / 300

Kalıcılık faktörü <40 ise olumsuz, 40-60 arasında kuşkulu ve >60 ise olumlu olarak yorumlanır.

Buz Çözücü Tuzların Etkisi: Yolların buz tutmasını engellemek için kullanılan tuzlar betonun üst tabakası tarafından emilir. Don tutmaya başlayan bölgelere doğru su akımı başlar ve donma-

çözülme zararının boyutu artar. Buz çözücü tuz olarak NaCI ve $CaCl_2$, bazen de üre kullanılabilir. Üre betona diğer tuzlar kadar zarar vermez ancak buz çözücü etkisi de daha azdır.

Buz tabakası üzerine atılan tuzlar yüzeyde şok bir termal etki yaratarak yüzey ile iç bünye arasında sıcaklık farkı oluşmasına sebep olur ve betonda çekme zorlamaları nedeniyle çatlaklar meydana gelir.

Beton yüzeyinden derine indikçe beton sıcaklığı ve tuz miktarlarının farklı olması sonucu farklı zamanlarda donma-çözülmeler meydana gelir ve bunun sonucunda da betonda kabuk halinde soyulmalar görülebilir.

Yüksek Sıcaklık ve Yangın Etkisi: Beton belirli bir sıcaklığa kadar (250^{o}C) belirli bir süreyle önemli bir zarar görmez, zehirli gaz ve duman çıkarmaz. Ancak direk güneş ışığı altındaki elemanlarda ya da baca gibi yüksek sıcaklığa maruz elemanlarda önemli iç gerilmeler oluşur. Sıcaklığın etkili olduğu süre kısa ise (örneğin 1 saat) dayanımda az da olsa düzelmeler bile görülebilir ancak 300^{o}C'nin üzerinde belirgin dayanım kayıpları vardır.400^{o}C'de CSH'lar tahrip olmaya başlar, 900^{o}C'de ise CSH yapısı tamamen dağılır.

Çimento hamurunda bulunan bir diğer bileşen $Ca(OH)_2$'dir. $Ca(OH)_2$'nin sönmemiş kirece dönüşmesi 400^{o}C'de oluşur, bu da %33 civarında bir büzülme oluşması anlamına gelir. Yangını söndürmek için sıkılan su, CaO'in tekrar $Ca(OH)_2$'ye dönüşmesine sebep olur ve %44 oranında bir hacim artışı meydana gelir. Kısa sürede oluşan bu hacim değişimleri hasarın büyümesine sebep olur. Bu esnada betondaki boşluklardan dışarıya $Ca(OH)_2$ süzülür. Yangın geçiren betonarme yapılardaki bu kireç lekeleri 550^{o}C'nin aşıldığı şeklinde yorumlanır.

Betonun rengi maruz kaldığı sıcaklık derecesine bağlı olarak değişir. Bu renk değişimi kalıcı olduğundan, yangın sırasındaki sıcaklık derecesini ve kalıbın dayanımı tahmin edebilmek mümkündür. Genellikle renk, pembeyi aşan tonlarda ise beton dikkatle incelenmelidir. Griyi aşan, kül renklerinde ise beton ufalanabilir, gözenekli yapıdadır.

Agregaların sıcaklığa dayanımı mineral yapılarına bağlıdır. Dolomit kökenli (karbonatlı) agregaların ateşe dayanıklı oldukları söylenebilir. Kalker kökenli agregaların kirece dönüşümü 900^{o}C, bazalt gibi camsı agregaların ise 1000^{o}C civarındadır. Dolayısıyla kalker ve bazaltlı agregaların yangın dayanımlarının daha iyi olması beklenir. Ancak kireçtaşının termik

genleşme katsayısının çimento hamurunkine yakın olması iç gerilmeleri engellediğinden kalker kökenli agregaların kullanımı tercih edilir.

Yüksek dayanımlı betonlarda 300ºC'nin üzerinde betonda patlamalar ve dökülmeler görülmektedir. Bu nedenle yangın dayanımını artırmak için içine polipropilen lifler konulmaktadır.

Betonarme yapıları yüksek sıcaklıklardan korumak için derzler ateşi geçirmeyecek ve yapı elemanlarındaki uzamalara engel olmayacak şekilde düzenlenmeli, uçucu küllü çimento kullanımı tercih edilmeli, pişmiş toprak tozu gibi puzolanik maddeler kullanılmalıdır.

Betonun Kimyasal Nedenlerle Bozulması: Beton içindeki gözenek suyunun pH değeri 12,5-13,5 aralığındadır. Teorik olarak pH'ı düşük sular hidrate bileşenlerin çözünmesine yol açmaktadır. Sıvının pH değeri 6,5 ve üzerindeyse kimyasal saldırı çok yavaş gelişir. pH 5,5 altındaysa saldırı şiddetli, 4,5 altındaysa çok şiddetli olur. Ancak betonun geçirimliliği de çok önemli bir faktördür. Sertlik derecesi düşük olan yağmur ve kar suları kalsiyumlu bileşiklerin çözünmesine neden olurlar. Kirecin azalması sonucu oluşan boşluklar nedeniyle dayanım kaybı oluşur. Çözünen her %1'lik kireç, beton dayanımını %2 azaltır. Ayrıca betondan çıkan kalsiyum hidroksit havadaki CO_2 ile reaksiyona girip $CaCO_3$ oluşturarak beton yüzeyinde beyaz bir toz tabakası oluşturur. Buna çiçeklenme denir.

Yapının durabilitesi açısından çatlaklar, betonarme elemanlarda en önemli hususlardan biridir. Betonda meydana gelen çatlamalar sonucu beton ya da betonarme eleman fiziksel etkilere açık hale gelir. Bu da dayanım kaybına neden olur. Bunun sonucunda ise yapının ya yeniden yapımı ya da betonun onarımı gereklidir. Yeniden yapım, maliyetli, zaman alıcı ve çevresel olarak da zararlı bir yöntemdir. Bu nedenle beton çatlaklarının onarımı bu sorunlara iyi bir alternatiftir ancak günümüzde betona uygulanan onarım ve güçlendirme teknolojisi de betonun yeniden yapımı kadar zahmetlidir. Bu noktada araştırmalar sonucunda, beton çatlaklarının daha çevresel ve ekonomik yöntemlerle onarımı için kendini iyileştiren betonlar öne çıkmıştır. Son yıllarda beton konusunda oldukça popüler olan kendiliğinden iyileşen betonlar, beton yüzeylerdeki çatlakları kapatmak için biyolojik olarak kireçtaşı üreten sistemlerdir.

2.3.2 Bakterili Beton veya Harçlar ile İlgili Yapılan Çalışmalar

Araştırmalar düşük geçirgenliğe sahip taş, beton gibi yapı elemanlarının çevresel koşullar altında daha uzun süre dayanıklılığa sahip olduklarını göstermektedir. (Nolan, et al., 1995). Bu gibi malzemeler yapılarda farklı fiziksel, kimyasal ve biyolojik faktörlerle birlikte değişken hava koşullarına maruz kalmaktadırlar. Islanma-kuruma, donma-çözülme vb. çevresel faktörler malzemedeki gözenekliliğin artmasına ve malzemenin mekanik özelliklerin azalmasına neden olur. Araştırmacılar bu sorunun çözümü olarak, karbonat presipitasyonu yapan bakteriler yardımıyla çatlakları kireçtaşı ile doldurmanın, yapı elemanlarında meydana gelecek bozulmalara karşı bir önlem olarak kullanılabileceğini düşünmüştür. Bununla birlikte, betonlarda meydana gelen erken dönem çatlaklarının bu methodla iyileştirilmesi düşüncesi pek çok araştırmacının bu alanda çalışmaya yöneltmiştir.

Betona ya da harca bakteri ilave edilen sistemin arkasındaki teori, bakterilerin betonun gözeneklerini tıkayan, su ve diğer zararlı maddelerin girişini en aza indiren, böylece beton ömrünü uzatan ve iyi dayanıklılığı koruyan kalsit yaratmasıdır (Ghosh, et al., 2005). Burada kireçtaşı üretimi yapan bakteriyel sistem genel olarak şu şekilde işlemektedir. Karbonat çökelmesi yapabilen bakteri türleri kalsiyum bazlı bir besleyici (kalsiyum laktat, azot ve fosfor vb.) ile birlikte harca karıştırılır. Bakteriler burada yüksek alkali ortama ve yüksek sıcaklığa maruz kalırlar. Kullanılan bakterilerin bu ortamda canlı kalabilmesi gerekmektedir. Bunun için endospor forma geçebilen bakterilerin kullanılması avantaj oluşturur. Spor yapamayan bakterilere ise enkapsülasyon uygulanmalıdır. Harcın yüksek alkali ortamında endospor oluşturarak 200 yıla kadar beton yapının içinde kalabilen bakteri türleri mevcuttur. Bu bakteri sporları yapı çatlaklarından içerisine su almaya başladığında, eğer bakteri için gerekli besin ortamda mevcutsa aktive olurlar. Sonrasında ise bakteri kalsiyum kaynağıyla beslenerek ortamdaki oksijeni tüketir. Kireçtaşı çatlağın bulunduğu alanda katılaşır ve böylece çatlaktan su girişini engeller. Böylece hem çözünür durumdaki kalsiyum kaynağı kireçtaşına dönüşür, hem de ortamda oksijen kalmadığı için donatı korozyondan korunmuş olur.

Kendini iyileştiren betonlar doğa ile betonu buluşturan yeni bir teknolojidir ve çeşitli kaynaklarda biyobeton, canlı beton, biyoçimentolaşma, biyomineralizasyon, bakterili beton olarak da isimlendirilmektedir.

Bakteriyel betonlar normal beton içeriğine ilaveten iyileştirici bir ajanın harç içerisine karıştırılması veya beton kür suyuna ilave edilmesiyle hazırlanmaktadırlar. Bu ajanlar karıştırma ve yerleştirme sırasında bozulmadan kalır, sadece beton çatladığında suyla temas ettiğinde aktif olur. İyileştirici ajanlar olarak görev yapan ve betondaki yüzeysel çatlakları onarmak için $CaCO_3$ kristalleri çökerten bakteriler yaklaşık 200 yıl boyunca betonda hareketsiz kalabilirler (Rao ve diğ., 2013).

Bu çalışmada kullanılan *Bacillus sporasarcina pasteurii* bakterisi üreyi kullanarak amonyak ve karbondioksit üretmek için üreyi katalizleyen üreaz enzimini üretir ve bu da Ca^{2+} ve CO_3^- iyonlarının $CaCO_3$ olarak çökeldiği ortamlarda pH artışı ile sonuçlanır. Hücre yüzeyinde $CaCO_3$'ü çökeltmek için ortamdaki olası biyokimyasal reaksiyonları sağlayan bölge nükleasyon bölgeleridir. Mikrobiyolojik kaynaklı kalsit çökelmesi, *Bacillus sporasarcina pasteurii*, üreaz ve yüksek pH'ın birlikte katılması dahil olmak üzere bir dizi karmaşık biyokimyasal reaksiyondan kaynaklanır. Bu işlemde, alkalofik toprak mikroorganizması olan B. Pasteurii, üre ile amonyak ve karbondioksite hidrolize olan üreaz üreterek önemli bir rol oynar. Amonyak çevrenin pH'ını arttırır, bu da kalsit çökelmesini uyarır (Stocks-Fischer ve diğ., 1999).

Bashir vd., (2016)'nin yaptıkları çalışmadan elde edilen sonuçlar, çatlak oluştuktan sonra betona su girdiğinde, metabolik aracılı kalsiyum karbonat çökeltme işlemiyle, hareketsiz bakterilerin (inaktif) harekete geçtiği ve biyobetonun mukavemetini geleneksel betona kıyasla arttırdığı sonucuna varmışlardır. Bu çalışmaya göre biyo-beton dayanıklıdır, korozyona ve donma çözülmesine daha iyi direnç gösterir ve çatlak düzeltmesi epoksi tedavilerden daha iyidir. Beton yapıda çatlaklar oluştuğunda su bu çatlaklara girmekte, su ve oksijenle buluşan bakteriler spor formdan aktif forma geçmektedirler. Uygun besi yeri ve yeterli kalsiyum kaynağı mevcut olduğunda ortamda çoğalırlar, kalsiyumları karbonat iyonlarıyla birleştirerek çatlakları saran kireçtaşı veya kalsit oluştururlar. Bakterilerin bu amaçla kullanımının bazı avantaj ve dezavantajları mevcut durumda şu şekilde öngörülmüştür (Beena, 2015), (De Muynck ve diğ., 2010):

Avantajları:

- Bakterinin betonda kullanımı, betonun mukavemetini önemli ölçüde artırır, SPÇ betonuna göre daha düşük geçirgenliğe sahiptir.

- Donma-çözülme saldırılarına karşı büyük direnç sağlar.
- Ortamdaki oksijeni kullandığı için donatıdaki korozyon olasılığını azalır.
- Çatlakların giderilmesi hususunda başarıyla kullanılabilir ve betonun bakım maliyetini düşürür.

Dezavantajları:

- Bakterili betonun maliyeti, geleneksel betona göre nispeten daha yüksektir. Bu maliyetin çoğunluğunu bakterinin besin maddeleri oluşturur.
- Bakterilerin her ortamda üremesi mümkün değildir.
- Kalsit çökelmesini araştırmak ve geliştirmek için bütçe ayırmak gerekmektedir.
- Her ne kadar kullanılan bakteriler patojen olmasa da bu bakterilerin çökelme sürecinde oluşturdukları amonyak çevresel olarak kirleticidir. Ayrıca bakterinin betonda kullanımının insan sağlığı ve atmosfer açısından nasıl sonuçlar doğuracağı net olarak bilinmemektedir.
- Onarım süreci kontrol altında tutulmazsa karbonat çökelten bakterilerin yanı sıra zararlı bakteriler de bu süreçte üreyebilirler.

Çimentolu sistemlerde iyileşme ile ilgili ilk çalışma (Dry, 1994) tarafından çimento matrisinde yer alan liflerden akıllı kimyasal salımını içeren kendiliğinden iyileşme mekanizması ile birlikte başlamıştır. Devamında çimento matrisli elemana bio-ajan salma yöntemi denenmiştir. Bu yöntem beton içerisine katılan ve kalsifikasyon sentezleyebilen bakterilerin kalsiyum karbonat ($CaCO_3$) presipitasyonu yapmasıyla meydana gelmektedir. Bu yöntemi deneyen Jonkers, bakteri bazlı kendi kendini iyileştiren betonu elde etmek için ilk önce bakteri sporlarından ve bir organik mineral bileşiğikten oluşan ajanı ortama koymuştur (Jonkers, 2007). Çatlak kaynaklı su girişi ile aktive olan bakteri sporları, mineral öncü bileşiklerini kalsiyum karbonata dönüştürebilen aktif vejetatif hücrelere dönüşmüş. Çelik takviyeli beton çatlaklarında çökelen kalsiyum karbonat, malzemelerin işlevsel su sızdırmazlığını geri kazanmasına ve malzemenin klorür girişine ve donatı korozyonuna karşı duyarlılığının azalmasına neden olmuştur.

Bu sistem içerisinde kullanılan bakterilerin çimento matrisli malzeme içinde faaliyete geçebilmesi için yüksek alkali ortamda yaşayabilmesi, oksijenli solunum yapması, zorlu koşullarda ve az besinle yaşayabilmesi, bunun için de endospor oluşturabilmesi gerekmektedir (Basaran, ve diğ., 2017). Alkalifilik bakteriler endospor formda beton içerisinde yüzlerce yıl yaşayabilirler. Zaman içerisinde beton yapı zarar gördüğünde ise içinde bulunan çatlaklara su

girmeye başlar, bakteriler oksijen tüketen kalsiyum laktatla beslemeye başlar ve çözünebilen kalsiyum laktatı çözülmeyen kireç taşına dönüştürürler. Böylece çatlakları doldururlar (Ramakrishnan ve diğ., 2001), (Achal ve diğ., 2013). Bu durum betonun dayanımını artırır (Basaran ve diğ., 2015), (De Muynck ve diğ., 2008), (Chahal ve diğ., 2012). Bu dönüşüm için oksijen kullanan bakteriler ortamdaki oksijeni tükettikleri için betonarme yapı içerisinde yer alan donatlıların korozyonuna da engel olurlar. Ayrıca boşlukların kapanması ile elemana su girişinin kontrol betonununa (%25) göre bakteriyel betonda %14 oranında azaldığı belirtilmektedir (Sarada ve diğ., 2009), (Ramachandran, 2007).

Şimdiye kadar betonda en sık kullanılan bakteriler alkalifilik, ortamdaki üreyi üreaz enzimi ile parçalayabilen suşlardır. Bakterilerdeki üreaz enziminin karbonat çökelmesine sebep olduğu pek çok araştırmada belirtilmiştir (Hammes ve diğ., 2003), (Burbank ve diğ., 2012), (Li ve diğ., 2013), (Stabnikov ve diğ., 2013). Üreaz etkinliği geniş bir mikroorganizma aralığı içinde bulunur, ancak bazı suşlar üreazı özellikle yüksek seviyelerde meydana getirir. Bunlar üreyi amonyum ve karbonat iyonlarına dönüştürerek çimento matrisli ortamın pH'ını artırırlar. Ortamdaki serbest Ca^{+2} iyonları $CaCO_3$ oluşumunu tetikler. Daha detaylı anlatılacak olursa beton içerisinde boşluk çözeltisi olarak adlandırılan yüksek alkali ortam, K^+, Na^+, OH^- gibi çözünmüş haldeki alkali hidroksitler ile az miktarda Ca^{+2}, SO_4^{-2} gibi diğer iyonlardan oluşmaktadır. Çimento matrisi içerisine seçilen türde bakteri besi ortamı ile birlikte salınım yapıldığında, bakteriler çatlaklardan içeri giren su ile aktive olmaktadırlar. Böylece ortamda bulduğu veya kalsiyum kaynağını, dışarıdan eklenen kalsiyum klorür ($CaCl_2$) (Achal ve diğ., 2011), kalsiyum laktat ($C_6H_{10}CaO_6$) (Jonkers ve diğ., 2010) ve kalsiyum nitratdan ($Ca(NO_3)_2$) (Wang ve diğ., 2012), (Wang ve diğ., 2016) temin ederek kalsiyum (Ca^{+2}) ve nitrat (SO_4^{-2}) bünyesine almakta ve kireçtaşına ($CaCO_3$) dönüştürmektedirler. Ancak $CaCl_2$'ün donatıda korozyona sebep olduğu ve kalsiyum kaynağı olarak kullanımının dezavantaj yaratabileceği dikkate alınmalıdır (Gorospe ve diğ., 2013).

Doğal ortamlarda kalsiyum karbonat çökeltisi, aynı anda veya sırayla meydana gelen ve dört temel faktör tarafından yönetilen biyokimyasal bir süreçtir: Bu faktörler, kalsiyum konsantrasyonu, çözünmüş inorganik karbon konsantrasyonu, pH ve çekirdeklenme alanlarının mevcudiyeti gibi dört temel faktör olarak tespit edilmiştir (Dreesen ve Dusar, 2004), (Castanier ve diğ., 1999) (Hammes ve Verstraete, 2002).

Hücre konsantrasyonu:

Mikrobiyolojik $CaCO_3$ çökeltmesinin hızı bakterinin hücre büyümesi ile paralellik gösterir. Stocks- (Stocks-Fischer ve diğ., 1999). Buradaki mikrobiyal presipitasyon oranının kimyasal çökeltme oranından çok daha hızlı olduğu bildirilmiştir. Bakteriyel hücrelerin yüksek konsantrasyonları (10^6 ile 10^8 hücre arasında) kalsit çökeltisi miktarını arttırmaktadır (Okwadha ve Li, 2010). Bu nedenle üre hidrolizinin bakteriyel hücre konsantrasyonları ile doğrudan ilişkisi vardır (Ng ve diğ., 2012).

Bundur ve diğ. (2017)'nin yaptığı çalışmada çimento-esaslı malzemelerde biyomineralizasyonun gözlemlenmesi için 1 gram harçta hücre miktarının en az 10^5 hücre olması gerektiği bulunmuştur. Yapılan diğer çalışmalarda bunu destekler nitelikte hücre sayısını 10^6 olarak belirtmiştir (Erşan ve diğ., 2015), (Wang, 2013). Bu harçlarda CEM I 42.5 R çimentosu kullanılmış, 7 gün sonunda ise hücre sayısı 10^5 hücre / g olarak tespit edilmiştir. Cüruf kullanımının hücre sayısını nasıl etkilediği ise belirlenmemiştir.

Ancak çatlak onarımı için hücre canlılığının etkisi önem arzetmektedir. Yukarıda bahsedilen çalışmalarda hiçbir koruma önlemi olmadan direkt olarak çimento harcına karıştırılan bakterinin rötre çatlakları gibi erken yaştaki çatlakları iyileştirebildiği kabul edilmiştir.

Ca+ ve üre konsantrasyonu:

İdeal kalsiyum kaynağı ve konsantrasyonu $CaCO_3$ çökelmesi için önemlidir. Bununla birlikte, yüksek konsantrasyonda üre ve $CaCl_2$ (0.5 M'nin üzerinde), kalsit çökeltme verimliliğini azaltmakta ve düşük konsantrasyonlarda (0,05 M - 0,25 M) verim artışı sağlanmaktadır (Okwadha ve Li, 2010). De Muynck ve diğ. (2010), kalsit çökelmesi için en iyi üre ve $CaCl_2$ konsantrasyonlarının sırasıyla 0,5 M ve 0,25 M olduğunu bildirmişlerdir. Aslında Ca^{2+}, metabolik süreçler tarafından kullanılmaz, fakat $CaCO_3$ çökeltisi için hazır bulunan hücrenin dışında birikir (Silver, et al., 1975). Okwadha ve Li (2010), $CaCO_3$ çökeltisi miktarının üre konsantrasyonlarından ziyade Ca^{2+} konsantrasyonuna bağlı olduğunu bildirmişlerdir. Hammes, ve diğ. (2003), üreaz aktivitesi için Ca^{2+} 'nın önemini araştırmış ve Ca^{2+} varlığında enzim aktivitesinin on kat arttığını bulmuştur. Achal ve Pan (2014), üre içeren besin sıvısında farklı kalsiyum kaynakları kullanarak araştırmalar yapmış ve kalsiyum klorürün *Bacillus*

sporasarcina pasteurii için daha yüksek üreaz aktivitesi ve kalsit üretimi sağladığını tespit etmişlerdir.

Bundur (2017), biyomineralizasyon içeren çimento harçlarıyla ilgili yaptığı proje çalışmasında, S. Pasteurii hücreleri sulu besi yerinde büyütülerek, daha sonra bu besi yerine 0,167 moM olacak şekilde kalsiyum klorür- $CaCl_2$ (20 gram/ litre), kalsiyum laktat- $C_6H_{10}CaO_6$ (37.5 gram /litre) ve kalsiyum nitrat- $Ca(NO_3)_2.4H_20$ (40 gram /litre) olmak üzere 3 farklı kalsiyum kaynağı eklemiştir. 24 saat sonra ürünü 20° C' de 6300 devir ve 15 dakika süreyle ile santrifüj etmişlerdir. Elde edilen çökelti SEM (çökelen $CaCO_3$ için ölçüm koşulları: altın kaplama; calışma mesafesi 9-12 mm,voltaj 5 kV) ve XRD (çökelen $CaCO_3$ için ölçüm koşulları: 24 saat 40° C'de kurutma sonrası 10-90° açı (2θ) arasında $0,02^\circ$ lik artışlar) ölçümleri yapmıştır. Sonuçta XRD analizlerine göre $CaCl_2$ ve $Ca(NO_3)_2.4H_20$ her iki besi yerinde de kalsit ve vaterit çökeltmiş, $C_6H_{10}CaO_6$ eklenmesi ile her iki besi yerinde de çoğunlukla kalsit çökmesi gözlemlemişlerdir. Ancak kalsiyum laktat pahalı ve donatı erozyonuna sebep olabileceğinden, kalsiyum klorür de benzer şekilde donatıda erozyon yaratabileceğinden ilgili çalışmada kalsiyum kaynağı olarak kalsiyum nitrat kullanımı tercih edilmiştir. Bahse konu çalışmanın sonuç bölümünde genişliği 0,3 mm olan (25-30 mm derinliğinde) erken yaş çatlaklarının tamamen kapatıldığı gözlemlenmiştir.

Ortamın pH derecesi:

pH'ın mikrobiyal hücreleri etkilemesi iki yoldan meydana gelmektedir. Bunlardan ilki enzimlerin çalışması, ikincisi ise besin maddelerinin hücre içine taşınımıdır. Kesikli fermantasyon denilen bir teknik ile fermantasyon ortamında oluşan laktik asit genellikle $CaCO_3$ ile nötralize edilmektedir.

Kalsit çökeltisi pH'dan etkilenmektedir, çünkü üreaz enzimi sadece üre hidrolizine özgü pH değerlerinde aktif olacaktır. Pek çok araştırmacı üreaz için uygun değerin pH değerinin 8,0 olduğunu, bunun üzerinde enzim aktivitesinin azaldığını bildirmiştir (Stocks-Fischer ve diğ., 1999), (Gorosp ve diğ., 2013). Üre hidrolizi ile amonyak üretimi için yüksek pH çok önemlidir. Aerobik bakteriler, amonyak üretimine ve pH artışına paralel olarak hücre solunumu yoluyla CO_2 salgılar (Ng ve diğ., 2012). PH seviyesi düşük olursa, karbonat çökeltiden ziyade çözünme eğilimi gösterir (Loewenthal ve Marais, 1978). Çoğu kalsit çökeltisi alkali koşullar altında pH

8,7 ila 9,5 arasındadır (Stocks-Fischer ve diğ., 1999), (Ferris ve diğ., 2003), (Dupraz ve diğ., 2009), ancak (Mobley ve diğ., 1995) asit üreaz ve optimum pH'ın neredeyse nötr olduğunu belirtmektedirler.

Sıcaklık:

Oda sıcaklığında başlayan geopolimer reaksiyonu istenilen karışım sağlandıktan sonra 40–100ºC sıcaklıklarda etüv ya da buhar odasında ısıl işleme tabi tutularak polimerizasyon süreci uzatılır. Böylece üretilmek istenilen geopolimer malzeme özellikleri de iyileştirilmiş olur. Geopolimer betonların ekzotermik reaksiyonu üç boyutlu oligomer makro moleküler yapıyı oluşturacak şekilde sürer. Alümino silikat hidratların ısıtılması ile hidroksil iyonları su oluşturmak için ayrışır ve böylece polimerik Si-O-Al bağları oluşur. Geopolimerin yoğuşma polikondenzasyonu ile oluşumu ise aşağıdaki gibi meydana gelir.

$$2\,(Si_2O_5 + Al_2(OH)_4 \longrightarrow 2\,(Si_2O_5 + Al_2O_2)\,n + 4\,H_2O \qquad (2.13)$$

$$4\,SiO + 2Al_2O + 4O_2^- \longrightarrow n\,(Si_2O_5 + Al_2O_3) \qquad (2.14)$$

Bu reaksiyonlar malzemeye uygulanan ön ısıtma ve 100 ºC'ye kadar olan ısıl kür işlemleri ile hızlandırılabilir ve reaksiyona giren alüminosilikat miktarı artar.

Tüm enzim gerçekleştiren reaksiyonlarda da üreazın üreyi katalizlemesi ortam sıcaklığına bağlıdır. Çoğu üreaz için en uygun sıcaklık 20 ila 37 ° C arasındadır ve sıcaklığın 15°C -20°C ve 10°C -20°C arasında arttığında üreaz aktivitesinin sırasıyla yaklaşık 5 kat ve 10 kat arttığı rapor edilmiştir (Mitchell ve Ferris, 2005), (Okwadha ve Li, 2010). Ferris ve diğ. (2003) ise üreaz kinetik hızının ve üreolitik $CaCO_3$ çökeltisinin (B. Pasteurii ile) 10-20°C'deki yapay zemin suyu sıcaklığında optimum olduğunu belirtmişlerdir. Dhami ve diğ. (2014), üreazın 35°C'de tamamen stabil olduğunu, ancak sıcaklığın 55°C'ye yükseldiği zaman enzim aktivitesinin yaklaşık %47 azaldığını tespit etmişlerdir. Fathy ve diğ. (2014) ise yaptıkları çalışmada özgül ağırlığı 3,15 ve Blaine İncelik derecesi 365 m^2/kg olan çimento, 8 mm altı kum, *Bacillus psuedofirmousendolithic* bakteri türü, besi yeri için 8 g Nutrient Broth ve 100 g sesqui çözeltisi (ön ve yetiştirme ortamı/litre) kullanmıştır.

Harikrishnan ve diğ. (2015)'nin yaptığı araştırmada kullanılan bakteri kültüründe 10^8 hücre/ml kullanılmış, öncelikle seri olarak seyreltilmiş deniz suyu, üre %5, sığır eti ekstresi % 0,3, pepton % 0,5, %2 agar içeren seçilmiş kültür üzerine yayılmıştır ve *Bacillus sporasarcina pasteurii* için 37°C'de 24-48 saat inkübe edilmiştir.

Ancak genel olarak tüm bakteriler için uygun yaşama sıcaklığı 20-37 ^oC arasındadır (Mitchell ve Ferris, 2005), (Li ve diğ., 2010).

Çatlak Genişliği:

Genel olarak, bakteri yardımıyla meydana gelen otojen iyileşme çoğunlukla çok dar çatlaklar için etkilidir (Chintalapudi ve Rama, 2016). Bununla ilgili yapılan çalışmalarda farklı çatlak boyutları verilmiştir. Bir çalışmada iyileştirmenin 0,1-0,2 mm genişliğe kadar iyileşme bildirilirken (Amirreza Talaiekhozani ve diğ., 2014), diğer bir çalışma ise 5-300 µm çatlak genişliğini iyileştirebileceğini bildirmiştir (Van Tittelboom ve De Belie , 2013). Ayrıca bakteri içeren çimento esaslı malzemelerdeki 0,1-1,0 mm arasındaki çatlakların kendi kendini iyileştirme potansiyelini araştıran başka bir çalışmanın sonucunda 0,4 mm'nin altındaki çatlaklar neredeyse tamamen kapandığı ve çatlak genişliğinin iyileşme etkinliğini önemli ölçüde etkilediği sonucuna varılmıştır (Chunxiang ve diğ., 2015). 0,8 mm'nin üzerindeki çatlakları iyileştirmenin ise çok zor olduğu belirtilmiştir (Mian ve diğ., 2015). Benzer şekilde bakteri bazlı kendi kendini iyileştirme yaklaşımının, 100 günlük kürlemenin ardından 0,46 mm genişlikte bakteri örneklerinin çatlaklarını iyileştirebileceğini de bulunmuştur (Chintalapudi ve Rama, 2016). Genel olarak, çatlaklar ne kadar dar olursa, tamamen iyileşme olasılığı da o kadar yüksek olabilir (Van Tittelboom ve De Belie , 2013).

Çalışmaların sonuçlarına bakıldığında küçük çatlak genişliklerinde çatlağı doldurmak için daha az ürün gerektiği ve kalsit çökeltisi çatlağın her iki yüzeyinde yığılarak çatlağı kapattığı için daha hızlı bir kapatma meydana geldiği söylenebilir.

Betonun yaşı:

Beton çatlakları betonun hizmet ömrünün herhangi bir döneminde ortaya çıkabilir. Bu nedenle betonun yaşı bakteriyel iyileşme için önemli bir parametredir. Bu nedenle beton yaşının betonun iyileştirme kapasitesi üzerine etkisini araştıran bir çalışmada (Chunxiang ve diğ., 2015) çimento esaslı malzemelerde erken yaşta oluşan çatlakların karbonik anhidraz üretebilen

bakteriler yardımıyla iyileşme potansiyeli araştırılmıştır. Bunun için 7, 14, 28, 60 günlük yaşlarda önceden çatlamış çimento bazlı malzeme örnekleri hazırlanmış ve bakterilerin 7 günlük erken yaşlarda oluşan küçük çatlaklarda mükemmel bir tamir yeteneği gösterdiğini ancak kendi kendini iyileştirici ajanın, 60 günden daha sonraki yaşlarda onarım etkisini kaybettiğini ortaya koymuşlardır. Ayrıca başka araştırmacılar da beton yaşının artmasıyla bakteriyel ajanın iyileştirme yeteneğinin azaldığını ifade etmişlerdir (Mian ve diğ., 2015) ve (Yongjing ve diğ., 2015).

Basınç ve eğilme dayanımına etkisi:

Literatürde çimento bağlayıcılı geleneksel betonların bakteri yardımıyla iyileştirilmesinin araştırıldığı pek çok çalışma mevcuttur. Bu iyileşmenin basınç dayanıma nasıl etki ettiğini araştıran bir çalışmada, UK betonunda kullanılan Sporoscarcina Pasteurii bakterilerinin çatlakları iyileştirici etkisi ile dayanım ve dayanıklılıkta gelişme yarattığı gösterilmiştir (Chahal ve diğ., 2012). Silika dumanı matrisli betonda kullanılan Sporoscarcina Pasteurii bakterilerinin, betonunun kendi kendini iyileştirici etkisi ile birlikte dayamında ve dayanıklılığında bir iyileşme meydana getirdiği tespit edilmiştir (De Muynck ve diğ., 2008). Birçok çalışmada ise bakteriyel iyileştirmenin SPÇ betonunun basınç dayanımınını yaklaşık %20 artırdığından söz edilmiştir (Andalib ve diğ., 2016). Ancak bu artışa etki eden parametrelerin başında bakterinin hücre yoğunluğu gelmektedir (Chahal ve diğ., 2012), (Nosouhian ve diğ., 2016).

Kendinden iyileşen beton üretmek için farklı türdeki ürolitik bakterilerin kullanıldığı ve SPÇ betonların basınç dayanımlarının bakterisiz kontrol betonlarıyla karşılaştırıldığı bir çalışmada, örneklerin 7 ve 28 günlük basınç dayanımları arasındaki ilişki Tablo 2.3'de görülmektedir. Eğilme dayanımları arasında ise, betonun gevreklik özelliğine bağlı olarak, önemli bir fark çıkmadığı belirtilmiştir (Bashir ve diğ., 2016).

Tablo 2.3: Bakterili beton ile geleneksel betonun basınç dayanımlarının karşılaştırılması (Bashir ve diğ., 2016)..

	BAKTERİLİ BETON		**GELENEKSEL BETON**	
	Basınç Dayanımı (N/mm^2)		***Basınç Dayanımı (N/mm^2)***	
Bakterinin adı	7 gün	28 gün	7 gün	28 gün
Bacillus Subtilis	22,18	32,74	20,84	29,99
Bacillus sphaericus	34,58	45,72	20,84	29,99
Bacillus sporosarcina pasteurii	27,09	38,98	20,84	29,99

Austin'deki Teksas Üniversitesinde yapılan bir doktora çalışmasında besi yeriyle çimento harcına katılan Sporosarcina Pasteurii suşunun yaşama yeteneğinin incelenmesinin yanı sıra hidratasyona, priz süresine, basınç dayanımına ve boşluk miktarına olan etkisini araştırılmıştır. Sonuçta çimento harcına katılan bakterilerin, priz süresini uzamasına ve üretimden 7 gün sonraki basınç dayanımında önemli bir artışa neden oldukları gözlemlenmiştir. Bu etkiler, bakterilerin çimento harcına katılması sonucu artan ürün ($CaCO_3$) miktarı ile ilişkilendirilmiştir. Yine bu tez çalışmasında harç üretimi sırasında karışıma ya da kür ortamına ekstra kalsiyum katmadan ürün ($CaCO_3$) miktarı arttırılmıştır. Ayrıca besi yeri ile çimento harcı içine katılan S. Pasteurii hücrelerinin %2'sinin 330 gün boyunca canlı kalabildikleri tespit edilmiştir (Basaran, 2013); (Bundur ve diğ., 2017).

Kashyap ve Radhakrishna (2013), yaptıkları çalışmada *Bacillus sphaericus* ve *Baccilus sporasarcina pasteurii* adlı bakterileri farklı yoğunlukta kültürler içerisinde büyütmüş, çimento macunu ve harç ile karıştırarak dökmüşlerdir. 7 ve 28 günlük ölçümlerde *Bacillus sphaericus* ve *Baccilus sporasarcina pasteurii* bakterili betonların beton harcının mukavemetini geleneksel betona göre sırasıyla %50 ve %28,2 oranlarında artırdığı belirtilmiş, SEM ve XRD analizlerinde bakteriyel betonda kalsit oluşumu gözlenmiştir.

Maheswaran ve diğ. (2014), iki farklı bakteri suşu olan *Baccilus subtilisfor* ve *Baccilus Sporasarcina pasteurii* kullanarak kendi kendini iyileştiren betonun basınç dayanımına etkisini anlamak üzere testler yapmışlardır. 7 günlük basınç dayanımlarında sırasıyla %6,42 ve %9,16 ve 28 günlük basınç dayanımlarında ise sırasıyla %29,99 ve %29,97 artış gözlemlediklerini belirtmişlerdir (Mahesvaran ve diğ., 2014). Bir diğeri araştırmada *Bacillus subtilis* bakterilerinin eklenmesiyle basınç dayanımında %10'luk bir artış ve gözeneklilikte iyileşme gözlendiği belirtilmiştir (Arulsivanantham ve diğ., 2015). Başka birçok çalışmada da karbonat presipitasyonu yapan bakterilerin basınç dayanımında %30-%40 arası basınç dayanımı artışı meydana getirdiğini raporlamışlardır (Ramakrishnan ve diğ., 2001), (Giannaros ve diğ., 2016).

Ersan ve arkadaşlarına (2015) göre, 90. günden sonra bakteri ile karılan SPÇ betonunun basınç dayanımı hafif azalır. Bunun sebebi yüksek pH ile proteinlerin çözünürlüğünün artmasıdır. Bakteriyel sporlar aslında oradaki protein yapılarıdır, çünkü betonun sert, bazik ve katı ortamı bakterinin spor oluşturmasına sebep olur ve bu sporların ayrışması da basınç dayanımı

azalmasına neden olabilir. Ayrıca, eğer hücreler endosporlar oluşturmak yerine ölürlerse benzer bir davranış gözlemlenebilir. Aynı dönemlerde yapılan başka bir SPÇ betonunun bakteriyel iyileştirme çalışmasında da, hücrelerin dahil edildikleri betonlarda sonraki yaşlarda (yani 90 gün sonra) basınç dayanımında hafif bir düşüş olduğunu gösterilmiştir. Bu aynı zamanda ek gözeneklilik yaratabilecek ve harçta böyle bir azalmaya yol açabilecek olan biyokütlenin bozulmasına da atfedilmiştir (Bundur, et al., 2015).

Geopolimer betonda bakteriyel iyileşme üzerine literatürde bir çalışma mevcuttur. Bu çalışma da bakteri sporlarının canlı kalabilme yeteneği ölçülmüştür. Bunun için bakteriler laboratuvar ortamında uygulanan kimyasal bir proses ile spor hale getirilmiş ve daha sonra geopolimer harç içerisine karıştırılmıştır. Sonuçlar bakteri sporlarının geopolimer harç içerisinde canlı kalabildiğini göstermiştir. Bu nedenle bahsedilen çalışma da, sporların enkapsülasyonuna gerek kalmadan harca katılabileceği öngörülmüştür (Jadhav, et al., 2018). Ancak bahsedilen çalışmada da bakterileri spor forma geçirmek için zahmetli bir kimyasal proses uygulanmaktadır. Bu tez çalışması bu süreci kolaylaştırmanın yollarını aramaktadır.

Diğer Araştırmalar:

Boquet ve arkadaşları bakterilerin karbonatlaşma yetenekleri ile ilgili öncü çalışmalarında toprak bakterilerinin laboratuvar koşullarında kalsiyum karbonatı çökeltme yeteneğini göstermişlerdir (Boquet ve diğ., 1973). Daha sonraları bu teknik inşaat sektörünün farklı alanlarına uygulanmış ve umut verici sonuçlar göstermiştir. Bu sonuçlardan en etkileyici olanları beton mukavemetinin ve dayanıklılığının geliştirilmesi (De Muynck ve diğ., 2008), (Achal ve diğ., 2011), tuğla dayanıklılığı (Sarada, et al., 2009), toprak veya kum dayanımı (Van der Ruyt M, 2009), (Qian ve diğ., 2010), (Gurbuz ve diğ., 2011), kum geçirimsizliği (Nemati ve Voordouw, 2003), (Nemati ve diğ., 2005) vb. çalışmalardır. Bunun üzerine farklı bakteri türleriyle araştırmalar yapılmaya başlanmıştır. Bu uygulamalardan biri olarak çürümüş süs taşlarını korumak için bakteriyel olarak indüklenen karbonat çökelmesi denenmiş ve bu sonuç çevre dostu bir yöntem olarak önerilmiştir (Le Metayer-Levrel ve diğ., 1999).

Bir sonraki süreçte karbonat çökelten bakteriler kireçtaşlarının üzerindeki koruyucu kalsin tabakasını güçlendirmede kullanılmıştır. Yumuşak kireçtaşları atmosferik koşullara maruz kaldığında gözenek suyundaki karbonatların çözünür, buharlaşma ve açığa çıkan yüzeyde kalsitin çökelmesi birlikte üzerinde koruyucu bir deri (kalsin) tabakası oluşur. Bu tabaka, alttaki

tabakalara kıyasla daha yüksek bir sertlik ve yoğunluk göstermektedir. Bununla birlikte, atmosferik kirleticilerin bir sonucu olarak, bu tabaka, koruyucu rolünü yitirerek yavaş yavaş bozulur. Bakterilerin kireçtaşı oluşumuna katkıda bulunduğu keşfiyle birlikte, bu kalsinin yeniden kurulması için bakterilerin kullanılması önerilmiştir (Dreesen ve Dusar, 2004).

Bang ve diğ. (2001), poliüretan köpükte hareketsiz hale getirilen *Bacillus sporasarcina pasteurii* 'nin harç küpleri üzerindeki çatlak onarımı etkisini araştırmış ve beton küplerde mukavemet artışı sağlamışlardır. Poliüretan (PU) köpük, bakteriyel iyileştirmenin etkinliğini arttırmış. bununla birlikte elastisite modülü ve gerilme mukavemeti önemli ölçüde değişmemiştir. Bu, çöktürülmüş kalsitin matrisler içinde bir bağlanma malzemesi olarak hizmet etmediği ve sadece bir çökelme şekli olarak kalacağı atıfına yol açmıştır. Kumlu zeminlerde yapılan bir çalışmada ise 0-600µ, 1-2 mm dane çapları arasında maksimum kalsit çökelmesinin 600µ-1mm dane çapı aralığında olduğu ortaya konmuştur (Dejong ve diğ., 2006).

Çimentolu veya çimentosuz betonların iyileşme performansı kimyasal ve mekanik testler veya tahribatsız test yöntemleri ile analiz edilir. Çimentolu sistemlerin geçirimlilik ve dayanım ölçümleri ile mikroyapının optik mikroskobi ile gözlemlenmesi sıklıkla tercih edilen yöntemlerdir. Granger vd (2007) eğilme deneyi esnasında çatlak ağzı açılım deplasman (CMOD) yöntemi ile kontrollü ön çatlak oluşturarak yükü kaldırdığı örnekleri kürlemeye devam ederek iyileşmeyi gözlemlemiştir (Granger vd., 2007).

Çimento bağlayıcılı betonların bakteriyel ajanlarla iyileştirilmesiyle ilgili literatürde oldukça fazla sayıda araştırma bulunmaktadır. Ancak geopolimer harçların iyileştirilmesine yönelik araştırmaların sayısı çok azdır. Bu tez kapsamında yapılan literatür araştırmaları esnasında, geopolimer harcın yada betonun bakteri aracılığıyla iyileştirilmeye çalışıldığı bir araştırmaya rastlanılmıştır. Bu çalışmada S.Sarcina bakterileri uzun bir kimyasal proses ile spor forma dönüştürülmüş ve harç içerisine katılmıştır. Sonuçta bu prosedürle bakteri sporlarının harç içerisindeki canlılığını koruduğunu ve çatlakları $CaCO_3$ ile doldurarak onarımı gerçekleştirdiğini belirtmişlerdir (Umesh ve diğ., 2018). Ancak bu yöntemde uygulanan kimyasal proses oldukça karışıktır. Bu çalışma ile herhangi bir özel işlem yapmadan ve ilave kimyasal kullanmadan, yalnızca uygun tekniklerle geopolimer harca ilave edilen bakterilerin çatlak kapatma kapasiteleri ölçülecek, bunu mümkün olabilmesi için farklı teknikler araştırılacaktır.

3. MALZEME VE YÖNTEM

Bu bölümde bakteriyel iyileştirici ajanın ve geopolimer harcın hazırlanması sırasında kullanılan malzemeler, tezin deney setlerinin hazırlanması, ön deney ve ana deney sürecinde yapılan işlemler ile uygulanan ölçme yöntemleri ayrıntılı olarak anlatılmıştır. Tablo 3.1'de tezin malzeme ve yöntem bölümünün akışı ve içerikleri ayrıntılı olarak verilmiştir.

Tablo 3.1: Malzeme ve yöntem bölümünün akışı ve içerikleri.

Bölüm Numarası	**Bölüm Adı**	**İçeriği**
Bölüm 3	*Materyal ve yöntem*	*Şu an bu bölümdesiniz.*
Bölüm 3.1	Kullanılacak malzemelerin tanıtılması	Geopolimer harç ve bakteri üretiminde kullanılan malzemeler ile ilgili bilgiler.
Bölüm 3.2	Deney setlerinin hazırlanması	Bakteri üretim yöntemi. *Bu çalışmada *Bacillus sporasarcina pasteurii* için literatürde optimum üremeyi sağlayan besin kaynakları ve oranları kullanıldı (Bölüm 3.2.1). Metakaolin tabanlı geopolimerin üretim yöntemi **Harç karışım oranlarının tespiti için ön deney sürecinde literatürdeki oranlardan faydalanılarak geopolimerin harç bileşenlerinin bakteri üzerindeki etkisi gözlemlendi. Elde edilen verilere göre ana deneylerde optimum oranlar kullanıldı (Bölüm 3.2.2).
Bölüm 3.3	Ön deney süreci	Ön deney setleri, kür ortamları ve kodlamaları. ***Ön deney sürecinde bakteri kültürünün geopolimere en uygun yöntemle nasıl karıştırılacağı ve bakterinin canlılığını koruyabileceği en uygun geopolimer harç hazırlama teknikleri araştırıldı. Bu amaçla farklı molaritelerde ve farklı karışım yöntemleri ile numuneler hazırlandı. Spektrofotometrik analiz, NaOH-bakteri kültürü titrasyonu, reaksiyon ısısı, pH, priz süreleri, yayılma çapı, basınç dayanımı ve kılcal su geçirimlilik testleri kullanılarak optimum ortam ve uygun yöntem araştırması yapıldı. Bu bölümün sonunda tespit edilen 2 adet yöntem ve bakterinin yaşam döngüsünü devam ettirebildiği molariteler ile ana deney setleri hazırlandı.
Bölüm 3.4	Ana deney süreci	Ana deney setleri ve kodlamaları. ****Bakteri hücrelerinin metakaoline emdirilerek kademeli ısı artışı ile sporlanması ve bakteri hücrelerinin katı agar üzerindeki spor formunun toplanarak karışım suyu ile birlikte harca ilave edilmesi şeklinde 2 farklı yol ve 4, 8, 12 mol NaOH çözeltileri ile ana deneylerin numuneleri hazırlandı. Geopolimer harcın 3 günlük hızlı kür süresinden sonra 7. güne kadar nem almadan dayanımlarını kazanması beklendi. 7. günde kontrollü çatlak oluşturulan numuneler 60. güne kadar bakteri kültürü ve besi yeri içerisinde iyileştirildi. Yoğunluk, su emme, görünür porozite, çatlak kapatma başarısı, ultrases geçiş süresindeki değişimler, kılcal su geçirimliliği, basınç ve eğilme dayanımındaki değişimler açısından incelendi. İç yapı değişimleri SEM, EDS ve FTIR analizleri ile takip edildi.
Bölüm 3.5	Uygulanan Ölçme Yöntemleri	Tüm deneylerin yapılışı (Ön deney ve ana deney süreci dahil). Bölüm 3.5.1'de mikrobiyolojik test yöntemleri, 3.5.2'de ise geopolimer harç ile ilgili deneyler yer almaktadır.

3.1 KULLANILAN MALZEMELER

3.1.1 Geopolimer Harç Üretiminde Kullanılan Malzemeler

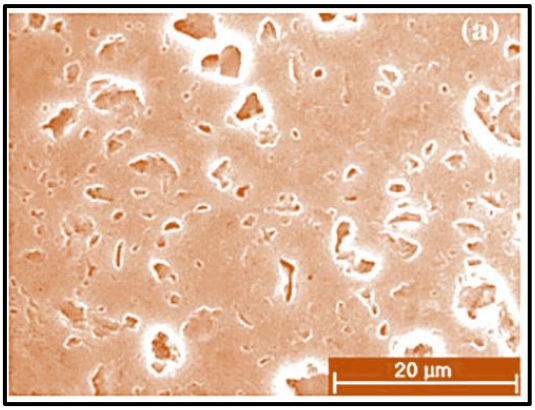
Bu çalışmada harç numuneler hazırlanırken bağlayıcı malzeme olarak çimento yerine MK ve cüruf esaslı puzolanik maddeler kimyasal aktivatörler ile birlikte kullanılmış, böylece geopolimer numunelerin oluşumu sağlanmıştır. Çalışmanın deneylerinde bu puzolanların tercih edilme nedeni, literatür araştırmaları sonucu geopolimer harcı oluşturan puzolanik maddeler içerisinde çevre dostu ve kabul edilebilir basınç dayanımı kriterlerine göre, en optimum değerleri veren kompozitin bu şekilde oluşturulabildiğinin tespit edilmesidir (Davidovits, 1991), (Pelisser ve diğ., 2013).

3.1.1.1 Metakaolin

MK, geopolimer üretiminde kullanılan ana puzolanik malzemelerden biridir ve kil mineralli kaolinitin hidroksillenmiş bir formudur (Duxson ve diğ., 2007). MK kilinin ana bileşenleri amorf AI_2O_3 ve SiO_2'dir. MK, hızlı mukavemet kazanma ve alkali çözeltilerde iyi birleştirme performansı sergilemektedir. Bu nedenle, uçucu kül, endüstri ürünü küller, kaolin ve diğer killere oranla, geopolimer matrisde ana bileşen olarak daha fazla tercih edilmektedir (Yang ve diğ., 2017), (Belmokhtar ve diğ., 2017).

Yüksek miktarlarda AI_2O_3 ve SiO_2 içeren kil türevi metakaolinin bu bileşenleri hidratasyon ürünü olarak meydana gelen $Ca(OH)_2$ ile reaksiyona girer. Reaksiyon sonucunda dayanımı sağlayan kalsiyum silikat hidrat (CSH) yapıları ile alümina içeren fazlar meydana gelir. Böylece beton dayanımında artış sağlanmış olur (Yazıcı ve diğ., 2010).

MK, ortalama özgül ağırlığı 2.6 g/cm^3; birim hacim ağırlığı 0,3-0,4 (g/cm^3), parlaklığı 79-82 arasında olan kirli beyaz renkte toz bir malzemedir (Siddique ve Klaus, 2009). Biçimsel olarak oldukça küçük, çubuksu şekilli ve köşelidir, MK'den elde edilen geopolimer ise şekildeki görüntüyü vermektedir (Şekil 3.1). İnce tanecikli olması betondaki boşlukları daha iyi doldurmasını sağlamakta, ayrıca harcın akışkanlığının azalmasına sebep olmaktadır (Tevrizci, 2010). Harçta yüksek oranda reaktif MK ve potasyum veya sodyum alkali çözeltileri kullanılarak gözeneklilik oranında %20-30 arasında azalma yapılması mümkündür (GharzouniabI ve diğ., 2016).



Şekil 3.1: Metakaolin esaslı geopolimer.

Pelisser ve diğ. (2013) MK esaslı geopolimer harçların mekanik özelliklerini elastikiyet, sertlik, basınç ve eğilme dayanımı, eğilme modülü ve mikro yapısal analiz modüllerini açısından incelemiştir. Geopolimer harçların, mukavemet özellikleri ve esneklik katsayısı bakımından Portland çimento harçlarından daha iyi sonuçlar verdiğini ortaya koymuştur. Ayrıca aynı çalışmada, geopolimer ve SPÇ harçların mikro mekanik özellikleri açısından benzer davranışlar gösterseler de deformasyon kapasitesi ve basınç mukavemeti açısından geopolimer harçların daha iyi sonuç verdiği gösterilmiştir. Rovnaník ve Al tarafından (2010) yılında yapılan çalışmada ise kürleme sıcaklığını ile sertleşme arasındaki ilişki araştırılmış, 10, 20, 40, 60 ve 80 ° C sıcaklıklarda alkali ile aktive olmuş MK malzemenin basınç ve eğilme dayanımı, gözenek dağılımı ve mikro yapısı incelenmiştir. Çalışma, kümülatif gözenek hacmi ile sıcaklık artışı arasında doğrusal bir ilişki olduğunu ve bunun da mekanik özellikleri etkilediğini ortaya koymuştur. Ayrıca kızılötesi spektroskopi testi ile reaksiyon sürecinin izlenmesinin mümkün olduğu sonucuna varılmıştır.

Bu tezde kullanılan MK Kaolin Endüstriyel Mineraller A.Ş. (İstanbul, Türkiye)'den temin edilen MK'in puzolanik aktivite indeksi 1359 $MgCa(OH)_2$ / g ve özgül ağırlığı 2,52 g/cm^3 'tür. Kullanılan MK'in kimyasal bileşimi Tablo 3.2'de verilmiştir.

Tablo 3.2: Metakaolin kimyasal analizi (%).

BİLEŞEN	İÇERİK (%)	BİLEŞEN	İÇERİK (%)
SiO_2	56,10	MgO	0,16
Al_2O_3	40,23	K_2O	0,51
Fe_2O_3	0,85	Na_2O	0,24
TiO_2	0,55	B_2O_3	-
CaO	0,19	Kızdırma Kaybı	1,10

Metakaolinin %70'inin tane boyutu 45 μm'den büyüktür. Çok ince taneli malzemeler oldukça reaktiftir. Bu nedenle yüksek yüzey alanına sahip bu malzemeler reaksiyonlara da açıktır.

3.1.1.2 Cüruf

Yüksek fırın cürufu (YFC) bir atık malzeme olarak, saf olmayan demir cevherinden pik demir üretimi, çelik üretimi ya da kok kömürünün yanma artığı gibi üretimlerden elde edilir. Ana bileşenlerini kalsiyum oksit (CaO), silisyum oksit (SiO_2), alüminyum oksit (Al_2O_3) ve magnezyum oksit (MgO) oluşturur. Bunların dışında düşük miktarda sülfür (SO_3), demir (Fe_2O_3), sodyum oksit ve potasyum oksit (Na_2O, K_2O), manganez (Mn_2O_3), fosfor (P_2O_5) ve titanyum (TiO_2) içerir.

Eriyik haldeki cüruf basınçlı su altında hızlıca soğutulduğunda ince taneli, camsı Ca-Al–Mg silikat yapısı meydana gelir. Buna granüle yüksek fırın cürufu denilir. Cürufun hızla soğutulmasıyla kristal yapıların oluşumu minimize edilir. Elde edilen cüruf, geneli amorf ve ince agrega boyutunda bir malzeme haline gelir. Yaygın kullanım şekli ise Portland çimentosu ile yer değiştirerek kullanmaktır. Kısacası cüruf, bileşikler ve erimiş karışımlar oluşturan ve bazı miktarlarda metal, sülfat ve gaz içeren metalik ve metalik olmayan oksitlerin çok bileşenli bir sistemidir. Amorf haldeki bu malzeme yüksek silika ve alümin içeriği nedeniyle puzolanik davranış gösterir.

Cüruflar yangına dayanımı yüksek olan ve toksik olmayan malzemelerdir ve geopolimer yapımı için uygun bir hammadde olarak kullanılmaktadır (Erdoğan, 2002). YFC'nun SPÇ betonu içerisinde mineral katkı olarak %30 oranına kadar kullanıldığında, puzolanik, kimyasal ve termal özelliklerinden dolayı harçların yüksek sıcaklık ve sülfat dirençlerini arttırdığı bilinmektedir (Topçu ve Bilir, 2007).

Metakaolin esaslı geopolimer harçlara cüruf eklenmesinin nedeni ise kalsiyum silikat alüminat fazlarının oluşumunu desteklemesi aynı zamanda geopolimer bağlayıcı matrise yük dengeleyici katyon ilave edilmesidir (Van Jaarsveld ve Van Deventer, 1999).

Bu tezde kullanılan öğütülmüş YFC, Eti Antalya Elektrometalürji A.Ş.'den (Kepez-Antalya / Türkiye) temin edilmiş, spesifik yüzey alanı ve özgül ağırlığı sırasıyla 20.000 m^2/kg ve 2,20 g/cm^3'tür. Kimyasal bileşimi ise Tablo 3.3'de verilmiştir.

Tablo 3.3: Cürufun kimyasal analizi (%).

BİLEŞEN	İÇERİK (%)	BİLEŞEN	İÇERİK (%)
SiO_2	40,55	MgO	5,87
Al_2O_3	12,83	K_2O	0,68
Fe_2O_3	1,10	Na_2O	0,79
TiO_2	0,75	B_2O_3	-
CaO	35,58	Kızdırma Kaybı	0,03

3.1.1.3 Lif

Çeşitli türdeki lifler uzun yıllardır taze betonda çatlak oluşumunun engellenmesi, betonun eğilme gerilmeleri karşısındaki aderansının artırması, çarpma dayanımının ve tokluğun arttırılması, sünekliğin artırılması dolayısıyla gevrek kırılmanın azaltılması ve durabilitenin artırılması amacıyla beton içerisinde kullanılmaktadır (Newman ve Choo, 2003). Lifler doğal, metalik, sentetik ve cam lifleri olarak üretim malzemesine göre farklı çeşitlere ayrılmaktadır. Bağlayıcı matrisdeki yapı malzemeleri içerisinde ise en çok sentetik lifler kullanılmaktadır. Akrilik, aramid, naylon, polyester, polipropilen ve poliolefin lif gibi pek çok sentetik lif çeşidi mevcuttur.

Lifler benzer amaçlarla geopolimer betonlarda da kullanılmaktadır. Yapılan bir çalışmada geopolimer malzemede kullanılan liflerin lifsiz kompozitlere göre kompozitin mekanik özelliklerinin geliştirilmesine katkıda bulunduğu belirtilmiştir (M.Al-mashhadania ve diğ., 2018). Ayrıca liflerin geopolimerin mekanik özellikleri üzerindeki etkilerini inceleyen başka bir makalede elde edilen sonuçlar, polipropilen elyafın ve bazalt elyafının, geç yaşta mekanik özellikleri iyileştirebileceğini, elyafların stres konsantrasyonunu hafifletebileceğini, spesifik yüzey alanını artırabileceğini ve geopolimerin ortalama gözenek çapını önemli ölçüde azaltabileceğini göstermektedir (Guo ve Pan, 2018).

Bu tezde 6 mm mikro sentetik lif, çatlak boyutunu kontol edebilmek amacıyla geopolimer harç içerisinde %0,5 oranında karıştırılmıştır. Daha uzun ve yoğun lif kullanımı geopolimer harcın işlenebilmesini azaltmaktadır. Kullanılan lifin özellikleri Tablo 3.4'de, fotoğrafı Şekil 3.2'de verilmiştir.

Tablo 3.4: Sentetik lifin özellikleri.

UZUNLUK (MM)	ÇAP (µM)	ÖZGÜL	ÇEKME DAYANIMI (MPA)	NARİNLİK
6	0,0075	0,90	740	800



Şekil 3.2. Kullanılan sentetik lif ve YFC.

3.1.1.4 Agrega

Deneylerde TS EN 196-1'e uygun, tane büyüklüğü 0,08-2 mm arasında, birim ağırlığı 1350 g/cm^3, özgül ağırlığı 2560 g/cm^3 olan ve Limak Çimento A.Ş.'den temin edilen standart kum kullanılmıştır. Standart kumun standart değerleri ve granülometrisi Tablo 3.5'de verilmiştir.

Tablo 3.5: Standart kum granülometrisi ve sınır değerler.

TANE BÜYÜKLÜĞÜ	0,08	0,16	0,5	1	1,6	2,0
Kalan	99	87	72	34	6	0
Sınır	99±1	87±5	67±5	33±5	7±5	0

3.1.1.5 Aktivatörler

GH içerisinde yer alan aktivatörler, matriste bulunan silisli ve alüminli içeriklerin kristalleşmesinde rol oynar. Hidroksit iyonları (OH^-) metakaolini aktive etmek için bir katalizör görevi yapar. Böylece metal katyon yapısal eleman oluşturmak ve tetrahedral alüminler tarafından kurulan negatif çerçeveyi dengelemek için çalışır. Reaksiyon aktivatör olan alkali çözeltinin puzolan olan metakaolini ya da kili çözmesi ile başlar. Böylece reaktif olan alüminler çözelti haline gelerek reaksiyona katılır.

Aktivatör grupları arasında alkaliler, silikatlar, alüminatlar, alüminosilikatlar ve güçlü tuz asitleri sayılmaktır (Torgal F.P. ve diğ., 2008). Yaygın olarak kullanılan aktivatörler ise NaOH, Na_2SO_4, Na_2CO_3, KOH, çimento klinkeri vb kimyasallardır (Khale ve Chaudhary, 2016).

Sodyum Hidroksit:

Sodyum hidroksit kostik soda olarak bilinen beyaz, katı, inorganik ve iyonik bir bileşiktir. Proteinleri normal ortam sıcaklıklarında parçalayan ve ciddi kimyasal yanıklara neden olabilen yüksek derecede kostik bir baz ve alkalidir. Aynı zamanda endüstride sıkça kullanılan oldukça güçlü bir bazdır. Suda oldukça çözünür ve nemi ve karbondioksiti havadan kolayca emer. Bir dizi hidrat NaOH · nH oluşturur. Saf sodyum hidroksit, ayrışma olmadan 318 ° C'de eriyen renksiz kristal bir katıdır. Suda çok iyi çözünür, etanol ve metanol gibi polar çözücüler içinde daha düşük bir çözünürlüğe sahiptir. NaOH, eter ve diğer polar olmayan çözücüler içinde çözünmez. Su içinde katı sodyum hidroksitin çözünmesi, yüksek miktarda ısıyı serbest bırakan ve sıçrama olasılığı ile güvenlik açısından bir tehdit oluşturan, yüksek bir ekzotermik reaksiyondur. Ortaya çıkan çözelti genellikle renksiz ve kokusuzdur. Diğer alkali solüsyonlarda olduğu gibi NaOH da, ortaya çıkan sabunlaşma sürecinden dolayı, cilt ile temasında kayganlık hissi verir.

Sodyum hidroksit endüstriyel olarak elektrolitik kloralkali işleminin varyasyonları ile % 50'lik bir çözelti halinde üretilmektedir. Bu işlemde klor gazı da üretilmektedir. Bu çözeltiden suyun buharlaştırılmasıyla katı sodyum hidroksit elde edilir (Du vd., 2018).

Bu bileşik, temizlik sektörü başta olmak üzere pek çok endüstri alanında kullanıldığı gibi inşaat sektöründe de kendine yer bulmaktadır. Örneğin petrol endüstrisinde, bentonitin çamur viskozitesini arttırmak ve herhangi bir asit gazını (hidrojen sülfit ve karbondioksit gibi) nötralize etmek için kullanıldığı gibi sondaj çamurunda bir katkı maddesi olarak kullanılabilir. GH yapımında ise karışımın alkalinitesini arttırmak veya asitleri nötralize etmek içinde kullanılır. Çimento karışımlarının homojenleşmesine yardımcı olur, karışımın aderansını artırır, karışım suyu miktarını azaltır ve çimento ürününün işlenebilirliğini arttırır.

Bunun dışında su arıtma sırasında pH'ı yükseltmek için kullanılmaktadır. Artan pH, suyun sıhhi tesisat için daha az korozif olmasını sağlar ve içme suyuna karışabilen kurşun, bakır ve diğer toksik metallerin miktarını azaltır (Anon., 2018).

Çalışmada kullanılan sodyum hidroksit Tekkim firmasına ait, %99 saflıkta, beyaz renkte ve boncuk formdadır. 40 gr/mol ağırlığı bulunan NaOH ile 12 mol çözelti hazırlamak için 480 gram NaOH 1 litre suyla tamamlanmıştır. Sodyum hidroksitin kimyasal özellikleri Tablo 3.6'da verilmiştir.

Tablo 3.6: Sodyum hidroksitin kimyasal özellikleri.

NaOH (%)	Na_2CO_3 (%)	SO_4 (%)	Fe (%)	Al (%)
99	0,28	< 0,01	< 0,002	< 0,002

Çözelti konsantrasyonu hesaplanırken aşağıdaki formül kullanılmıştır. Hazırlanan farklı molaritedeki çözeltiler Şekil 3.3'de gösterilmiştir.

NaOH miktarı (g/l)= 1 mol NaOH ağırlığı x çözeltinin molaritesi



Şekil 3.3: Farklı molaritelerde hazırlanmış NaOH çözeltileri

Sodyum Silikat:

Sodyum silikatlar renksiz camsı veya kristalli katılar veya beyaz tozlardır. Yüksek sıcaklık ve yüksek basınç altında silisyumdioksit ile sodyum/potasyum karbonatların çözülmesiyle meydana gelirler. Yarı viskoz kıvamda bulunurlar (Jimenez ve diğ., 2005). Çoğunlukla, silikon bakımından zengin olanlar hariç, bunlar suda kolayca çözünür ve alkali çözeltiler üretirler.

Genellikle puzolanı aktifleştirmek için tek başına kullanılacak kadar aktivasyon enerjisini barındırmadıkları için dayanım artışı ve yeterli alkalin ortamı sağlamak için KOH veya NaOH ile birlikte kullanılırlar.

Bu çalışmada kimyasal aktivatör olarak sodyum silikat (Na_2SiO_3) ve sodyum hidroksit (NaOH) kullanılmıştır. Kullanılan sodyum silikat, sıvı formda, 184,04 g/mol molekül ağırlığına ve 1,35 g/cm^3 (20˚C) sahiptir. Erime noktası 1410, kaynama noktası 2355 ˚C'dir. Kullanılan Sodyum silikatın kimyasal özellikleri Tablo 3.7'de verilmiştir.

Tablo 3.7: Sodyum Silikatın kimyasal yapısı.

SiO_2 (%)	Na_2O (%)	Fe (%)	AĞIR METAL (%)	YOĞUNLUK (g/cm^3)
27	8,15	< 0,005	< 0,005	1,370

3.1.1.6 Yapı Laboratuvarı Deney Ekipmanları

Basınç ve 3 noktalı eğilme presi; Harç numunelerin basınç dayanımlarının tespiti için kullanılan basınç presi, sertleşmiş küp numunenin basınç dayanımını otomatik olarak ölçmede kullanılır. Kullanılan basınç presi küp numuneler için 40x40x40 mm ve 50x50x50 mm başlıklara sahiptir. Eğilme testi için ise 40x40x160 mm ebatlarındaki numuneler kullanılmıştır. Her iki testin de yapılabildiği cihaz Besmak/semetron marka ve 2000 kN kapasitelidir (Şekil 3.4a).

Etüv; istenilen sıcaklıklarda ısıtma veya kurutma amaçlı kullanılan laboratuvar fırınlarına denilir. Etüvler farklı hacimlerde farklı sıcaklıklarda çalışabilmektedir. Bu çalışmada kullanılan etüv 60 °C ile 250 °C arasında sıcaklıkta çalışabilen ve dijital termostat ile sıcaklığı ayarlanabilen büyük hacimli bir etüvdür (Şekil 3.4b).



Şekil 3.4: a) Basınç ve eğilme presi b)Etüv c) Su altı terazisi

Hassas terazi ve su altı ağırlık ölçüm seti; Yapı laboratuvarında yapılan harç numunelerin ölçümlerinin tamamında 0,01 gram hassasiyetli terazi kullanılmıştır (Şekil 3.4c).

Yayılma tablası; çimento, kireç ve harç kıvamının belirlenmesinde kullanılan, altta 300 mm çaplı tabla, üstünde taban çapı 100 mm, üst yüz çapı 70 mm ve yükseklik 60 mm olan kesik koni şekilli kalıptan imal edilmiş bir alettir. Çevirmeli kol ile 15 düşüş yaptırılan tablada harcın yayılma çapı ölçülmektedir. Kullanılan tabla Şekil 3.5 a'da görülmektedir.

Vicat Aleti: Bağlayıcı malzemenin kıvamını ve priz süresini öğrenmemizi sağlayan, otomatik ya da manuel tipleri mevcut olan deney aletidir. Vicat halkasının içerisine çimento hamuru doldurularak, vicat iğnesinin hamura batma miktarı ve batma süresinin ölçülmesi prensibiyle çalışır. Bu deney geopolimer harcın priz süresini öğrenmek için kullanılmıştır (Şekil 3.5 b).



Şekil 3.5: a) Yayılma tablası b) Vicat aleti.

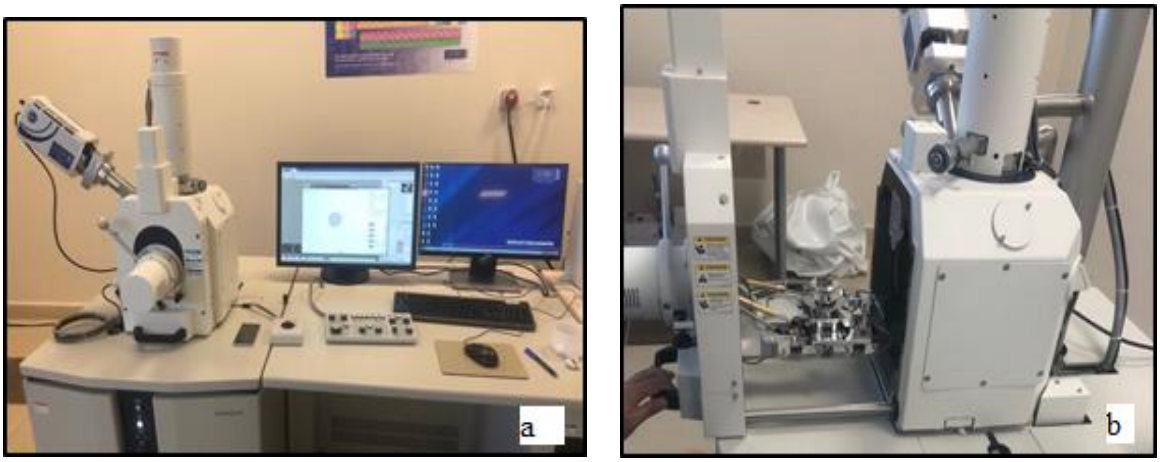
Mikser ve harç kalıpları: Çalışmada kullanılan mikser, bağlayıcı esaslı harçların içerisinde homojen karıştırılmasını sağlayan, 3 hız seviyesine sahip 20 dm^3 harç karma kapasitesine sahip bir cihazdır. Kalıplar ise 5 mm kalınlığa sahip paslanmaz çelikten oluşturulmuş, sökülüp takılabilen, 40x40x40 mm küp ve 40x40x160 prizma ölçülerde malzemelerdir (Şekil 3.6 a, b).



Şekil 3.6: a) Mikser b) Metal kalıp

Taramalı elektron mikroskobu (SEM, scanning electron microscope); Odaklanmış bir hızlandırılmış elektron demetini kullanarak numune yüzeyini tarayan, saçılan elektronların alıcı detektörlerle analiz edilmesi prensibiyle çalışan ve görüntüyü mikro düzeyde gösterebilen bir elektron mikroskobu türüdür. Bu cihazlarla görüntülemenin yanı sıra görüntü alınan noktada element analizi yapılabilir ve elementlerin dağılımı izlenebilir (EDS). Taramalı elektron mikroskobu, tungsten, lantan hekzaborit katottan veya alan emisyonlu (FEG) gun'dan ortaya çıkan elektronlarının incelenecek malzeme yüzeyine gönderilmesi sonucu oluşan etkileşmelerden yararlanılması esasına dayanır. Bu elektron enerjisi 200-300 eV dan 100 keV'e kadar değişebilir. Bu amaçla, yoğunlaştırıcı elektromanyetik mercekle (condenser lense) toplanan ve objektif mercekle odaklanan elektron demeti, yine elektromanyetik saptırıcı bobinlerle örnek yüzeyinde tarama işlemini (scanning) gerçekleştir. Elektron demetinin incelenen örneğin yüzeyi ile yaptığı fiziksel etkileşmeler (elastik, elastik olmayan çarpışmalar ve diğerleri) sonucunda ortaya çıkan sinyaller detektörlerle toplanır ve bilgisayar tarafından analiz edilir. (TAEK, 2019).

Bu tez için sertleşmiş harç numunelerin 7. gün ve 60. gün SEM ve EDS analizleri Munzur Üniversitesi görüntüleme merkezinde bulunan Hitachi SU3500 cihazıyla yapılmıştır (Şekil 3.7 a ve b). Numuneler işlem öncesi daha düzgün bir görüntüleme için altın tozu ile kaplanmıştır.



Şekil 3.7: a) ve b) Taramalı elektron mikroskobu.

FTIR; FTIR Spektroskopisi olarak da bilinen Fourier Transform Infrared Spektroskopisi, organik, polimerik ve bazı durumlarda inorganik malzemeleri tanımlamak için kullanılan analitik bir tekniktir. Cihazın çalışma prensibi farklı bağ türleri ve dolayısıyla farklı fonksiyonel grupların farklı dalga boylarındaki kızılötesi radyasyonu emmesine dayanır. Bu tezde FTIR ölçümleri geopolimer numunelerdeki bakteriyel kür öncesi ve kür sonrası karbonatlaşma mevcudiyetinin tespiti için kullanılmıştır. FTIR ölçümleri Munzur Üniversitesi laboratuvarında bulunan Şekil 3.8 a'da görülen cihaz (JASCO FT/IR 6700) ile yapılmıştır.

Ultrases Ölçüm Cihazı; Ultrasonik dalgaların alıcı ve verici iki prob arasına yerleştirilen beton numuneden geçiş süresini ölçme esasına dayanarak çalışan ve betonda tahribat yaratmayan bir cihazdır. Demetler şeklinde bir probdan yollanan ses dalgalarının diğer proba ulaştığı süre cihaz tarafından ölçülür. Bu arada numunenin betonun içerisinde bulunan, kusurlar, boşluklar, çatlaklar ve donatılar ses dalgalarını yolundan saptırarak yansıyıp geri dönmesine neden olurlar. Bu geri dönüş ışınların gidiş-dönüş süresini değiştirir. Bu farklılık bize numunenin homojenliği, içyapıdaki boşluk ve iç çatlak oranı, elastisite modülü gibi hususlarda bilgi verir. Tezdeki sonuçların elde edilmesinde kullanılan cihaz Şekil 3.8 b'de gösterilmektedir.



Şekil 3.8: a) FTIR cihazı b) Ultrases geçiş hızı cihazı.

3.1.2 Bakteri Üretiminde Kullanılan Malzemeler

3.1.2.1 Bacillus sporosarcina pasteurii

Bu tezde kullanılan bakteri türü olan *Bacillus sporosacina pasteurii* (DSMZ 33) , fakültatif anaerobik bir bakteridir. Aerobik veya anaerobik olarak büyüyebilirler ancak oksijen varlığını tercih ederler ve aerobik solunum yoluyla metabolik olarak aktiftirler. Bu nedenle, çatlak onarımında yüzeye yakın bölgelerde daha fazla kalsit çökeltisi olması beklenir (Ramakrishnan ve diğ., 2001). *Bacillus sporosacina pasteurii*, yüksek alkali ortamlara dayanabilir. Gram pozitif bir bakteridir. Oldukça kalın olan dış hücre membranı, uygun bir ortamın büyümesi için müsait olana kadar uykuda kalmalarını sağlar. Su varlığında aktif hale gelirler (Jonkers, 2007). *Bacillus sporosacina pasteurii*, tek tek aktif bölgelerdeki iki nikel atomunu içeren üç farklı alt birim içeren hücre ağırlığının yaklaşık %1'ini oluşturan hücre içi üreaz üretir (Benini ve diğ., 1999). Sarada ve diğ. (2009) yılında yaptıkları çalışmada *Bacillus sporosacina pasteurii*'nin, *Bacillus lentus ve Bacterium ammoniagenes'*den daha fazla üreaz üretimi gösterdiğini tespit etmişlerdir.

Bu çalışmada kullanılan bakteri türünün koloni morfolojisi, hücre morfolojisi, gram boyama reaksiyonu ve bakteri cinsi gibi genel tanımlama verileri için yapılan testlerin sonuçları Tablo 3.8'de verilmiştir.

Tablo 3.8: *Bacillus sporosacina pasteurii* bakterisinin genel tanımlama verileri.

MORFOLOJİ	OKSİJEN	GRAM BOYAMA	GLUKOZ	SPOR
çubuk	aerob	pozitif	yok	var
AGAR PLAKA KOLONİ TARİFİ				
Daire şekli	yüzeysel	Kenarları düzgün	Açık krem renkte	pH: 9

2.1.2.2 Üre

Üre, formülü CH_4N_2O veya NH_2CONH_2 olan organik bir bileşiktir. Karbonik asidin diamidi, karbamik asidin de amidi olduğundan karbamid olarak da anılır. Ozmotik diüretik aktiviteye sahip iki amin grubuna bağlı bir karbonil grubu içeren azotlu bir bileşiktir. Bu tezde kullanılan ve ürolitik bakterilerden olan S.pasteruii bakterisi ortamdaki üreyi kullanarak hidroliz yaparak $CaCO_3$ oluşumunu gerçekleştirir. Kullanılan üre Merck marka, 60,06 g/mol ağırlığa sahip, %99,5 saflıkta $CO(NH_2)_2$ formüllü bir üründür ve bu çalışmada 20 g/l olarak kullanılmıştır.

2.1.2.3 Pepton

Proteinlerin hidrolizi ile elde edilen sarı renkli, ince toz halindeki ürünlere pepton denilmektedir. Çoğu mikroorganizma proteinleri parçalayamazlar, bunun için laboratuvar ortamında mikrobiyolojik kültür ortamının hazırlanmasında peptonlar kullanılırlar. Peptonun içeriğinde azot ve karbonun yanı sıra pek çok aminoasit ve vitamin de bulunur. Genel olarak et özünden üretilirler ve yüksek oranda besleyici bir enzimatik üründür. Bu sebeple kültür ortamının bir bileşeni olarak kullanılır. Bu çalışmada besi yeri hazırlamada Neogen marka et peptonu 20 g/l olarak kullanılmıştır.

2.1.2.4 Mikrobiyolojik Agar

Sıvı besiyerlerini katı besiyerine dönüştürmek için kullanılan, kırmızı bir deniz yosunu türünden elde edilen, vizkoz yapıda, bileşiminde jelleştirici D-galakton, inorganik tuz, az miktarda protein benzeri maddeler ve eser miktarda yağ bulundurur. Mikroorganizmalar için bir besin maddesi olarak kullanılamaz. Besiyerinin pH'ına göre değişmekle birlikte genel olarak 85–90 ^oC'da erir, 35–40 ^oC sıcaklıkta jelleşir. Bu çalışma için pH 9'a sabitlenen besiyerine 12 g/l olacak şekilde Merck marka ultra saflaştırılmış agar eklenerek otoklavlanmış ve 45 ^oC 'a kadar soğutularak petri kaplarına dökülmüştür.

2.1.2.5 Sodyum Klorür

Yaygın adıyla tuz olarak bilinen sodyum klorür besiyerinin bileşimine izotonik bir ortam oluşturmak için katılır ve besiyerinde izotonik denge oluşturur. Bu çalışmada da besi yeri hazırlamak için ortama 5 g/l tuz ilave edilmiştir. Tüm bileşenler saf su ile tamamlanmıştır.

2.1.2.6 Kalsiyum Nitrat Tetrahidrat

Kalsiyum nitrat $Ca(NO_3)_2$ x $4H_2O$ formülüne sahip, 236,15 g/mol ağırlığında, bünyesinde azot ve yüksek oranda kalsiyum içeren, ince taneli, renksiz, havadaki nemi çok çabuk alabilen inorganik bir bileşiktir. Bu çalışmadaki kullanım amacı ise şu şekildedir: Ürolitik bakteriler üre hidrolizinden $CaCO_3$ oluştururken ortamdaki serbest Ca iyonlarını kullanırlar. Kalsiyum iyonu, kalsiyum hidroksit oluşumunu, böylece yağış ve çökelme hızını artırır. Bu nedenle betondaki bakteriyel iyileştirme kürü sırasında besi yeriyle birlikte ortama Merck marka, ultra saf kalsiyum nitrat tetrahidrat 30 g/l olacak şekilde ilave edilmiştir.

2.1.2.7 Mikrobiyoloji Laboratuvarı Deney Ekipmanları

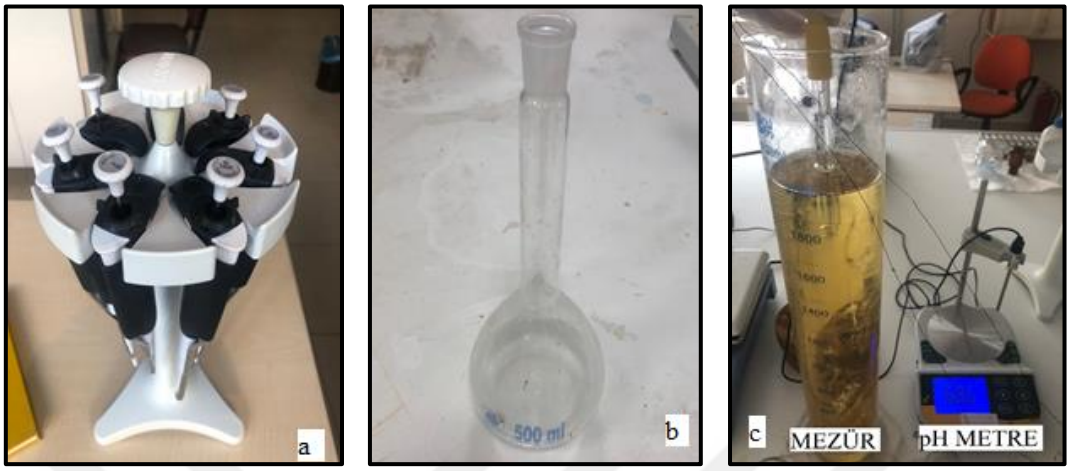
Petri kutusu; 15 mm yüksekliğinde, 90 mm çapında, iç içe geçmiş iki cam veya saydam plastik kapaktan teşkildir. İçerisine 2-3 mm yüksekliğe ulaşana kadar agarlı besi yeri dökülerek bakteri sayımı yapılır. Petri kaplarındaki katı agar üzerine yayılan bakteri yaklaşık 2 ay boyunca +4 derecede buzdolabında saklanabilmektedir.

Lam; 26x76 mm ebatlarında, dikdörtgen biçiminde cam malzemedir. Preparat hazırlamada kullanılır. Lamel ise; kare, 20x20 mm çok ince bir camdan yapılmıştır ve lam üzerindeki örneği kapatmada kullanılır.

Pipet; Belirli hacimdeki sıvıları transfer etmede kullanılır. Suyu çekmek veya bırakmak için düğmeleri mevcuttur. Pipet üzerinde ayarlanan miktardaki miktarları otomatik olarak uç haznesine çeker. 10-1000 mikron arasında değişik ölçülerde bulunabilir (Şekil 3.9 a).

Erlen; dip kısmı geniş ve yuvarlak, ağız kısmı boru şeklinde dar boğazdan meydana gelen 100-500 ml arasındaki hacimlerde, besiyeri hazırlanmasında, dilüsyon çözeltisi hazırlanmasında vb kullanılır (Şekil 3.9 b).

Cam mezür; Sıvıların ölçümünde ve aktarımında kullanılan silindirik formda dereceli malzemeye denir (Şekil 3.9 c).



Şekil 3.9: a) Otomatik pipet b) Erlen c) Mezür ve pH metre.

pH metre: İsminin açılımı Power of Hydrogen olan pH, çözeltinin asidik, bazik ya da nötr oluşuna dair bilgi veren ve pH metre denilen cihazlarla ölçülür. PH metre, cihaza bağlı olan elektrot ile aldığı elektriksel sinyal değerini pH birimine çevirir. Bu ölçme tekniğinde algılama elektrotu ve referans elektrotunun aldığı gerilimler arasındaki fark pH değerini verir. Çözeltilerin asitlik ve alkalilik durumu 0 ile 14 arasında değerlendirilir.

Otoklav; Basınç altında buharla sterilizasyon yapan cihazlardır. Besiyerleri ve dilüsyon çözeltilerinin sterilizasyonu başta olmak üzere, araç gereçlerinin sterilizasyonunda, eski kültürlerin imha edilmesinde vb işlerde kullanılmaktadır (Şekil 3.10 a).

Distile cihazı; Besiyeri hazırlarken kullanılan saf suyun üretimini sağlar (Şekil 3.10 b).



Şekil 3.10: a) Otoklav b) Distile cihazı

Çalkalamalı inkübatör; Besiyerine ekim yapıldıktan sonra uygun sıcaklık ve sürede ortamı sağlayan cihazlardır (Şekil 3.11 a).

Spektrofotometre; Bir maddenin rengini oluşturan durum, maddeden gözümüze ulaşan ve görünür bölgedeki elektromanyetik ışınlardır. Bu ışınlar, saydam maddelerden geçerken, saydam olmayan maddelerden yansırlar. Çözelti içindeki madde miktarını çözeltiden geçen veya çözeltinin tuttuğu ışık miktarından faydalanarak ölçme işlemine fotometri, bu tip ölçümde kullanılan aletlere de fotometre adı verilir. Spektrofotometreler, maddenin renginin yoğunluğunun ölçülmesiyle madde miktarının veya konsantrasyonunun bulunmasını sağlayan cihazlardır. Burada kullanılan cihaz Thermo marka, 1nm adımlarla 200 ila 1000nm dalga boyu aralığına, 2,5nm bant genişliğine sahiptir (Şekil 3.11 b).



Şekil 3.11: a) Çalkalamalı inkübatör b) Spektrofotometri

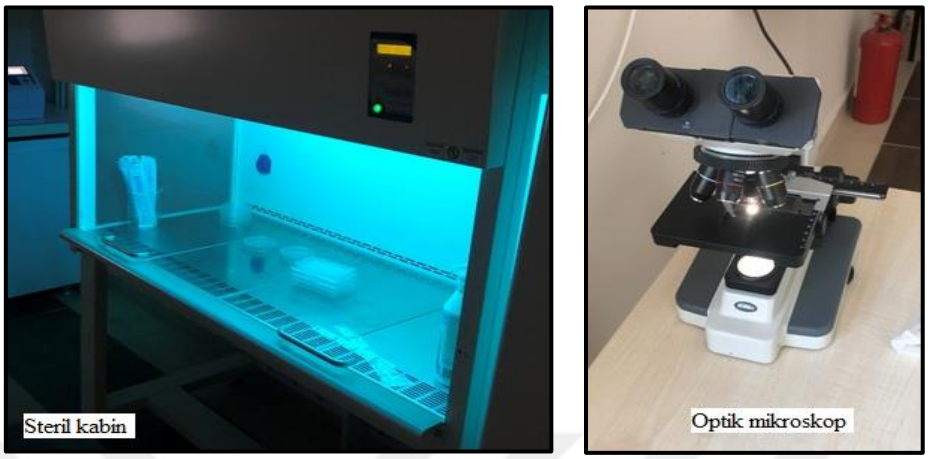
Manyetik karıştırıcı ve manyetik balık; Çözeltilerin veya besiyerinin homojen olarak karıştırılmasını sağlar.

Hassas terazi; Bu çalışmalardaki besiyeri ve çözeltilerin hazırlanmasında 1/1000 g hassasiyetli terazi kullanılmıştır.

Steril Kabin; HEPA-filtre ile tozdan ve partikülden arındırılmış hava sağlayan Bu kabinler, besiyeri hazırlama ve mikroorganizma ekimi sırasında kontaminasyon riskini azaltmak için kullanılır. Ayrıca araç gereç sterilizasyonunda da kullanılmaktadır (Şekil 3.12 a).

Optik mikroskop; Gözle görülemeyecek kadar küçük mikroorganizmaların izlenmesine yarayan ve ışın demetini bir noktada toplayarak gözlenen noktadaki detayları görmemizi sağlayan araçlardır. Bakterilerin lam üzerinde izlenmesi, spor forma geçip geçmediklerinin kontrolü ve

sayımı için kullanılmıştır. Kullanılan mikroskop 4x-100x arasında 4 adet değişen lense sahiptir (Şekil 3.12 b).



Şekil 3.12: a) Steril kabin b) Optik mikroskop

3.2 DENEY SETLERİNİN HAZIRLANMASI VE STANDARTLAR

3.2.1 Bakteri Üretimi

Bakteri olarak standart beton üretiminde etkinliği bilinen Alman mikroorganizma ve hücre kültürleri koleksiyonundan (DSMZ) 33 no'lu suşu olan *Bacillus sporosarcina pasteurii* kullanılmıştır. Öncelikle bakteri örneği öncelikle uzun süreli stoklamaya uygun olarak hazırlanmış ve -80 derece dondurucuda korumaya alınmıştır (Şekil 3.13 a ve 3.13 b).



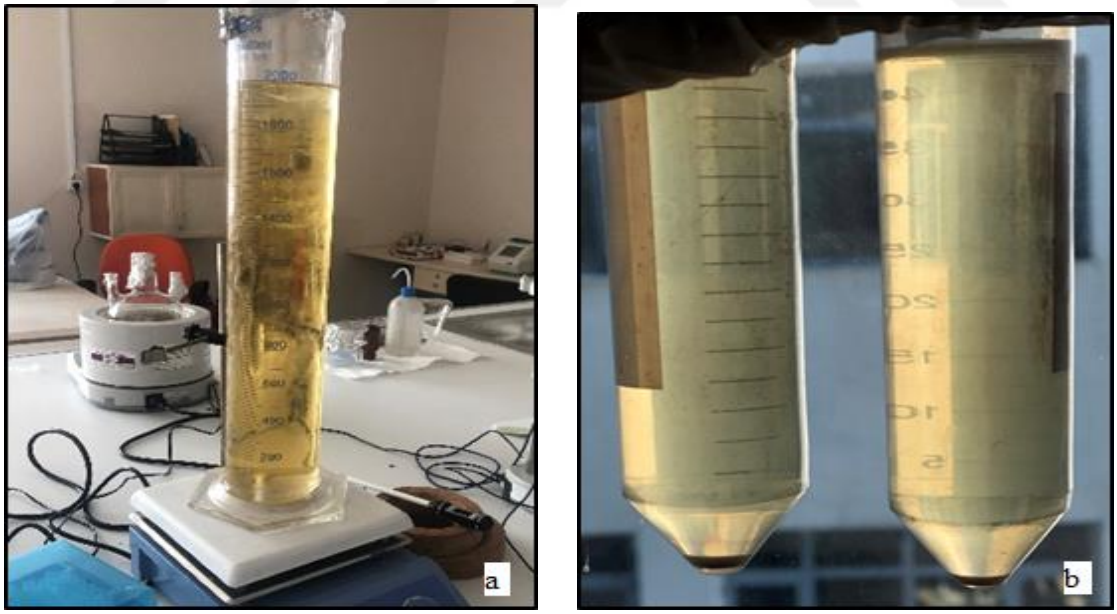
Şekil 3.13: a) Uzun süreli bakteri stoğu b) -80 derece soğutucu

Daha sonra bu bakteriden alınan örnekler üremesi için, metal bir öze yardımıyla ve steril kabin içerisinde, aşağıda içeriği belirtilen besiyerine inkübe edilmiştir. Çalışma boyunca besi yerinin içeriği değiştirilmeyecek ve tüm aşamalarda aşağıdaki reçete kullanılacaktır.

Sıvı besi yerinin hazırlanması:

Sıvı besi yeri hazırlamanın basamakları şu şekildedir:

- Öncelikle aşağıda miktarları yazan üre, pepton ve NaCl 0,001 gram hassasiyetli terazi ile tartılarak mezür içerisine bırakılır (Şekil 3.14 a).
  Besi yeri içeriği: 20 gram/litre üre, 20 gram/ litre pepton, 5 gram/litre NaCl
- Mezür 1000 ml çizgisine kadar saf su ile doldurulur. İçerisine manyetik balık konularak manyetik karıştırıcıda tamamen homojen hale gelinceye kadar karıştırılır.
- Kapaklı erlen ya da kapaklı şişelere doldurulan besi yerleri ağzı sıkıca kapatılarak otoklava yerleştirilir.
- 30 dakika boyunca 121 derecede ve 5 ATM basınç altında steril edilir.
- Otoklavdan alınan şişeler soğuduktan sonra kullanılana kadar saklamak üzere +4 derecede buzdolabında bekletilebilir.



Şekil 3.14: a) Besiyerinin hazırlanması b) Santrifüj ile çökeltilmiş bakteri örneği

Sıvı besi yerine ekim yapılması:

- Sıvı besiyerine ekim yapmadan önce aktarılacak örnek sıvı ise, mikroorganizmaların örnek içerisine homojen dağılması için örnek vorteks tüp karıştırıcısı ile ya da elle iyice

çalkalanmalıdır (Şekil 3.14 b). Ekimi yapılacak numune katı ise karıştırma işlemi yapılmaz.

- Metal öze ucu alevde akkor haline gelinceye kadar ateş üzerinde tutularak sterilize edilir.
- Tüp ya da katı agar sol elde tutulur. Tıpası ya da kapağı hafifçe açılır. Öze tüpün içerisinde daldırılır ve içerisinde döndürülür. Örnek katı agarda ise bakteri toplulukları özenin ucu ile toplanır.
- Örnek alınan tüp ya da agar ağzı kapatılarak yerine konduktan sonra sol ele sıvı besi yerinin bulunduğu şişe alınır.
- Öze tüp içerisine sıvı seviyesine kadar sokulur ve karıştırılır. Böylece örnek sıvı besiyerine aktarılmış (inokülasyon) olur, Besiyerinin ağzı kapatılarak inkübatörde büyümesi sağlanır (Şekil 3.15).



Şekil 3.15: İnkübatörde bakteri kültürü örnekleri.

Elde edilen bakteri kültürü solüsyonundan örnek alınarak saf kültür elde edildiği kontrol edilmesi amacıyla katı agar ortamına ekim yapılmıştır.

Katı Agar ortamına ekim yapılması:

Öncelikle katı besi yeri hazırlanır. Bunun için yukarıda bahsedildiği gibi hazırlanan besiyerinin içerisine, otoklava atılmadan önce, 12 gram/litre agar agar ilave edilir ve çözelti otoklava atılır.

- Otoklavdan çıkarılan agarlı besiyeri yaklaşık 45 dereceye kadar soğutulur.
- Steril kabin içerisinde ekimde kullanılacak tüm aletlerin sterilizasyon işlemi gerçekleştirilir.

- Steril kabine alınan agarlı besiyeri petri kaplarına boşaltılır ve soğuması beklenir. Agarın donma sıcaklığı yaklaşık 30-35 derecedir (Şekil 3.16a).
- Ekimi yapılacak bakteri içeren kültür, sıvı besiyerine ekim işlemindeki gibi öze ile alınır.
- Agarlı besiyerinin bulunduğu petri kutusu sol ele alınır ve sol elin iki parmağıyla kapağı açılır. Öze ucundaki bakteri kültürü agar yüzeyine zigzak halinde gezdirilerek temas ettirilir.
- Petrilerin kenarları parafilmle kapatılarak 24 saat boyunca etüvce 30 derecede bekletilir (Şekil 3.16b).



Şekil 3.16: a) Katı agar plakaların hazırlanması b) Ekimi tamamlanmış ağarlar.

Bakterinin çoğaltılması için hazırlanan katı agar plakalarından birinden sıvı besiyerine ekstrakte edilerek süspanse edilmiştir. Daha sonra 30^{o}C ve 175 rpm'lik bir çalkalama hızında inkübatörde 24 saat boyunca büyümeye bırakılmıştır.

3.2.2 Geopolimer Harç Üretimi

GH yapımı için daha önce yapılan çalışmalar sonucu bulunan aşağıdaki oranlar kullanılmıştır (Uysal ve diğ., 2018):

- MK esas alınmak üzere 1 birim bağlayıcı,
- Gerekli kıvamı sağlamak üzere 0,50-1,00 birim arasında aktivatör
- 2,75 birim standart kum

Harcı oluşturan malzemelerin gram cinsinden miktarları Tablo 3.9'da, toplam karışımdaki ağırlıkça yüzde oranları ise Tablo 3.10'da verilmiştir.

Tablo 3.9: Harç karışımı oranları (g).

METAKAOLİN	KUM	SODYUM SİLİKAT	SODYUM HİDROKSİT	CÜRUF
450	1125	300	150	60

Tablo 3.10: Harç karışımı oranları (%).

METAKAOLİN	RİLEM KUMU	SODYUM SİLİKAT	SODYUM HİDROKSİT	CÜRUF	PP LİF
19,57	48,92	13,05	9,33	2,61	1

Karışımdaki sodyum silikat sıvı formda, katı formdaki sodyum hidroksit ise 12 mol çözelti oluşturacak şekilde kullanılmıştır. Karışımın kil-kum oranı 0,4'dür.

Yukarıda belirtilen oranlarda hazırlanan harçlar 40x40x40 mm ve 40x40x160 mm ebatlarındaki kalıplara konulmuş, 24 saat sonra kalıptan çıkarılıp ağzı kapalı olarak fırın poşetlerine bırakılmış ve 60^{o}C'de 48 saat etüve konulmuştur. Etüvden çıkarılan numunelerden kontrol numuneleri çatlak oluşumu, basınç, ultrases ve su emme testlerine tabi tutulmak üzere streç filmle sarılarak 7 güne kadar laboratuvar ortamında otojen iyileşme yapması için bekletilmiştir.

Numunelerde Çatlak Hasarı Oluşturulması:

Granger ve diğ. (2007), eğilme deneyi esnasında kontrollü ön çatlak oluşturmuş, yükü kaldırdığı örnekleri kürlemeye devam ederek iyileşmeyi gözlemlemiştir. Bu tezde de etüvden çıkarılan numunelerde üç noktalı eğilme testi ile maksimum 1 mm genişliğinde çatlaklar oluşturulmuştur. Numunelerde oluşturulacak çatlaklarda numuneler arasında tutarlılık sağlamak için, her serinin 7 ve 60 günlük kontrol numunelerine ayrı ayrı nihai yüklemeleri yapılmıştır, Hazırlanan diğer numuneler, nihai yükün %70'ine kadar yüklenmiş ve bir dakika süreyle askıya alınmıştır. Yüklemeden önce ve sonra kontrol numunesi ile karşılaştırmalı ultrasonik hız testi yapılarak, yüklenen örneklerde gerçekten çatlama olup olmadığı belirlenmiştir.

3.2.3 Standartlar

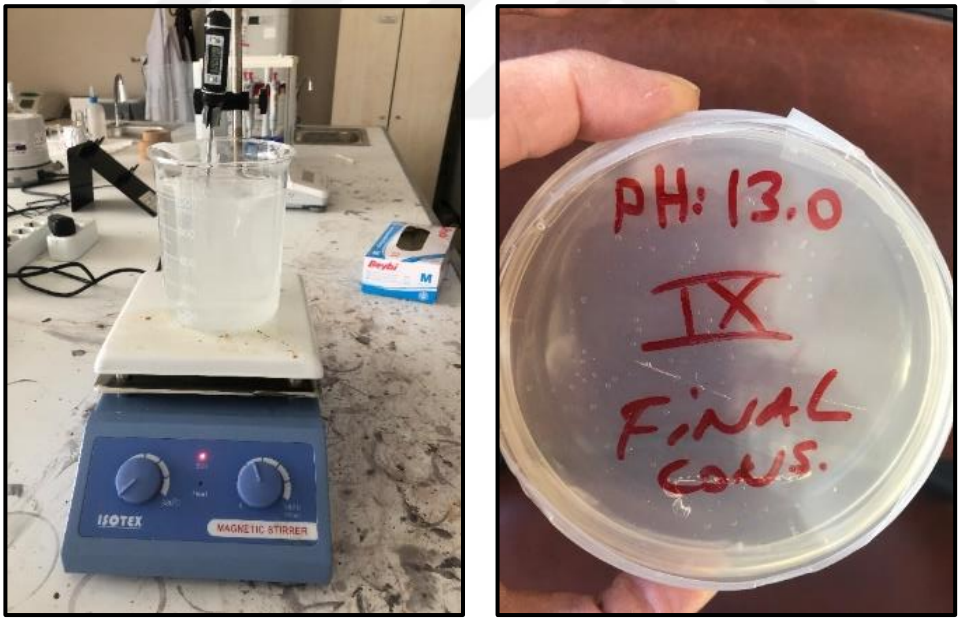
Bu çalışmada geopolimer harçta birim hacim kütleleri tayini için TS EN 1015-6, su emme ve kuru yoğunluk tayını için ASTM C 642-06 ve TS EN 1170-6, kılcal geçirimlilik tayini için TS EN 13057, yayılma tayini için TS EN 1015-3, harcın priz süresinin tayini için TS EN 196-3,

ultrases geçiş hızı için TS EN 12504-4, basınç dayanımı test numunelerinin hazırlanması için TS EN 12390-1, basınç dayanımı tayini için TS EN 12390-3 ve eğilme tayini için TS EN 12390-5, standartları kullanılmıştır.

3.3 ÖN DENEY SÜRECİNDE YAPILAN İŞLEMLER

Ön deney sürecinin amacı, geopolimer harcı en kısa sürede en yüksek dayanıma ulaştıran kür şeklinin ve aynı zamanda içerdiği NaOH nedeniyle oldukça bazik olan geopolimer harç ile bakterinin nasıl karıştırılacağının tespit edilmesidir.

Bu amaçla öncelikle geopolimer betonda kullanılan önemli ve etkili aktivatörlerden biri olan NaOH'un titrasyonu yapılmış ve belirli pH oranlarında alınan örnekler ile katı agar ortamına bakteri ekimi yapılmıştır. Böylece geopolimer betona sıvı formda eklenen NaOH ile birlikte, bakteri kültürünün de spor yaptırılmadan direk sıvı kültür içerisinde eklenmesinin mümkün olup olmadığının belirlenmesi amaçlanmıştır. İşlem bölüm 3.5.1.1'de anlatılmıştır (Şekil 3.17).



Şekil 3.17: NaOH titrasyon testinin yapılışı.

Bakteri yoğunluğu karbonat presipitasyonunun yapılabilmesi için çok önemli bir parametredir. Bu nedenle harç içerisine karıştırılmak üzere üretilmiş her sıvı kültürdeki canlı bakteri yoğunluğunun tespit edilmesi gerekmektedir. Spektrofotometrik analiz ve plaka sayım yöntemi bu amaçla kullanılan yöntemlerdir. Bu işlem bölüm 3.5.1.2 ve bölüm 3.5.1.3'de anlatılmıştır.

Bu çalışmadaki 1. seri geopolimer harçlar bakteri veya besiyeri ilave edilmeden ve literatürde mevcut geopolimer üretim sürecindekine benzer şekilde üretilmiştir (Uysal, et al., 2018). Erken dayanımlarını kazanmak üzere en uygun ortamın tespiti için 3 farklı ortamda kürlenmişlerdir. Bunlar ortam ısısında kürleme, fırın kürü ve sıcak su kürüdür. Aynı zamanda karışımlarda 3 farklı molaritede NaOH aktivatörü kullanılmıştır. Çalışmanın bu kısmının amacı geopolimer harçta en kısa sürede betonun hidratasyonunun tamamlandığı kür şeklini tespit etmektir. Bu süre bakterinin yaşamsal varlığını koruyabilmesi için önemlidir. Ayrıca pH da bakteri canlılığını doğrudan etkileyen bir faktördür. Bu nedenlerle hazırlanan geopolimer harçların 3, 7, 28 ve 60. günlerdeki dayanımları belirlenmiştir. Bu seri harçları hazırlandıktan sonra eğilme deneyi için 40x40x160 mm, basınç testi için 50x50x50 mm kalıplara yerleştirilmiş, 24 saat oda sıcaklığında ve kalıp içerisinde üstü kapalı olarak tutulmuştur. Daha sonra kalıptan çıkarılan numuneler 48 saat boyunca 60°C'de etüvde, 60°C'de sıcak suda ve 30°C'de üstü örtülü olarak ortam ısısında tutulmuşlardır. Deney serileri aşağıdaki Tablo 3.11'de verilmiştir.

Tablo 3.11: 1. seri örnekler ve kür ortamları.

ÖRNEK NO	KÜR TİPİ	KÜR SIC.(°C)	NAOH MOLARİTESİ
G8-D	Kuru	60	8 mol
G12-D	Kuru	60	12 mol
G16-D	Kuru	60	16 mol
G8-W	Islak	60	8 mol
G12-W	Islak	60	12 mol
G16-W	Islak	60	16 mol
G8-M	Ortam ısısı	30	8 mol
G12-M	Ortam ısısı	30	12 mol
G16-M	Ortam ısısı	30	16 mol

Buna göre en kısa zamanda en yüksek dayanımı veren yöntem olarak fırın kürü ile en yüksek dayanımı veren 12 mol/L NaOH çözeltisi tercih edilerek ikinci seri numuneler dökülmüştür. Buradaki amaç bakterinin farklı ortam şartlarındaki geopolimer harç numunelerin boşluk miktarına etkisini görebilmektir.

İkinci serinin besiyeri ve bakteri kültürü içeren numuneleri için kullanılan toz formdaki metakaolin önce besiyeri/bakteri kültürü içerisinde 24 saat boyunca bekletilmiş, daha sonra 48 saat boyunca 40°C-80°C arasında kademeli ısı artışıyla kurutulmuştur. Numunelerin üretimi birinci seridekine benzer olarak gerçekleştirildikten sonra 24 saat nemini kaybettirmeden kalıpta bekletilmiş, sonraki 48 saat boyunca ise 60°C etüvde kürlenmiştir. 7. güne kadar ortam

ısısında nem almadan tutulan numuneler 60. güne kadar Tablo 3.12'deki kür ortamlarına maruz bırakılmışlardır. Kürleme sonucunda harçların su emme miktarlarına göre kür ortamları değerlendirilmiştir.

Tablo 3.12: 2. seri örnekler ve kür ortamları.

ÖRNEK NO	NUMUNE İÇERİĞİ	NAOH MOLARİTESİ	KÜR ORTAMI
K1	Kontrol	12 mol	Bakteri kültürü
K2	Kontrol	12 mol	Besi yeri
K3	Kontrol	12 mol	Kür yok
K4	Kontrol	12 mol	Saf su
1_1	Yalnızca besi yeri	12 mol	Bakteri kültürü
1_2	Yalnızca besi yeri	12 mol	Besi yeri
1_3	Yalnızca besi yeri	12 mol	Saf su
1_4	Yalnızca besi yeri	12 mol	Kür yok
2_1	Bakteri kültürü	12 mol	Bakteri kültürü
2_2	Bakteri kültürü	12 mol	Besi yeri
2_3	Bakteri kültürü	12 mol	Saf su
2_4	Bakteri kültürü	12 mol	Kür yok

2. seri numunelerin besiyeri ve bakteri külürü ile üretilen numunelerinde geopolimer harcın ana matris fazı olan metakaoline kalıplara döküldükten sonra 24 saat oda sıcaklığında ve kalıp içerisinde üstü kapalı olarak tutulmuştur. Daha sonra kalıptan çıkarılan numuneler 48 saat boyunca 60 ◦C'de etüvde bekletilmiştir. Tüm numuneler 7. güne kadar nemini kaybetmeden oda sıcaklığında bekletilmiş ve 7. günden sonra 60. güne kadar Tablo 3.9'da belirtilen ortamlara maruz bırakılmışlardır.

3.4 ANA DENEY SÜRECİNDE YAPILAN İŞLEMLER

Ön deney sürecinde kullanılan yöntem ile bakteri çoğaltımı gerçekleştirilebildiğinden ana deneylerde de aynı yöntem kullanılmıştır.

Ana deneylerde ön deneylerden farklı olarak geopolimer harca bakteri kültürü eklenirken 2 farklı yöntem kullanılmıştır. Bu yöntemlerden ilkinde yoğunluğu spektrofotometrik analiz ile bulunan (Bölüm 3.5.1.2) bakteri kültürü, metakaolinin bir kısmına emdirilerek kademeli ısı artışıyla 60 dereceye kadar artırılmış ve 24 saat süreyle etüvde kurutulmuştur (Şekil 3.18 a). Böylece kullanılacak bakterilerin spor forma geçmesi amaçlanmıştır. 2. yöntemde ise

yoğunluğu McFarland yöntemi (bölüm 3.5.1.4) ile tespit edilmiş bakteri sporları, katı agar üzerinden distile su içerisine toplandığı şekliyle geopolimer harca katılmıştır (Şekil 3.18 b).



Şekil 3.18: a) Metakaoline emdirilmiş bakteri b) Distile su içerisine toplanmış bakteri.

Ön deney sürecinde yapılan deneylerde en uygun kür yöntemin 60◦C fırın kürü, kür ortamının ise besiyeri ve bakteri kültürü ile kürleme olduğu sonucu elde edilmiştir. Buna göre seriler yeniden düzenlenerek ana deney serisi numuneleri hazırlanmıştır. Kullanılan malzemeler bölüm 3.1.1. ve 3.1.2.'de anlatılmıştır.

Tezin ana deney serileri, malzeme oranları, yayılma miktarları, birim hacim kütleleri ve harcın karıştırma anındaki sıcaklıkları Tablo 3.13'de verilmiştir.

Tablo 3.13: Ana deney numuneleri ve karışım oranları.

NUMUNE KODU	K	M12	M8	M4	S12	S8
Metakaolin (g)	414	414	414	414	414	414
Silikat (g)	265	265	265	265	265	265
Hidroksit (g)	132,5	132,5	132,5	132,5	132,5	132,5
K.suyu (g)	100-Malz.	100-Malz.	100-Malz.	100-Malz.	100-Malz.	100-Malz.
Cüruf (g)	56	56	56	56	56	56
Kum (g)	1035	1035	1035	1035	1035	1035
Lif (g)	4	4	4	4	4	4
Yayılma (cm)	16	16,5	18,5	22	19	21,5
Br hacim kütlesi (gr/cm^3)	165,45	160,40	161,9	160,34	133,6	161,8

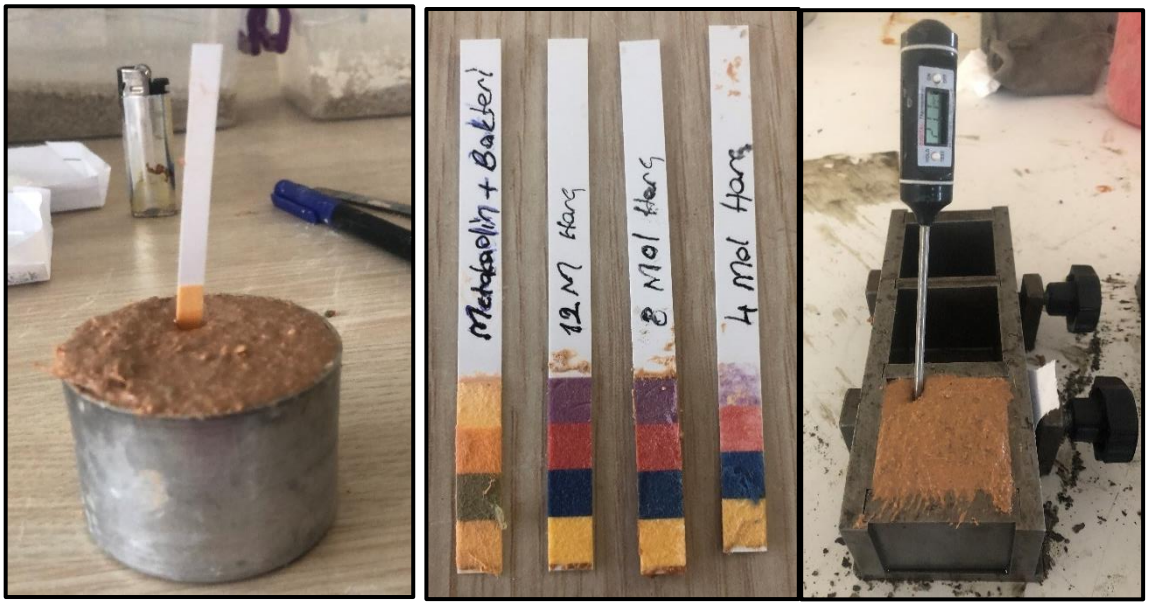
Not: Tabloda (100-Malz) terimi, malzemeye emdirilen bakteri kültüründen kaynaklı malzemedeki ağırlık artışının 100 gram karışım suyu miktarından düşüldüğünü ifade etmektedir.

Ana deneyler için hazırlanan harçlar 40x40x160 mm ve basınç testi için 50x50x50 mm kalıplara yerleştirildikten sonra 24 saat oda sıcaklığında ve kalıp içerisinde üstü kapalı olarak tutulmuştur. Daha sonra kalıptan çıkarılan numuneler 48 saat boyunca, nemini kaybetmemesi için fırın poşetlerine konularak 60 ◦C'de etüvde bekletilmişlerdir. Etüvden çıkarılan numuneler 7. güne kadar yine nemini kaybetmeden oda sıcaklığında bekletilmiştir (Şekil 3.19).



Şekil 3.19: Bir kısım numunenin 7. gün görüntüsü.

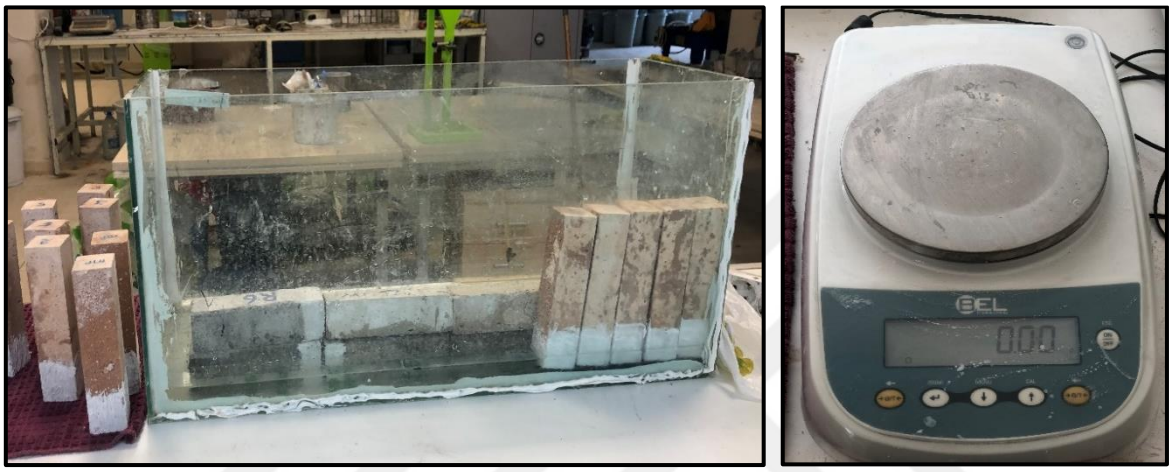
Harç dökümü esnasında tüm numunelerin birim hacim kütleleri, yayılma testleri, pH ölçümleri ve harç sıcaklık ölçümleri yapılmıştır (Şekil 3.20). pH ölçümleri önce pH kağıdıyla yapılmış daha sonra dijital pH metre ile kontrol edilmiştir.



Şekil 3.20: Numunelerin pH ve sıcaklık ölçümü.

7. günde ilk olarak numunelerin ultrases ölçümleri yapılmış ve alınan değerler kaydedilmiştir. Harçlarda farklı noktalarından ölçüm yapılmasının, betonun tamamen homojen olmaması durumunda yanıltıcı olabileceği düşünülerek, numunelerin prop temas eden noktaları işaretlenmiştir.

Daha sonra birim hacim ağırlıkları ve su emme değerleri ölçülen numuneler (Şekil 3.21), üç noktalı eğilme presinde çatlak oluşumu için kontrollü olarak yüklenmişlerdir.



Şekil 3.21: Su emme testi düzeneği.

Çatlak genişliğinin bakterinin iyileştirme yeteneği üzerinde etkisi olup olmadığını görebilmek için her numune tipinde en az iki farklı çatlak genişliği oluşturulmuştur. Çatlak genişliklerinin literatüre göre en iyi iyileşmeyi sağlaması için 400 µm altında tutulması hedeflenmiştir. Bununla ilgili literatür özeti bölüm 2.3.2'de verilmiştir. Çatlak mikroskobu ile numunelerdeki 7 günlük ilk çatlak genişlikleri ölçülmüştür ve kayıt altına alınmıştır. Ana deney serilerinde M ile başlayan numuneler 12, 8 ve 4 mol NaOH ve sabit oranda Na_2SiO_2 aktivatörleri kullanılarak hazırlanmış, karışımlara bakteri ilave edilirken bakteri kültürü metakaoline emdirilerek sabit sıcaklık artışı ile sporlanmıştır. S serisi numuneler 12 ve 8 mol NaOH ve sabit oranda Na_2SiO_2 aktivatörleri kullanılarak hazırlanmış, bakteri ilavesi katı agar yüzeyinden toplanan bakteri sporlarının su ile karışıma eklenmesi yoluyla yapılmıştır. Her iki numune grubu da kontrol numuneleri ile birlikte hem bakteri kültürü hemde besi yeri içerisinde 60 gün boyunca iyileştirilmeye bırakılmıştır. Numunelerin molariteleri, çatlak genişlikleri ve nihai kür ortamları Tablo 3.14'de verilmiştir.

Tablo 3.14: Numuneler, molariteleri, çatlak genişlikleri ve kür ortamları.

NUM. KODU	NUMUNE İÇERİĞİ	NAOH MOLARİTESİ	ÇATLAK GEN. (µM)	NİHAİ KÜR ORTAMI
K1	Kontrol Numunesi, standart geopolimer, bakterisiz	12 mol	200	Kür yok
K2	Kontrol Numunesi, standart geopolimer, bakterisiz	12 mol	150	Bakteri kültürü
M12-1	MK içerisine emdirilerek sporlanmış bakteri	12 mol	400	Besi yeri
M12-2	MK içerisine emdirilerek sporlanmış bakteri	12 mol	150	Besi yeri
M12-3	MK içerisine emdirilerek sporlanmış bakteri	12 mol	150	Bakteri kültürü
M8-1	MK içerisine emdirilerek sporlanmış bakteri	8 mol	150	Besi yeri
M8-2	MK içerisine emdirilerek sporlanmış bakteri	8 mol	50	Bakteri kültürü
M8-3	MK içerisine emdirilerek sporlanmış bakteri	8 mol	200	Besi yeri
M4-1	MK içerisine emdirilerek sporlanmış bakteri	4 mol	50	Besi yeri
M4-2	MK içerisine emdirilerek sporlanmış bakteri	4 mol	50	Bakteri kültürü
M4-3	MK içerisine emdirilerek sporlanmış bakteri	4 mol	100	Besi yeri
S12-1	Katı agar yüzeyinden su içerisine toplanmış bakteri sporu	12 mol	400	Besi yeri
S12-2	Katı agar yüzeyinden su içerisine toplanmış bakteri sporu	12 mol	150	Bakteri kültürü
S12-3	Katı agar yüzeyinden su içerisine toplanmış bakteri sporu	12 mol	300	Besi yeri
S8-1	Katı agar yüzeyinden su içerisine toplanmış bakteri sporu	8 mol	200	Bakteri kültürü
S8-2	Katı agar yüzeyinden su içerisine toplanmış bakteri sporu	8 mol	400	Besi yeri

7. gün basınç dayanımlarının belirlenebilmesi için her seriden 3'er adet numune basınç testine tabi tutulmuş, aynı zamanda FTIR, SEM ve EDS analizleri alınmıştır. Bu işlemlerden sonra kalan numuneler ayrı kaplar içerisinde Tablo 3.12'de belirtilen kür ortamlarına maruz bırakılmışlardır. Ancak her 7 günde bir kontaminasyon riski nedeniyle kür ortamı yenilenmiş, çatlaklar gözlemlenerek ultrases ölçümleri alınmıştır (Şekil 3.22).



Şekil 3.22: Kür ortamından çıkarılan numunelerin ultrases ölçümü ve çatlaklarının gözlenmesi.

Ana deneylerde kalsiyum kaynağı olarak, çelik lif ya da donatı kullanılan durumlarda korozyon ihtimalini düşürmek için ve donma-çözülme olayına katkıda bulunabileceği düşüncesiyle, kalsiyum nitrat $Ca(NO_3)_2$ tercih edilmiştir. Böylece son kür ortamına bakteri kültürü / besiyeri ile birlikte 30 g/l kalsiyum nitrat ilave edilmiştir (Şekil 3.23).



Şekil 3.23: $Ca(NO_3)_2$ ilave edilmiş bakterili kür ortamı.

60. güne kadar bu döngüde takip edilen numunelerin önce ultrases ölçümleri alınmıştır. Doygun ağırlıkları ve su altı doygun ağırlıkları ölçülen numunelerin etüvde 24 saat kurutulmak suretiyle kuru ağırlıkları da tespit edilmiştir. Son olarak tüm numuneler nihai su emme yüzdelerinin tespiti için yeniden su emme testine tabi tutulmuşlar, Ardından optik mikroskop ile çatlak görüntüleri alınmıştır. Basınç dayanımları tespit edilerek FTIR, SEM ve EDS analizleri yapılmıştır.

3.5 UYGULANAN ÖLÇME YÖNTEMLERİ

Bu tez kapsamında hazırlanan numeneler görsel inceleme ile birlikte aşağıdaki testlere tabi tutulmuştur.

3.5.1 Mikrobiyolojik Ölçme Yöntemleri

3.5.1.1 NaOH – Bakteri Kültürü Titrasyonu

Titrasyon, bir derişimi bilinmeyen numunede bulunan belirli bir maddenin (analit) miktarını belirlemek için, belli bir konsantrasyonda derişimi bilinen bir reaktifin (titrant) kontrollü olarak eklenmesi şeklinde yapılan işlemdir. Bu yöntemin temeli asit-baz nötrleşme ilkesidir. Bu tezde titrasyonun yapılmasındaki amaç bakteri kültürü ve NaOH maddesinin birleştiğinde aralarında

kimyasal bir kimyasal reaksiyon olup olmayacağının, aynı zamanda çözeltinin ısısının ve pH'ının bakterinin yaşam şartlarına uygun olup olmadığının tespit edilmesidir.

- 12 mol NaOH çözeltisi hazırlanmıştır.
- Bakteri kültürünün pH'ı ölçülmüş ve pH=9 olduğu teyit edilmiştir.
- Pipetle alınan 1 ml NaOH çözeltisinin 30 damlaya tekabül ettiği belirlenmiş ve manyetik karıştırıcı üzerine konulan besi yerine 2-20 damla arası değişen oranlarda NaOH eklenmiştir. Buna göre aşağıda verilen Tablo 3.15 oluşturulmuştur.

Tablo 3.15: Bakteri kültürü- NaOH titrasyonu.

BAKTERİ (45 ml) - NaOH (12 mol) TİTRASYONU							
İŞLEM NO	EKLENEN NaOH MİKTARI (1damla=1/30 ml))	pH	AGAR NUMUNE KODU	İŞLEM NO	EKLENEN NaOH MİKTARI (1damla=1/30 ml))	pH	AGAR NUMUNE KODU
1	0	8,26		17	3	11,69	
2	5	8,35		18	5	11,82	VI
3	5	8,43		19	5	11,93	
4	5	8,50	I	20	5	12,00	
5	5	8,63		21	5	12,08	
6	5	8,75		22	5	12,12	
7	5	8,88		23	7	12,16	VII
8	4	9,00		24	10	12,21	
9	5	9,19		25	10	12,27	
10	5	9,40	II	26	10	12,32	
11	5	9,75		27	10	12,38	
12	3	10,00	III	28	10	12,43	VIII
13	5	11,08	IV	29	20	12,47	
14	2	11,32		30	15	12,51	
15	2	11,45	V	31	20	13,00	IX
16	2	11,53		Bu noktadan sonra pH ölçülemediği için deney sona erdirilmiştir.			

Tabloda Roma rakamlarıyla belirtilen aşamalarda çözeltiden örnekler alınarak katı agar üzerine ekim yapılmıştır. Ekim yapılan petriler 24 saat boyunca 30 derece etüvde büyümeye bırakılmıştır. Böylece bakterinin canlılığını koruyup korumadığının gözlenmesi amaçlanmıştır.

3.5.1.2 Bakteri Yoğunluğunun ve Büyüme Eğrisinin Tespiti (Spektrofotometrik analiz)

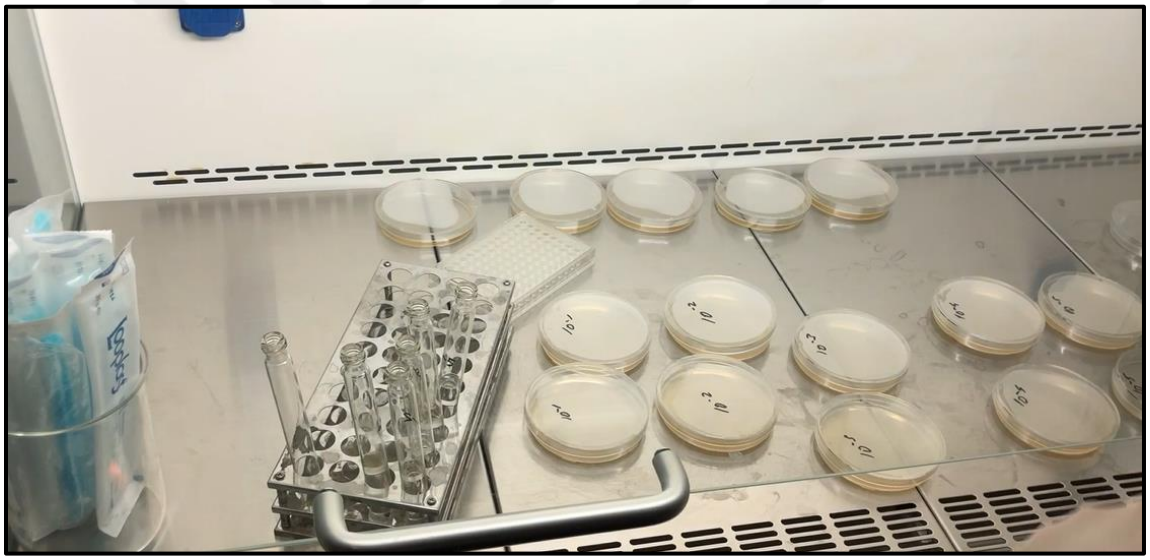
Bakterinin büyüme eğrisinin tespiti için yapılan bu analizin işlem adımları aşağıda verilmiştir (Bundur ve diğ., 2017), (Kim ve diğ., 2016), (Hsu ve diğ., 2018).

- Daha önce anlatılan prosedüre göre sıvı besi yerine ekimi yapılan bakteri kültürü 24 saat süreyle inkübatörde büyümeye bırakılmıştır.
- Deney tüpleri ağızları kapatılarak otoklavda steril edilmiştir.
- NaCl = 80 gr/l,
  KCl = 2 gr/l,
  N_2HPO_4 =14,49 gr/l,
  KH_2PO_4 =2,49 gr/l,
  malzemeleri ile oluşturulan 1 litrelik tampon çözelti otoklavda steril edilmiştir. Bu çözeltinin pH'ı 7,4 olarak bulunmuştur ve HCl kullanılarak bakteri için en uygun pH olan pH=9'a çıkarılmıştır.
- Bu çözeltiden üssel sayı oranına göre hazırlanmış olan her tüpe 9 ml otomatik pipet yardımıyla aktarılmıştır. İşlem kontaminasyon riskinin oluşmaması için steril kabin içerisinde yapılmıştır.
- İlk tüpe 1 ml kültür ilave edilerek, 10^{-1} dilüsyonu hazırlanmıştır. 2. Tüpe karıştırılan ilk tüpten alınan 1 ml karışım ilave edilmiştir ve üzerine 10^{-2} dilüsyonu yazılmıştır. Bu şekilde 10^{-9}'a kadar dilüsyon çözeltiler hazırlanmıştır.
- 12 kolon ve 8 satırdan oluşan 96 kuyucuklu plakaların kullanıldığı bu deneyde plakalar aşağıda belirtilen sırayla doldurulmuştur ve bu zamana t=0 denilmiştir.
  Plaka kolonunun A sütununun 1. satırına 0,15 ml distile su, diğer satırlarına ise aynı miktarda fosfat tamponu bırakılmıştır, B kolonuna yalnızca sıvı besi yeri, C kolonuna S. Pasteurii kültürünün 10^{0} dilüsyonu konulmuştur. D kolonuna 1/10 oranında seyreltilmiş fosfat tamponuna (9/10) ilave edilen kültür (1/10) bırakılarak bu sütun 10^{-1} dilüsyon sütunu olarak belirlenmiştir. Bu sistemle kültür 10^{-9} dilüsyonuna kadar seri olarak seyreltilmiş ve plakaya yerleştirilmiştir. Daha sonra bu plaka microplate okuyucusuna yerleştirilerek 600 nm'de okuma yapılmıştır.
- Alınan ölçümler, t= 1, 2, 4, 6, 8, 12 ve 24 saatlik zamanlar için tekrar edilerek OD600 grafiği çıkarılmıştır.

3.5.1.3 Plaka Sayımı Yöntemi (Breed Yöntemi):

Canlı plaka sayımı yönteminde amaç bakterilerin seyreltilerek katı agar üzerinde sayılabilecek sayıya kadar düşürülmesidir. Canlı plaka sayımı yönteminin aşamaları aşağıdaki gibi uygulanmıştır (Bundur ve diğ., 2017).

- Bölüm 3.5.1.2'de anlatıldığı gibi seyreltilen örnekler (10^0 ile 10^{-9} arasında), besi yerinden oluşan katı agar üzerine otomatik pipet yardımıyla 0,1 ml yayılmıştır (Şekil 3.24).
- Petri kapları parafilm ile sıkıca kapatılarak 24 saat 30 derecede etüvde bekletilmiştir.
- Agar üzerine bırakılan 0,1 ml örnekler optik mikroskop ile sayılarak 1 ml'deki miktarı bulmak için 10 ile çarpılmış ve 10-300 hücre arası sayımlar dikkate alınarak değerlendirilmiştir. Bu deney için kontrol amacıyla her dilüsyondan 3'er örnek yapılmıştır.



Şekil 3.24: Dilüsyon serilerinin hazırlanması.

3.5.1.4 Bakteri Yoğunluğunun Tahmini (McFarland Yöntemi)

Bu çalışmanın ana deneylerinde, bakterinin harca karıştırılma yönteminde, ikinci bir alternatif olarak bakteri öncelikle spor forma getirilmiş, distile su içerisine toplanarak harca öyle ilave edilmiştir. Ancak bu durumda yine bakteri sporu yoğunluğunun tespiti gerekmektedir. Bunun için McFarland Yöntemi ile bakteri yoğunluğunun tahmini yapılmıştır.

McFarland Standartı denilen bu yöntemde, bakteri yoğunluğu bulunacak süspansiyonunun türbiditesi (bulanıklığı) hazırlanan McFarland Standardı ile karşılaştırılır ve böylece yaklaşık

bakteri sayısını bulunur. Burada karşılaştırma için kullanılacak olan standart süspansiyon baryum klorür ve sülfürik asit ile oluşturulan kimyasal bir çözeltidir. Bu iki kimyasal maddenin reaksiyonu sonucunda ince bir baryum sülfat çökeltisi meydana gelir. İyice çalkalanarak bakıldığında bu çözeltinin bulanıklığı Tablo 3.16'daki bakteri konsantrasyonuna karşılık geldiği görülebilir.

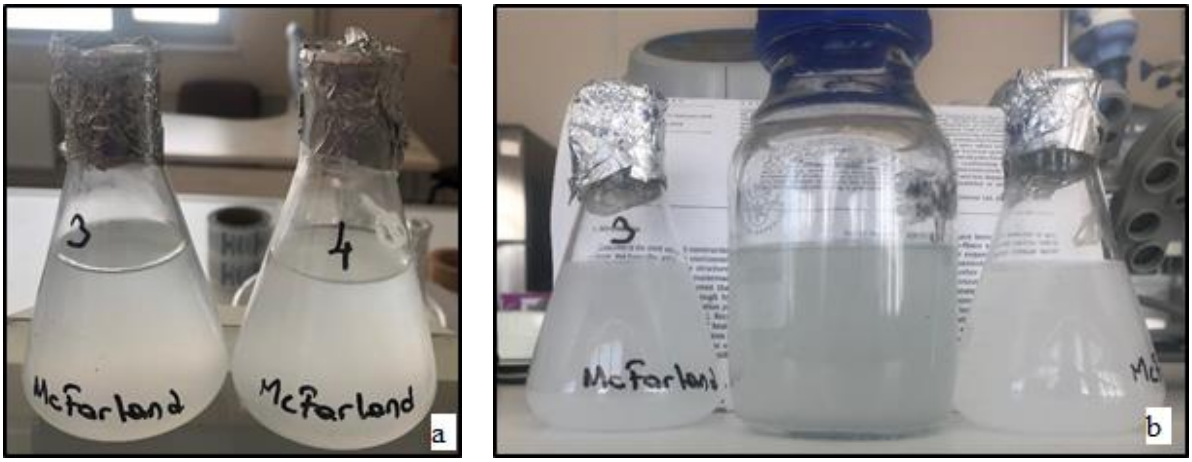
Tablo 3.16: McFarland standartı serileri, karışım oranları ve yaklaşık bakteri yoğunluğu değerleri.

No	McFarland Standartı	%1 $BaCl_2$ (ml)	%1 H_2SO_4 (ml)	Yak.bakteri yoğunluğu ad/mL
TM50	0,5	0,05	9,95	$1,5x10^8$
TM51	1,0	0,10	9,90	$3,0x10^8$
TM52	2,0	0,20	9,80	$6,0x10^8$
TM53	3,0	0,30	9,70	$9,0x10^8$
TM54	4,0	0,40	9,60	$1,2x10^9$
TM55	5,0	0,50	9,50	$1,5x10^9$
TM56	6,0	0,60	9,40	$1,8x10^9$
TM57	7,0	0,70	9,30	$2,1x10^9$
TM58	8,0	0,80	9,20	$2,4x10^9$
TM59	9,0	0,90	9,10	$2,7x10^9$
TM60	10,0	1,0	9,0	$3,0x10^9$

Bu tezde bakterinin spor formda ve su içerisinde kullanıldığı numunelerde kullanılan bakterinin yeterli yoğunluğa ulaşıldığının tespiti için için McFarland 3.0 ve 4.0 standartları hazırlanmıştır (Şekil 3.25 a ve b).

Çözeltinin hazırlanışı şu şekildedir:

- %1 susuz baryum klorür çözeltisi ($BaCl_2$) ve %1'lik bir sülfürik asit çözeltisi (H_2SO_4) hazırlanır.
- İhtiyaç duyulan her McFarland bulanıklık standardı için Tablo 3.26'da gösterilen oranlarda bulanık bir süspansiyon oluşturmak üzere baryum klorür ve sülfürik asit çözeltileri birleştirilir ve iyice karıştırılır.
- Hazırlanan seriler vidalı kapaklı tüplere yerleştirilir.
- Hazırlanan standart serileri yeniden kullanım için oda sıcaklığında (25°C) 6 ay boyunca saklanabilir.
- Her kullanımdan önce sert bir vortekslemeyle yeniden kullanılabilir.



Şekil 3.25: a) Hazırlanan McFarland serileri b) Bakteri sporu yoğunluğunun kıyaslanması.

3.5.1.5 Bakterilerin Gram Boyama ve Spor Boyama ile Görüntülenmesi

Çalışmada kullanılan *Bacillus sporosarcina Pasteurii* cinsi bakterilerin optik mikroskopta görüntülenebilmesi için grama boyama işlemi yapılmıştır. Bu teknik, mikrobiyolojide sıklıkla kullanılan bir yöntemdir. Bakteri sporları ise malaşit yeşili ile boyanarak izlenmiştir. Her iki yönteminde işlem adımları aşağıdadır.

Preparat hazırlama:

- Öncelikle incelenecek sıvı kültür örneği lam üzerine bırakılır.
- 2. bir lam 45 derece eğimle el hiç kaldırılmadan yayılır.
- Lam üzerine yayılan kültür açık havada ya da alev üzerinde hafifçe gezdirerek kurutulur. Böylece bakteri ve bakteri sporları lama tespit edilmiş olur.

Gram boyama:

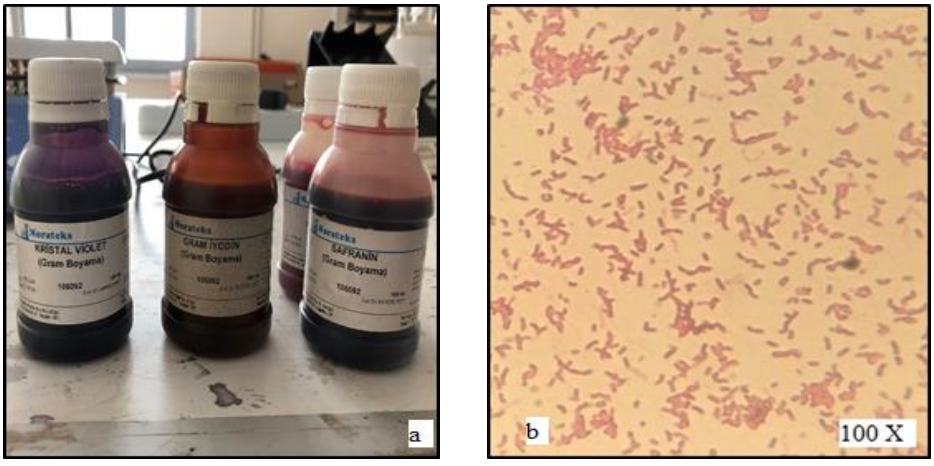
- Preparat üzerine kristal violet çözeltisi dökülerek 1 dakika boyunca boyanır.
- Boya dökülürek basınçsız bol distile su ile lam yıkanır.
- Preparat üzerine lugol çözeltisi konulur ve 1 dakika beklenir. Lugol solusyonu dökülür.
- Boya dökülürek lamdaki boyanın tamamı akıncaya kadar yaklaşık 10 saniye alkol ile yıkanır. Distile su ile lam yıkanır.
- Preparat üzerine sulu fuksin ya da safranin çözeltisi dökülerek 30 saniye boyunca boyanır.
- Distile su ile lam yıkanır.
- Lam kurutma kağıdı ile ya da açık havada kurutulur.

- İmmersiyon yağı kullanılarak 100X optik mikroskopta incelenir.
- Bu yöntemle optik mikroskop altında bakılan örnekteki gram pozitif mikroorganizmalar mor renkte, gram negatif olanlar ise pembe renkte görünür.

Spor boyama (Malaşit yeşili tekniği):

- Preparat hazırlanır, kurutularak tespit edilir.
- Preparat üzerine %5 malaşit yeşili çözeltisi dökülür. Lam alttan ısıtılarak 5 dakika boyunca boyanması sağlanır.
- Boya dökülürek basınçsız bol distile su ile lam yıkanır.
- Preparat üzerine sulu fuksin ya da safranin çözeltisi dökülerek 30 saniye boyunca boyanır.
- Distile su ile lam yıkanır.
- Lam kurutma kağıdı ile ya da açık havada kurutulur.
- İmmersiyon yağı kullanılarak 100X optik mikroskopta incelenir.
- Bu yöntemle optik mikroskop altında bakılan örnekteki sporlar yeşil renkte, basiller ise kırmızı renkte görünür.

Gram boyamada kullanılan boyalar ve *Bacillus sporosarcina pasteurii* bakterisinin optik mikroskop görüntüsü Şekil 3.26 a ve b'de görülmektedir.



Şekil 3.26: a) Gram boyamada kullanılan boyalar b) Bacillus sporosarcina pasteurii bakterisinin optik mikroskop görüntüsü.

3.5.2 Geopolimer Harçta Kullanılan Ölçme Yöntemleri

Bu tez kapsamında kullanılan bakteriyel ajanın geopolimer harca etkilerini anlayabilmek için geopolimer harca plastik ve/veya sertleşmiş halde çeşitli ölçüm methotları uygulanmıştır.

Kıvam, işlenebilme, birim hacim ağırlık, su emme, priz, ultrases geçiş hızı vb. fiziksel özelliklerinin yanı sıra, mekanik özelliklerinin belirlenebilmesi için dayanım testi ve kimyasal özelliklerinin tespiti içinde FTIR, SEM ve EDS testleri uygulanmıştır. Aşağıda bu testlerin ölçüm esasları ayrı ayrı açıklanmaktadır.

3.5.2.1 Taze Harcın Birim Hacim Kütlesinin Tayini

Plastik kıvamdaki harçların birim hacim kütleleri TS EN 1015-6 standartına göre bulunmaktadır. Bu standart, hacmi bilinen bir harcın kütlesinin hesplanması temeline dayanmaktadır. Standartın içeriğinde yayılma tablası (flow table) ile yayılma çapı belirlenen harcın 3 farklı şekilde birim ağırlığının bulunması esas alınır.

İlgili yayılma ölçüleri ve uygulanan ölçme yöntemleri şu şekildedir:

- *Yayılma değeri <140 mm için (kuru harçlar) için vibrasyon yöntemi:* Kalibre edilen ve harç ile doldurulan kap vibrasyon tablasında tamamen yerleşinceye kadar vibrasyona maruz bırakılır. Kabın tamamının tam olarak dolu olması önemlidir. Harç dolu kap 1 gram hassasiyetle tartılır.
- *Yayılma değeri 140-200 mm için şok yöntemi:* Yarısına kadar doldurulan kalibre edilmiş kap, karşılıklı kenarları üzerinde 30 mm eğilerek sert ve sağlam tabana 10 defa düşme hareketi yaptırılır. Hava sürükleyici içeren harçlarda bu sayı 5'e düşürülür. Daha sonra kabın diğer yarısı doldurulur ve şok sıkıştırması tekrar edilir. Harç dolu kap 1 gram hassasiyetle tartılır.
- *Yayılma değeri >200 mm için (akıcı harçlar) için direkt tartım yöntemi:* Kalibre edilen ve harç ile doldurulan kap herhangi bir işlem yapmadan 1 gram hassasiyetle tartılır.

Birim hacim kütlesi (ρ_m) aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$\rho_m = (m_2 - m_1) / V \qquad (3.1)$$

m_2 = kabın darası+ harç ağırlığı (g) m_1 = kabın darası (g)

V= Kabın iç hacmi (cm^3)

3.5.2.2 Kıvam Tayini (Sarsma Tablası ile Yayılma) Deneyi

Bu tezde taze betonun kıvamını belirleme yöntemlerinden biri olan ve agrega çapı maksimum 8 mm'e kadar olan harçlarda kullanılabilen sarsma tablası deneyi TS EN 1015-3 / ISO 9812'e göre yapılmıştır. Deneyin yayılma tablası üzerindeki üst plaka içine, kesik huni biçimli metal kalıba numune harcı 2 tabaka halinde en az 10'ar defa şişlenerek yerleştirilmiş, koni çıkarıldıktan sonra 15 saniye içinde mekanik kol ile numunelere 15 düşüş yaptırılmıştır. Son olarak yayılan harç tabakasının genişliği en geniş yayılma yapan 3 noktadan ölçülmüş ve bu değerlerin matematiksel ortalamaları hesaplanarak yayılma değerleri ve yüzdeleri bulunmuştur. Yayılma yüzdesi aşağıdaki formülle hesaplanmıştır.

$$\text{Yayılma (\%)} = [(\text{Yayılma çapı (cm)} - 25) / 25] \times 100 \quad (3.2)$$

3.5.2.3 Yığın Yoğunluk, Görünür Porozite ve Su Emme

Bu tezde geopolimer harcın bakteriyel iyileştirmeden önce ve bakteriyel iyileştirmeden sonra olmak üzere 2 defa yığın yoğunluk, görünür porozite ve su emme değerleri ölçülerek sonuçlar karşılaştırılmıştır. Ölçüm ve hesaplamalar ASTM C 642-06 ve TS EN 1170-6 standartları esaslarına göre yapılmıştır. 40x40x160 mmlik prizma numuneler 24 saat boyunca 21°C'de oda sıcaklığında tutulduktan sonra, kalıptan çıkarılarak 48 saat boyunca 60°C etüv fırınında sıcak küre tabi tutulmuştur. 3 günün sonunda etüvden alınan numuneler tartılarak kuru kütlesi belirlenmiştir (W_K). Daha sonra tüm numuneler belirlenen sıvı kür ortamında 21 °C'de kürlenmeye bırakılmış, 24 saat sonunda havuzdan çıkarılarak yüzey nemi alınarak kurutulmuş ve doygun kütlesi belirlenmiştir (W_D). Suya doygun numunelerin sualtı ağırlıkları da ölçülmüştür (W_A). Buna göre numunelerin sertleşmiş harç içerisindeki yığın yoğunluğu, su emme ve görünür porozite hesaplamaları aşağıdaki formüllerle bulunmuştur.

Malzeme biliminde kullanılan temel hacim ve yoğunluk kavramları mevcuttur. Buna göre;

Yığın (bulk) yoğunluk: Numune kütlesi / yığınsal hacim

$$\rho_b = [W_K /(W_D - W_A)] \times \rho_s \quad (3.3)$$

Görünür katı yoğunluğu: Numune kütlesi / görünen katı hacmi

$$\rho_{gk} = [W_K /(W_K - W_A)]x\ \rho_s \quad (3.4)$$

Doygun katı yoğunluğu: Doygun numune kütlesi / yığınsal hacim

$$\rho_{dk} = [W_D /(W_D - W_A)]x\ \rho_s \quad (3.5)$$

Su emme (%) : (açık porların hacmi/bulk hacmi) / kuru ağırlık x 100

$$\Omega = (W_D - W_K) / W_K \text{ x } 100 \quad (3.6)$$

Görünür porozite (%) : (açık porların hacmi/bulk hacmi) x100

$$P_g = [(W_D-W_K)/(W_D-W_A)]x100 \quad (3.7)$$

Burada;

W_K = Kuru numunenin havadaki ağırlığı (g)

W_A = Su ya da sıvı emdirilmiş numunenin su içindeki asılı ağırlığı (g)

W_D = Su ya da sıvı emdirilmiş (doymuş) numunenin havadaki ağırlığı (g)

ρ_s = Kullanılan sıvının (genellikle su) yoğunluğu

3.5.2.4 Kılcal Geçirimlilik Deneyi

Numunelerin kılcal geçirimlilik deneyi TS EN 480-5 standartı dikkate alınarak yapılmıştır. Buna göre 48 saat 80°C etüvde kurutulmuş 40x40x160 mm‟lik prizma numuneler alt yüzeyleri açıkta kalacak şekilde tüm yüzeyleri parafinle kaplanarak suya temas ettirilmiştir. 24 saat boyunca alt yüzeyden kılcal yolla emilen su miktarı tartı yardımıyla ölçülmüştür. Buna göre numunelerin kılcal su emme katsayıları aşağıdaki bağıntı yardımıyla bulunmuştur.

$$k_c = \left\{\frac{Q}{A}\right\}^2 x \frac{1}{t} \quad (3.8)$$

k_c : Kılcal su emme katsayısı (cm^2/sn) t : Ölçüm aralığı süresi (sn)

A : Kılcal su emme yüzeyi alanı (cm^2) Q : t zaman aralığında emilen su miktarı (cm^3)

3.5.2.5 Basınç Dayanımı Tayini

TS EN 12390-1'e göre hazırlanan numunelerin basınç dayanım testleri (7 günlük ve 60 günlük) TS EN 12390-3 nolu standarda göre yapılmıştır.

50x50x50 (mm) ebatında hazırlanan küp numuneler, yüzeylerindeki fazla nem alındıktan sonra, yük uygulama yönü beton döküm yönüne dik olacak konumda cihaza yerleştirilmiştir. Numuneler, makinanın alt yükleme başlığı üzerine merkezlenmiştir. Tüm deneylerde 1,0 MPa/s ($N/mm^2.s$) sabit yükleme hızı kullanılmıştır. Basınç dayanımı, aşağıda verilen eşitlik kullanılarak hesaplanmıştır:

$$f_c = F / A_c \quad (3.9)$$

F_c: Basınç dayanımı, MPa (N/mm^2),

F: Kırılma anında ulaşılan en büyük yük, N,

A_c: Numunenin, üzerine basınç yükünün uygulandığı en kesit alanı, mm^2.

Bu alan, numunenin belirtilen ölçüleri kullanılarak EN 12390-1'de verilen işlemle, numune üzerinde ölçülen gerçek boyutlar kullanılarak hesaplanır. Basınç dayanımı, en yakın 0,5 MPa (N/mm^2)'ye yuvarlatılarak gösterilir.

3.5.2.6 Eğilme Dayanımı Tayini

Numunelerin eğilme dayanımları TS EN 12390-5'e uygun olarak, 7 ve 60. günlerde tek bir orta yük kullanılarak küçük harç kirişler (40 x 40 x 160 mm) üzerinde yapılmıştır. 7. günün sonunda numuneler bir servo hidrolik deplasman kontrollü cihaz kullanılarak yükleme hızı, 0,04 MPa/s ($N/mm^2.s$) ilâ 0,06 MPa/s ($N/mm^2.s$) arasında sabit gerilme artış hızı sağlanacak şekilde ayarlanmıştır. Yükleme, darbe etkisi oluşturulmadan ve çatlak genişliği maksimum 400 µm olacak şekilde el ile durdurulmuştur.

Boşaltmanın ardından, kontol edilen çatlak genişliklerinin 50 µm ile 400 µm arasında değiştiği görülmüştür. Çatlaklar oluşturulduktan sonra, besiyeri ve kültür ortamında 60 gün boyunca kürlenmiştir. 60. günün sonunda numuneler bir kez daha 0.05 mm/sn hız ile eğilme yükü altında yeniden kırılmıştır.

Eğilme dayanımı, aşağıda verilen eşitlik kullanılarak hesaplanmıştır:

$$F_{cf} = (F \times L) / (d_1 x d_2^2) \quad (3.10)$$

f_{cf}: Eğilme dayanımı, MPa (N/mm^2),

F: En büyük yük, N,

L: Mesnet silindirleri arasındaki açıklık, mm

d_1 ve d_2: Numunenin en kesit boyutları, mm

Eğilme dayanımı, en yakın 0,1 MPa (N/mm^2)'ya yuvarlatılarak gösterilmiştir.

3.5.2.7 Ultrasonik Atımlı Dalga Hızının Tayini

Bu test hazırlanan tüm numuneler için, eğilme yüklemesi öncesi, iyileştirme kürü boyunca haftalık olarak ve 2. yüklemeden sonra TS EN 12504-4'e uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Bu standard, ultrasonik boyuna dalga atımlarının sertleşmiş beton içindeki ilerleme hızının tayini için kullanılan bir yöntemi kapsar. Bu yöntem çok çeşitli amaçlarla kullanılmaktadır. Bu tezdeki kullanım amacı betonun homojenliği hakkında bilgi sahibi olmak ve bakteri aracılığıyla oluşturulan $CaCO_3$ mekanizmasının numunelerin ultrases geçiş hızlarında, dolayısıyla boşluk yapısında bir değişiklik yapıp yapmadığını gözlemlemektir.

Kullanılan ultrasonik test cihazı ile ölçüm 3 farklı yoldan olabilmektedir: Doğrudan ölçüm, yarı doğrudan ölçüm ve dolaylı ölçüm. Burada doğrudan ölçüm yöntemi kullanılarak 40x40x160 mm ebatlarındaki prizma numunelerin en kesiti 40 mm olan kısmı kullanılmıştır. Numunenin homojenliği kontrol edildikten sonra haftalık ölçümler numunenin aynı noktasından alınmaya gayret edilmiştir. Beton ve transdüsör yüzleri arasında yeterli akustik bağlantıyı sağlamak için ultrasonik jel kullanılmıştır. Transdüseri beton yüzeye bastırarak ölçüm alınmıştır. Geçiş süresi olarak 3 okumanın ortalaması alınmıştır.

Doğrudan ve yarı-doğrudan aktarımlar için ultrasonik geçiş hızı Denklem 3.11'deki formülle hesaplanmıştır:

$$V = L/T \quad (3.11)$$

V: Ultrasonik geçiş hızı (km/s),

L: Cinsinden geçiş yolu uzunluğu (mm),

T: Uzunluğu μs cinsinden geçmek için geçen zamandır.

Ultrasonik geçiş hızı en yakın 0,01 km/s'ye yuvarlanarak ifade edilmiştir.

3.5.2.8 FTIR Analizi

Numunelerin iyileşme küründen önce ve sonraki çökeltilerinde olan mevcut fazlar, Fourier dönüşümü kızılötesi spektroskopisi (FTIR) analizi ile (JASCO FT/IR 6700) değerlendirilmiştir. Çökelti, paslanmaz çelik bir spatula ile kazınarak parçalar çatlak yüzeyinden toplanmış, toplanan numunelerin yaklaşık 5 mg'ı kullanılarak 400–4000 cm^{-1} aralığında bir çözünürlükte kimyasal olarak tanımlanmıştır.

FTIR analiz yöntemi, test örneklerini taramak ve kimyasal özellikleri gözlemlemek için kızılötesi ışık kullanır. FTIR cihazı örnek üzerine yaklaşık 10.000 ila 100 cm^{-1} kızılötesi ışın gönderir, bu ışınlardan bazıları emilir ve bir miktarı ise geçer. Emilen ışınlar, numunedeki moleküller tarafından rotasyonel veya titreşimsel enerjiye dönüştürülür. Dedektördeki sinyallerin sonuçları, tipik olarak 4000 cm^{-1} ila 400 cm^{-1} arasında bir spektrum olarak sunulur. Her bir molekül veya kimyasal yapı, benzersiz bir spektral parmak izi üreterek FTIR analizini kimyasal tanımlama için kullanılır hale getirir. Bu teknik, 10 ila 50 mikron arasındaki parçacıkların ve yüzeydeki daha büyük alanların kimyasal bileşimlerinin analizinde oldukça faydalıdır. FTIR Spektrometresi, numune içerisindeki kimyasal bağları ve moleküler yapısını gösteren absorbans spektrumları grafiğini oluşturur. Bu spektrum, mevcut bileşenleri temsil eden pikleri içerir. Bu soğurma pikleri ise fonksiyonel grupları gösterir.

3.5.2.9 SEM VE EDS Analizi

Bu tezde kullanılan SEM görüntüleri Munzur Üniversitesi'nde bulunan Hitachi SU3500 cihazı kullanılmıştır. Cihaz yardımıyla odaklanmış ve hızlandırılmış elektron demeti ile numune yüzeyini tarayarak ve saçılan elektronları alıcı detektörlerle analiz ederek numune yüzeyleri görüntülenmiş, ayrıca, görüntü alınan noktadan element analizi (EDS) yapılmıştır.

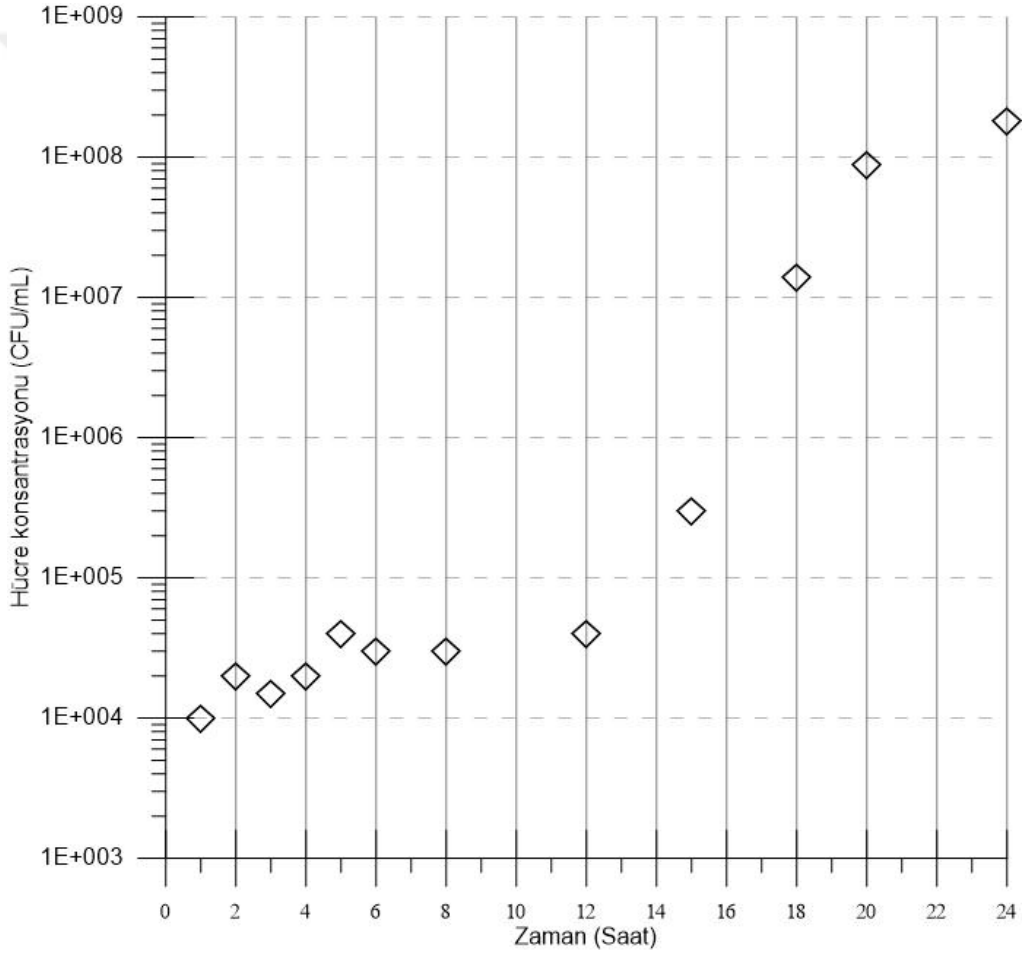
Üretilen geopolimer harçların mekanik özelliklerinin belirlendiği numunelerin içyapısından alınan yaklaşık 0,5-1 cm^3 ebatındaki küçük parçalar yüzeyleri altın tozu ile kaplanarak cihaza yerleştirilmiştir. Görüntülemeler 5, 10, 20, 50, 100 ve 500 µm boyutlarında incelemeler sonucunda elde edilmiştir. Görüntü ve ölçümler hem bakteriyel iyileştirme kürü öncesi hemde sonrasında (7. gün ve 60. günlerde) yapılarak karşılaştırılmıştır.

4. BULGULAR

4.1 ÖN DENEY SÜRECİ BULGULARI

4.1.1 Spektrofotometrik Analiz

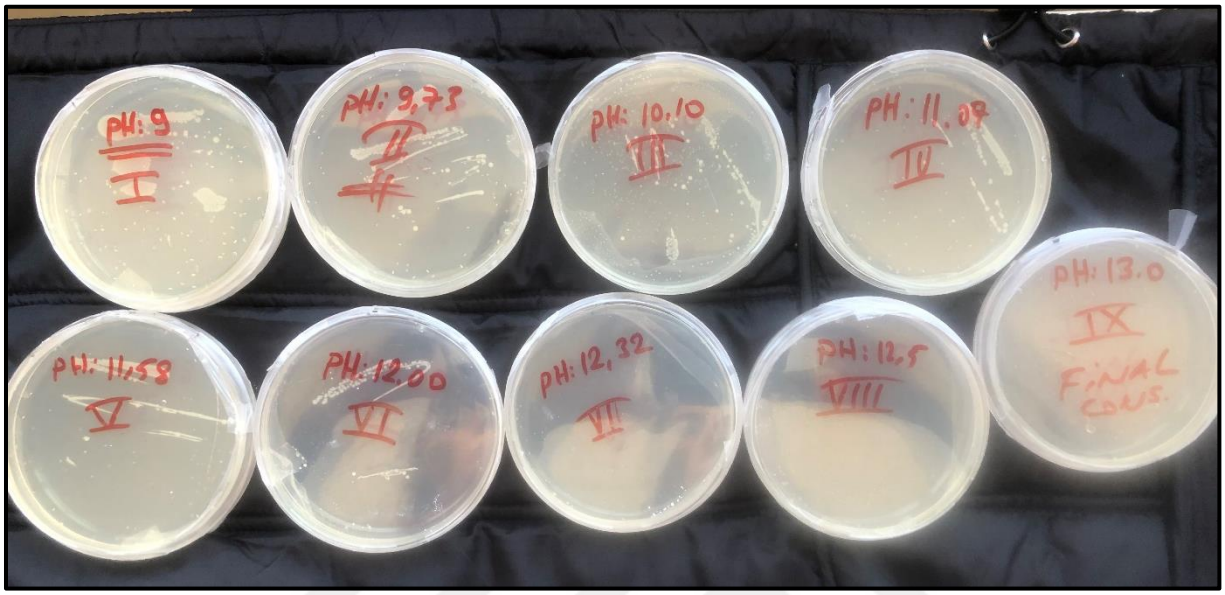
Şekil 4.1'de bakterinin spektrofotometrik analiz cihazı ile ölçülen 24 saatlik büyüme eğrisi görülmektedir. Bu tez çalışması süresince her bakteri üretme (çoğaltma) işlemi sırasında spektrofotometrik analiz yapılmış, böylece kullanılan kültürlerdeki bakteri yoğunluğu kontrol edilmiştir.



Şekil 4.1: *Bacillus sporasarcina pasteurii* bakterisinin büyüme grafiği.

4.1.2 NaOH – Bakteri Kültürü Titrasyonu

Yapılan NaOH- bakteri kültürü titrasyonundan alınan örnekler ile katı agar ortamına ekim yapılmış ve üremeler Şekil 4.2'de gösterilmiştir.



Şekil 4.2: Bakteri-NaOH etkileşiminin agar ortamında gözlenmesi.

Şekilde de görüldüğü üzere, bakteri kültürü üzerine 12 mol NaOH çözeltisinin azar azar ve aralıklarla ilave edilmesi sonucunda pH =12'e kadar katı agar ortamında üreme görülmüştür. Ancak bu pH'dan sonra üreme görülmemiştir. Bunun sebebi pH=9'da optimum üreme koşullarını sağlayabilen bakterinin sıvı ortamın fazla bazik olması sonucu canlı kalamadığıdır.

4.1.3 Geopolimer Harçların Ön Deney Bulguları

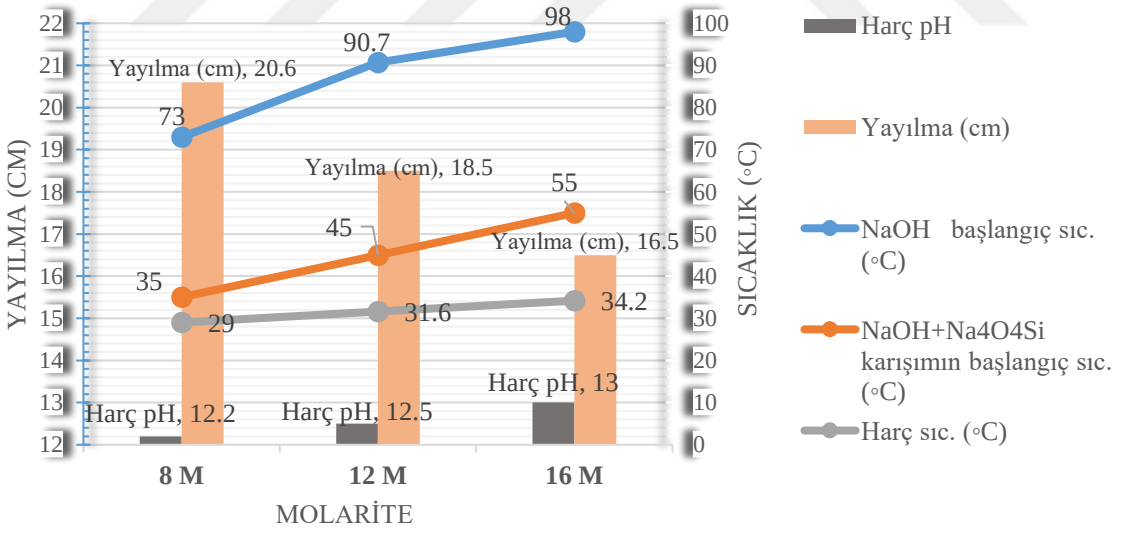
Geopolimer harcın sıcaklığı bakterinin yaşam döngüsünü devam ettirebilmesi için önemlidir. Geopolimer harçların üretimi esnasında sıcaklık çok kısa sürede çok yüksek seviyelere çıkabilir. Ölçümler sonucunda bunu etkileyen en önemli parametrenin NaOH çözeltisi olduğu ortaya çıkmıştır. *Bacillus sporosarcina pasteurii* bakterisinin uygun yaşam sıcaklığı yaklaşık 30 C'dir. 40 C'de kurutulduğunda spor forma geçtiği ancak hızlı sıcaklık artışlarında canlılığını kaybettiği de bilinmektedir. Bu nedenle herhangi bir kapsülleme işlemi yapılmayan bakterilerin kullanıldığı geopolimer harçlarda ani sıcaklık artışlarını da kontrol etmek gerekmektedir. Bu çalışmada molaritesine göre saf su ile hazırlanan NaOH çözeltisi tamamen soğuyana kadar bekletilmiş, daha sonra oda sıcaklığında NaOH ve Na_4O_4Si 1:2 oranında karıştırılmıştır. Sonuçlar Tablo 4.1 ve Şekil 4.3'de görülmektedir. Ayrıca bakteri ilave edilmeden 4, 8, 12 ve

16 mol hazırlanan kontrol harçları (K4, K8, K12, K16) ile metakaolin içerisine karıştırılan bakteri sporlarının bulunduğu matrisle 4, 8, 12 ve 16 mol olarak hazırlanan harçların (M4, M8, M12 ve M16) priz süreleri de aşağıdaki tablo 4.1'de verilmiştir.

Tablo 4.1: Reaksiyon ısıları, pH ve priz süreleri.

HARCIN SICAKLIK, pH ve YAYILMA DEĞERLERİ	8 M	12 M	16 M
NaOH t=0 sıc. (◦C)	73	90,7	98
NaOH+Na_4O_4Si karışım t=0 sıc (◦C)	35	45	55
Geopolimer harç sıc. (◦C)	29	31,6	34,2
Geopolimer harç pH	12,2	12,5	13
Yayılma (cm)	20,6	18,5	16,5

HARCIN PRİZ SÜRELERİ		4 M	8 M	12 M	16 M
Kontrol numunesi	Başlama (dk)	80-160	65-130	55-100	40-60
Kontrol numunesi	Bitiş (dk)	550-680	500-620	450-550	380-470
Bakterili harç numunesi	Başlama (dk)	90-180	75-140	60-110	55-80
Bakterili harç numunesi	Bitiş (dk)	650-800	600-720	550-650	450-580



Şekil 4.3: Molariteye bağlı sıcaklık, yayılma ve pH değişimi

NaOH konsantrasyonunun harcın işlenebilirliğine etkisi ise tam tersine bir durum yaratmaktadır. Çözelti içindeki NaOH miktarı arttıkça çözeltinin yoğunluğu artmakta ve buna paralel olarak harçta meydana gelen yayılma her 4 mol için yaklaşık olarak %20 azalmaktadır.

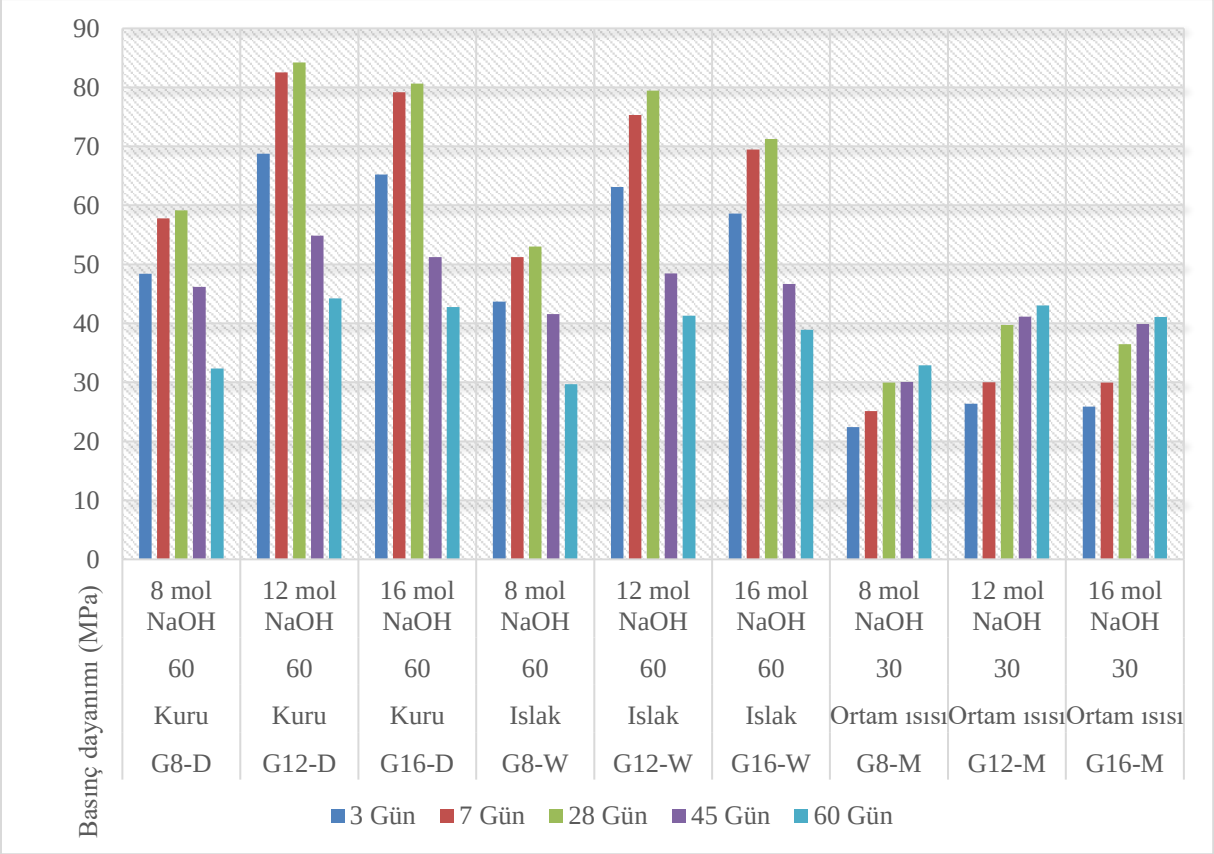
Ayrıca harcın molartitesi düştükçe priz süresi uzamakta, ilave edilen bakteri sporu da yine harcın priz süresini uzatmaktadır.

Grafikte görülen verilere göre çözelti sıcaklığı çözeltideki NaOH konsantrasyonu ile doğru orantılı olarak artmaktadır. Benzer şekilde NaOH ve Na_4O_4Si karışımı gerçekleştiğinde de reaksiyon sıcaklığı molarite ile doğrusal olarak artmaktadır. Oda sıcaklığına kadar soğutulan bu karışım harca ilave edildiğinde oluşan reaksiyon nedeniyle harç sıcaklığı da artmakta ancak bu artış 5◦C ile sınırlı kalmaktadır.

Çalışmadaki ilk seri geopolimer harçların basınç dayanımları Tablo 4.2 ve Şekil 4.4'de verilmiştir.

Tablo 4.2: 1. Seriler için kür tipine göre basınç dayanımı sonuçları.

“				BASINÇ DAYANIMI (MPa)				
ÖRNEK NO	KÜR TİPİ	KÜR SIC.	NAOH MOL.	3 GÜN	7 GÜN	28 GÜN	45 GÜN	60 GÜN
G8-D	Kuru	60	8 mol	48,4	57,8	59,14	46,21	32,36
G12-D	Kuru	60	12 mol	68,75	82,52	84,25	54,87	44,24
G16-D	Kuru	60	16 mol	65,25	79,16	80,67	51,25	42,78
G8-W	Islak	60	8 mol	43,7	51,26	53,01	41,55	29,71
G12-W	Islak	60	12 mol	63,1	75,31	79,48	48,47	41,3
G16-W	Islak	60	16 mol	58,62	69,47	71,26	46,68	38,92
G8-M	Ortam Isısı	30	8 mol	22,44	25,11	29,94	30,06	32,88
G12-M	Ortam Isısı	30	12 mol	26,4	30,04	39,73	41,14	43,06
G16-M	Ortam Isısı	30	16 mol	25,92	29,96	36,5	39,9	41,08



Şekil 4.4: 1. Seriler için kür tipine göre basınç dayanımı sonuçlarının grafik üzerinde görünümü.

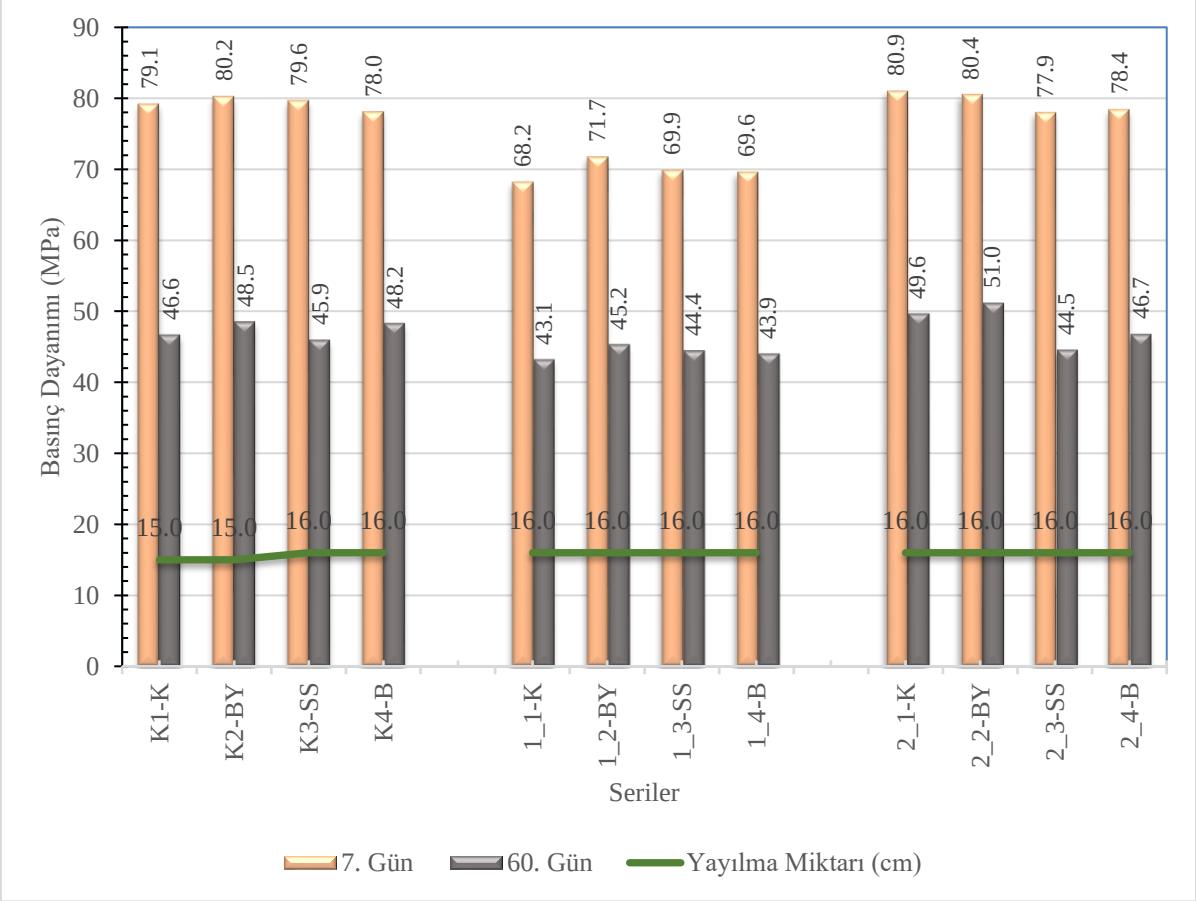
Grafik basınç dayanımı açısından incelendiğinde molaritesi 12 mol olan harçların en yüksek basınç dayanımını sağladığı görülmektedir. NaOH konsantrasyonu 8 mole düştüğünde geç dayanımda yaklaşık %20 dayanım kaybı olduğu, 16 mole çıktığında ise yaklaşık %5 dayanım kaybı meydana geldiği görülmektedir. Ayrıca kuru fırın kürü, ıslak sıcak küre göre yaklaşık %10 daha düşük dayanım sağlamıştır. İleri yaş dayanımlara bakıldığında ise laboratuvar ortamında kurumaya bırakılan numunelerin erken dayanımlarının çok düşük olmasına rağmen geç dayanımlarının sıcak kürlenen numunelerin geç dayanımlarını yakaladığı görülmüştür. Bu durum sıcak kürlenen harçların hızlı hidratasyon nedeniyle hızla yüksek dayanım değerlerine çıkmasına rağmen, 28. günden sonra basınç dayanımı değerlerinin düşüşe geçmesiyle meydana gelmiştir.

2. seri numuneler, *Bacillus sporosacina pasteurii* bakterisinin farklı ortam şartlarında kürlenmesinin numunelerin boşluk miktarlarını azaltarak basınç dayanımlarını artma ve su emme miktarlarında azalma sağlayıp sağlayamadıklarının belirlenmesi için hazırlanmıştır. Bu serinin basınç dayanımı sonuçları Şekil 4.5 ve Tablo 4.3'de verilmiştir.

Tablo 4.3: 2. Seri için basınç dayanımı, yayılma ve taze harç birim hacim ağırlığı sonuçları.

SERİLER	7. GÜN BASINÇ DAYANIMLARI (MPa)	60. GÜN BASINÇ DAYANIMLARI (MPa)	YAYILMA (cm)	TAZE HARÇTA BİRİM HACİM AĞIRLIĞI (g/cm^3)
K1-K	79,1	46,60	15	1780
K2-BY	80,2	48,45	15	1780
K3-SS	79,6	45,86	16	1780
K4-B	78	48,20	16	1780
1_1-K	68,18	43,13	16	1720
1_2-BY	71,70	45,25	16	1720
1_3-SS	69,88	44,37	16	1720
1_4-B	69,57	43,92	16	1720
2_1-K	80,92	49,58	16	1720
2_2-BY	80,44	51,04	16	1720
2_3-SS	77,92	44,48	16	1720
2_4-B	78,35	46,66	16	1720

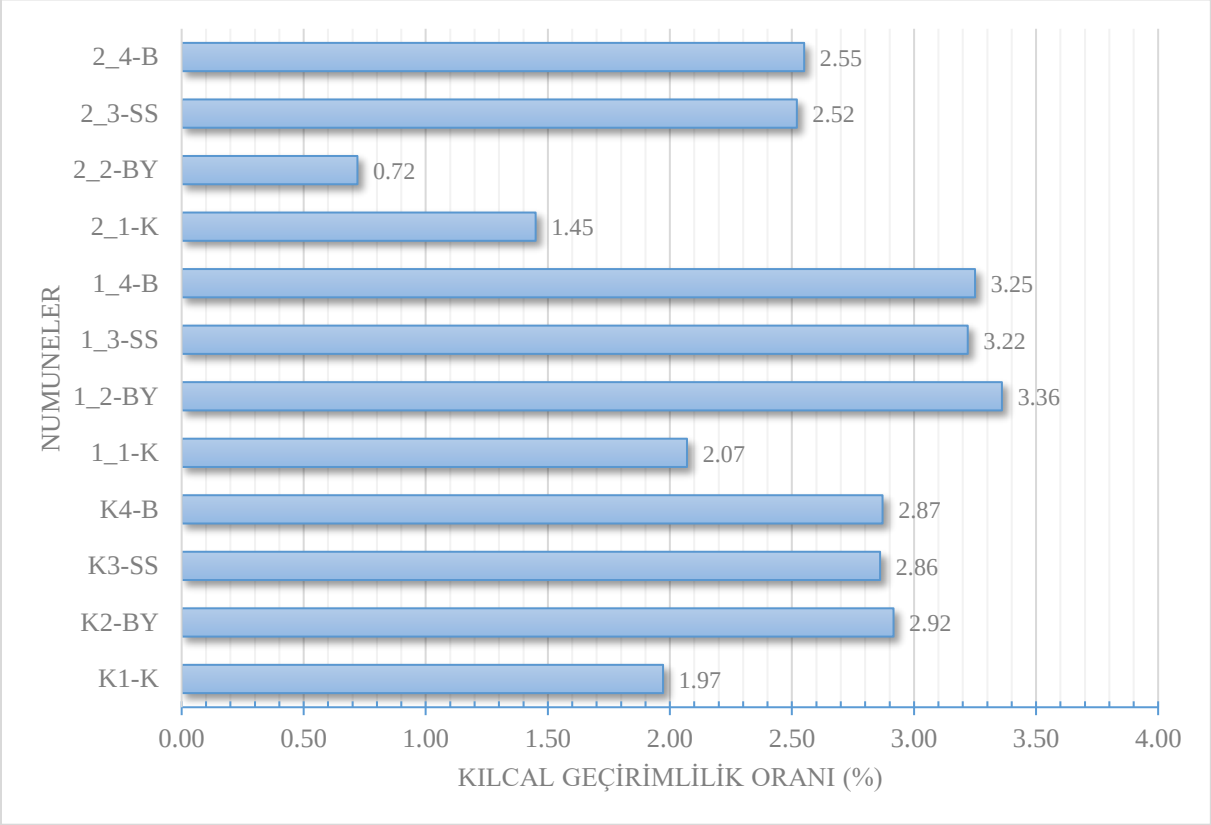
. NOT: 2. Serinin numune isimleri ve içeriklerine Tablo 3.12'de ulaşılabilir.



Şekil 4.5: Geopolimer harcın kür şartlarına, yayılmaya ve zamana bağlı dayanımı.

2. serinin basınç dayanımı sonuçlarına göre en yüksek dayanımı gösteren numuneler, bakteri ilave edilerek üretilen ve besi yerinde kür edilen numunelerdir. Bakteri konulmadan besi yeriyle üretilen numuneler ise kontrol numunesi ve kültür içeren numunelere göre %10 daha az dayanıma sahiptir.

2. serinin kılcal su emme değerleri ise Şekil 4.6'da görülmektedir.



Şekil 4.6: 2. Seri numunelerin kılcal su geçirimlilik oranları.

2. serinin kılcal geçirimlilik oranlarına göre yüzeyden en az su emen numuneler bakteri sporu ilave edilerek üretilen ve besiyerinde iyileştirmeye bırakılan numunelerdir. İkinci olarak ise bakteri sporu ilave edilerek üretilen ve bakteri kültürü içerisinde iyileştirmeye bırakılan numuneler gelmektedir. Yalnızca besiyeri ile üretilen harçlarda ise en yüksek kılcal su emme değerleri gözlenmiştir.

4.2 ANA DENEY SÜRECİ BULGULARI

4.2.1 Fiziksel Ölçümler

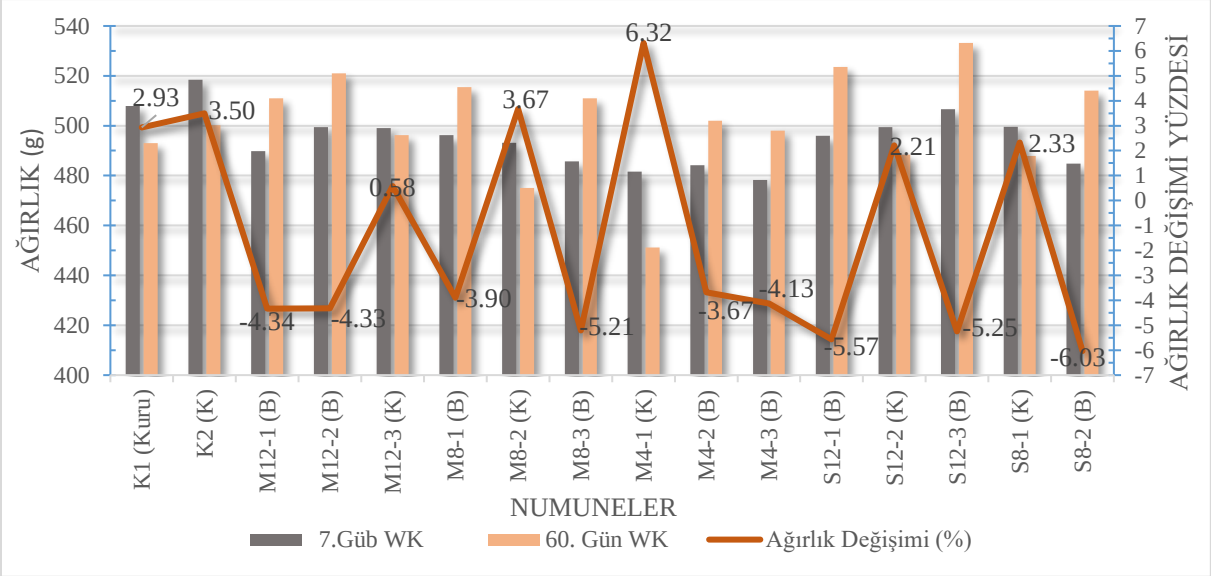
Deney setlerinin ağırlık (g), yığın yoğunluk (g/cm^3), görünür katı yoğunluk (g/cm^3), doygun katı yoğunluk (g/cm^3), su emme (%) ve görünür porozite (%) ölçümleri Tablo 4.4'de verilmiştir.

Tablo 4.4: Numunelerin yoğunluk, su emme ve görünür porozite sonuçları.

NUMUNE KODU	7. GÜN	60. GÜN							
	W_K (g)	W_K (g)	W_D (g)	W_A (g)	ρ_b (g/cm^3)	ρ_{gk} (g/cm^3)	ρ_{dk} (g/cm^3)	Ω %	P_g %
K1 (Kuru)	510,94	493,04	526,47	272,15	1,94	2,23	2,07	0,07	13,14
K2 (K)	521,39	499,09	528,78	268,50	1,92	2,16	2,03	0,06	11,41
M12-1 (B)	492,79	511,04	520,71	266,00	2,01	2,09	2,04	0,02	3,80
M12-2 (B)	502,37	520,98	526,10	267,00	2,01	2,05	2,03	0,01	1,98
M12-3 (K)	502,11	496,22	521,63	265,50	1,94	2,15	2,04	0,05	9,92
M8-1 (B)	499,19	515,52	528,03	266,50	1,97	2,07	2,02	0,02	4,78
M8-2 (K)	496,09	474,99	515,77	258,50	1,85	2,19	2,00	0,09	15,85
M8-3 (B)	488,72	511,04	522,51	263,00	1,97	2,06	2,01	0,02	4,42
M4-1 (K)	484,60	451,17	509,58	253,50	1,76	2,28	1,99	0,13	22,81
M4-2 (B)	487,16	501,95	512,99	257,00	1,96	2,05	2,00	0,02	4,31
M4-3 (B)	481,28	498,05	510,00	253,50	1,94	2,04	1,99	0,02	4,66
S12-1 (B)	498,94	523,54	531,95	272,00	2,01	2,08	2,05	0,02	3,24
S12-2 (K)	502,40	488,38	522,70	265,00	1,90	2,19	2,03	0,07	13,32
S12-3 (B)	509,57	533,17	540,35	277,00	2,02	2,08	2,05	0,01	2,73
S8-1 (K)	502,59	487,94	523,79	263,50	1,87	2,17	2,01	0,07	13,77
S8-2 (B)	487,76	514,01	525,55	265,50	1,98	2,07	2,02	0,02	4,44

Numunelerin kür sonrası yoğunluk, su emme ve görünür porozite sonuçları incelendiğinde bakteri kültürü içerisinde kürlenen numunelerin görünür porozitelerinin bakteri içerisinde kürlenen numunelere göre yaklaşık 3 kat fazla olduğu ve yığın yoğunluklarının da yaklaşık %10 daha düşük olduğu görülmektedir.

Ayrıca tüm numunelerin kür öncesi ve sonrası kuru ağırlıkları incelendiğinde ortam kürüne tabi olan K1 numunesi ile kültür içerisinde kürlenen tüm numunelerde istisnasız olarak ağırlık kaybı olduğu görülmektedir.



Şekil 4.7: Numunelerin kür öncesi ve sonrası ağırlık değişimleri.

Şekil 4.7'de görüldüğü üzere en yüksek ağırlık kaybı miktarı M4-1 numunesi olarak kodlanan 4 mol NaOH çözeltisi ile hazırlanmış harçta %6,32 olurken kontrol numunesinde bu düşüş %2,93'tür. Besiyerinde kürlenen numunelerde ise %3,90 ile %6,03 arasında artışlar meydana gelmiştir.

4.2.2 Görsel Çatlak Kapatma Başarısı

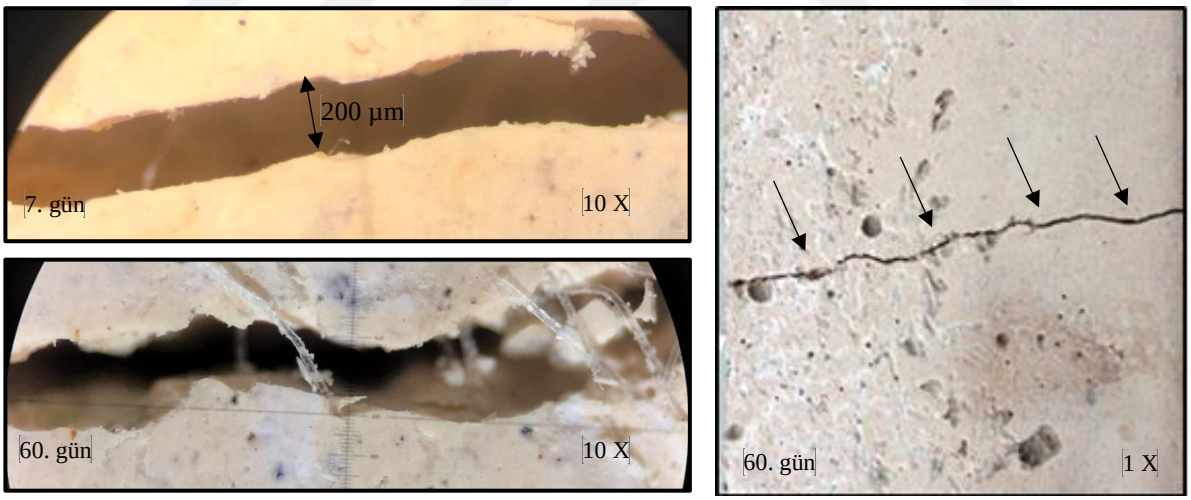
Numuneler optik mikroskop altında incelenerek numune üzerinde deneysel olarak oluşturulan hasarı görsel olarak (çatlak dış yüzeyinde) ne ölçüde kapattığı tespit edilmiştir.

Kontrol numunesi ile birlikte 6 farklı içerikte hazırlanan ve bakteri kültürü / besiyeri içerisinde kürlenen farklı çatlak genişliğine sahip numunelerin 6 tanesi çatlağı tamamen onarmış, 6 tanesinde onarım %50'nin üzerinde tamamlanmış, diğer 6 numunede ise %30'a varan oranda çatlak onarımı gözlenmiştir. Numunelerin optik mikroskop görüntüleri ve fotoğrafları aşağıda verilmiştir (Tablo 4.5).

Tablo 4.5: Numunelerin kür öncesi ve sonrası görsel çatlak kapatma durumu (%).

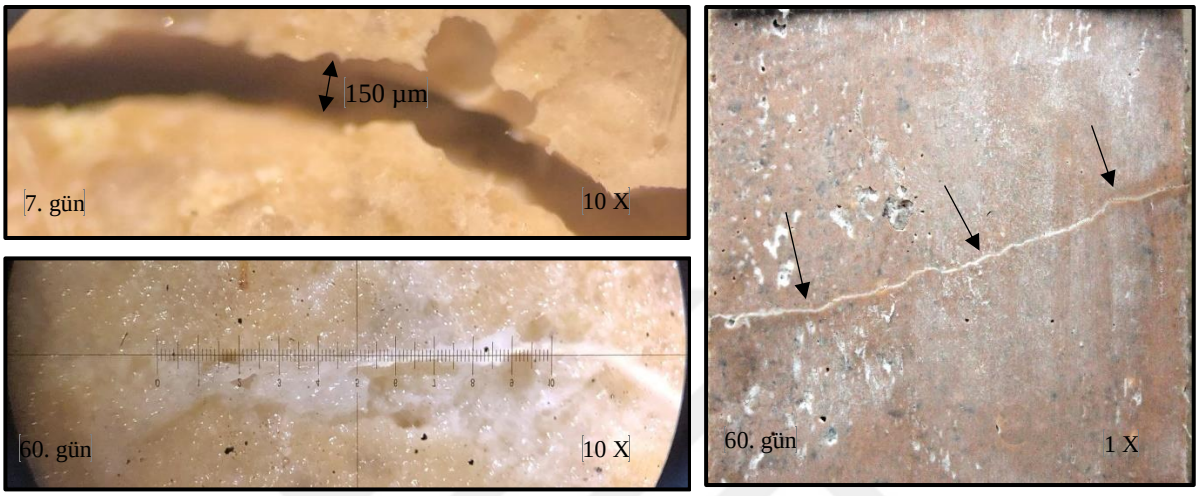
Numune Adı	Çatlak genişliği (µm)	Kür Ortamı	Görsel Çatlak Kapatma Durumu (%)	Numune Adı	Çatlak genişliği (µm)	Kür Ortamı	Görsel Çatlak Kapatma Durumu (%)
K1	200	Kuru	0	M4-1	50	Kültür	100
K2	150	Kültür	90	M4-2	50	Besiyeri	100
M12-1	400	Besiyeri	30	M4-3	100	Besiyeri	100
M12-2	150	Besiyeri	90	S12-1	400	Besiyeri	90
M12-3	150	Kültür	60	S12-2	150	Kültür	30
M8-1	150	Besiyeri	100	S12-3	300	Besiyeri	80
M8-2	50	Kültür	100	S8-1	200	Kültür	30
M8-3	200	Besiyeri	100	S8-2	400	Besiyeri	80

K1 numunesi üzerinde 7. günde 200 µm genişliğinde çatlak oluşturulmuş ve numune hiçbir işlem yapılmadan 60. güne kadar nem almadan bekletilmiştir. Sonuçta herhangi bir iyileşme gözlenmemiştir (Şekil 4.8).



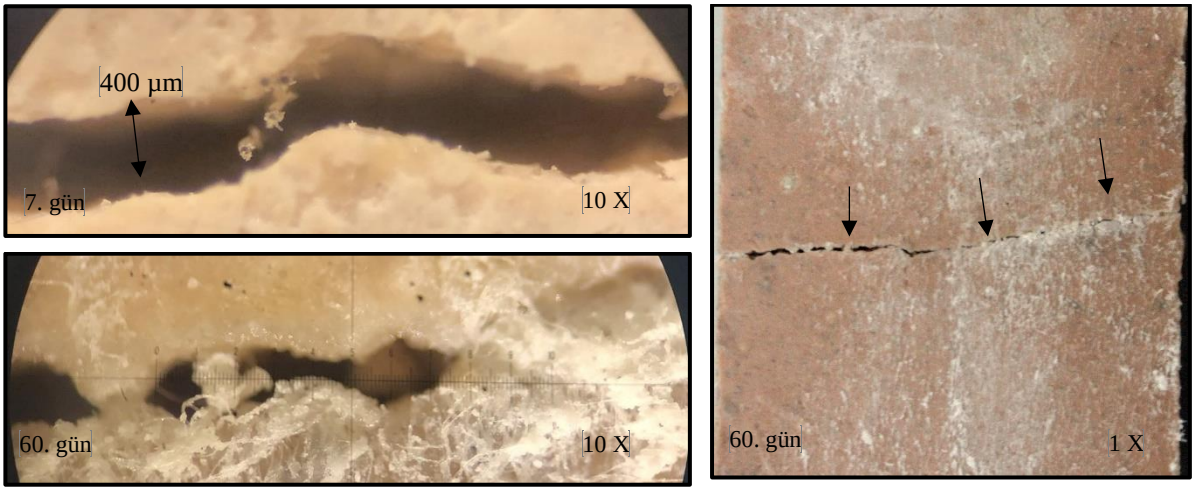
Şekil 4.8: K1 ortam ısısında kürlenen numunenin kür öncesi ve sonrası optik ve fiziksel görünümü.

K2 numunesi üzerinde 7. günde 150 µm genişliğinde çatlak oluşturulmuş ve bakteri kültürü içerisinde 60. güne kadar kürlenmiştir. Sonuçta çatlak görsel olarak yaklaşık %90 oranında kapanmıştır (Şekil 4.9).



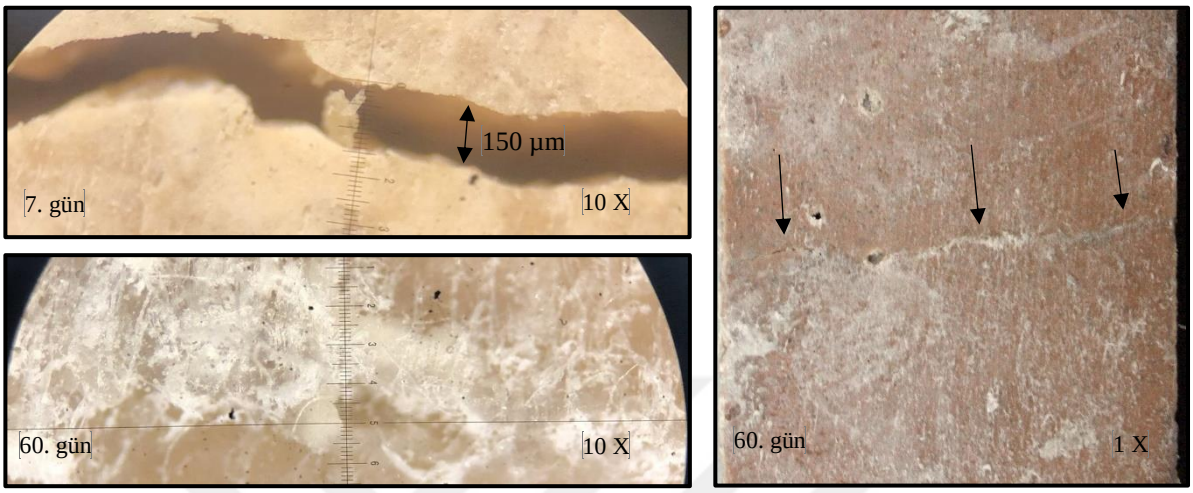
Şekil 4.9: K2 numunesinin kültür içerisinde kürlenme öncesi ve sonrası optik ve fiziksel görünümü.

M12-1 numunesi üzerinde 7. günde 400 µm'ye varan genişlikte çatlak oluşturulmuş ve besiyeri içerisinde 60. güne kadar kürlenmiştir. Sonuçta çatlak görsel olarak yaklaşık %30 oranında kapanmıştır (Şekil 4.10).



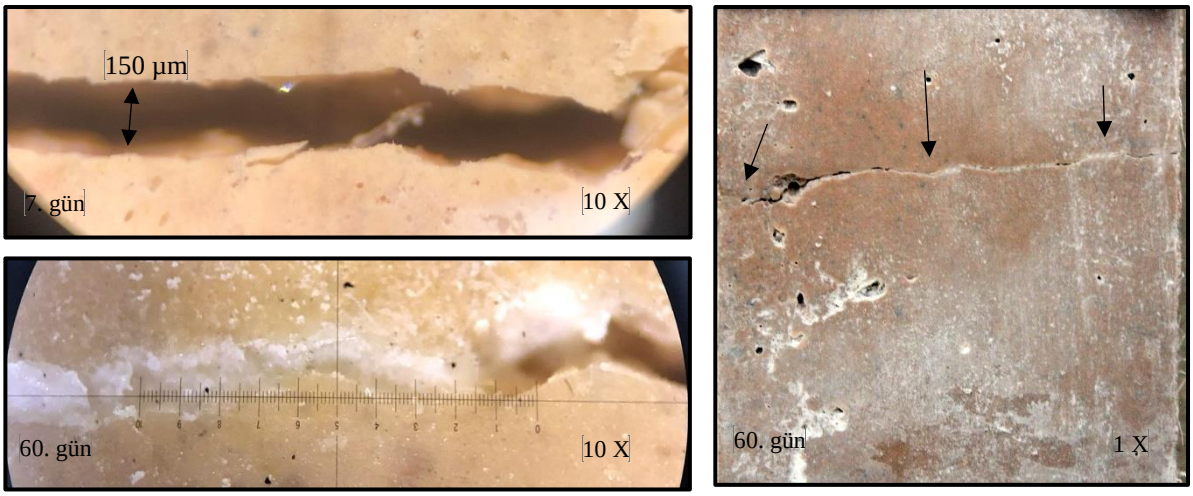
Şekil 4.10: M12-1 numunesinin besiyeri kürü öncesi ve sonrası optik ve fiziksel görünümü.

M12-2 numunesi üzerinde 7. günde 150 µm genişlikte çatlak oluşturulmuş ve besiyeri içerisinde 60. güne kadar kürlenmiştir. Sonuçta çatlak görsel olarak yaklaşık %90 oranında kapanmıştır (Şekil 4.11).



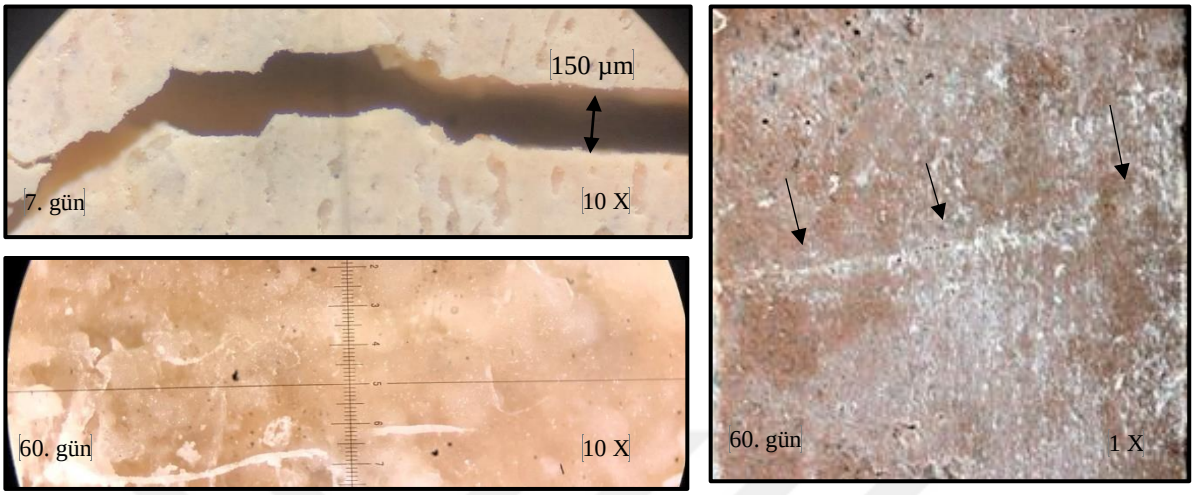
Şekil 4.11: M12-2 numunesinin besiyeri kürü öncesi ve sonrası optik ve fiziksel görünümü.

M12-3 numunesi üzerinde 7. günde 150 µm genişliğinde çatlak oluşturulmuş ve bakteri kültürü içerisinde 60. güne kadar kürlenmiştir. Sonuçta çatlak görsel olarak yaklaşık %60 oranında kapanmıştır (Şekil 4.12).



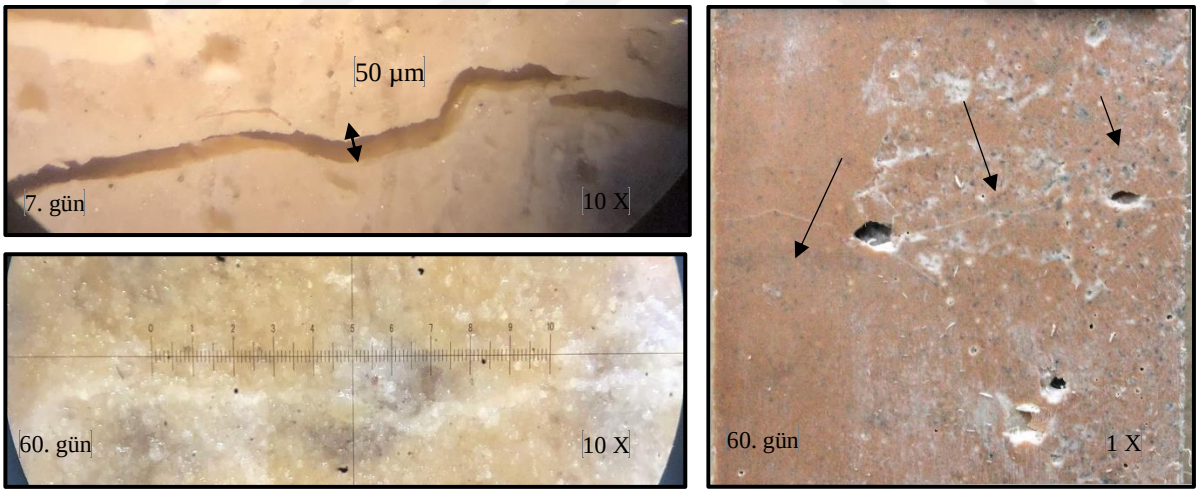
Şekil 4.12: M12-3 numunesinin kültür içerisinde kürlenme öncesi ve sonrası optik ve fiziksel görünümü.

M8-1 numunesi üzerinde 7. günde 150 µm genişlikte çatlak oluşturulmuş ve besiyeri içerisinde 60. güne kadar kürlenmiştir. Sonuçta çatlak görsel olarak tamamen kapanmıştır (Şekil 4.13).



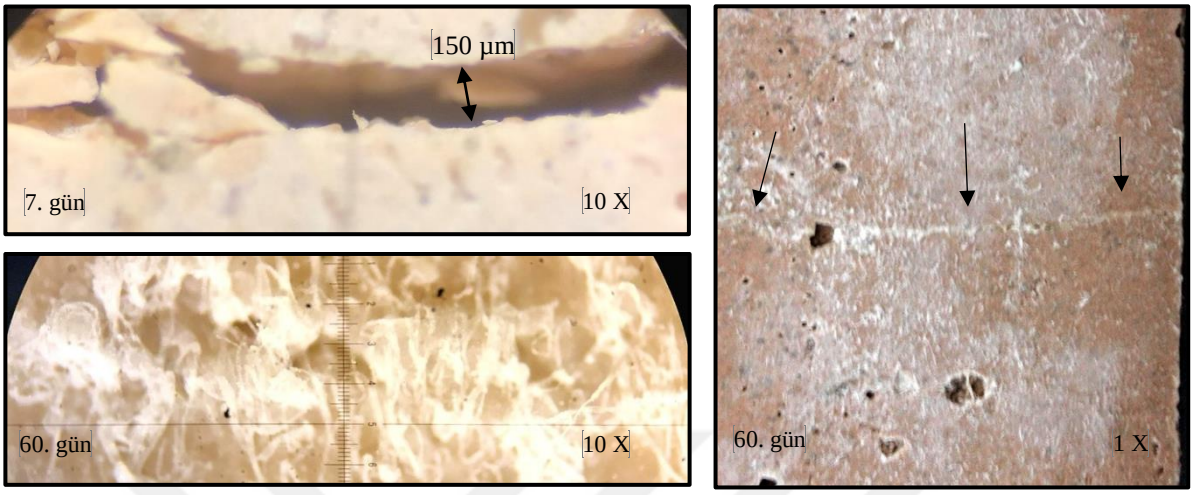
Şekil 4.13: M8-1 numunesinin besiyeri kürü öncesi ve sonrası optik ve fiziksel görünümü.

M8-2 numunesi üzerinde 7. günde 50 µm genişlikte çatlak oluşturulmuş ve bakteri kültürü içerisinde 60. güne kadar kürlenmiştir. Sonuçta çatlak görsel olarak tamamen kapanmıştır (Şekil 4.14).



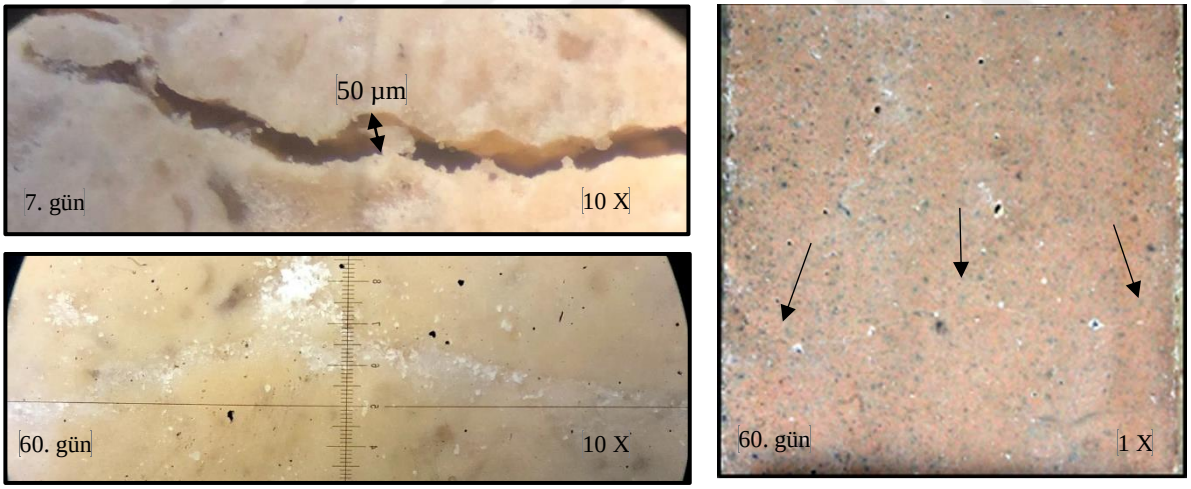
Şekil 4.14: M8-2 numunesinin kültür içerisinde kürlenme öncesi ve sonrası optik ve fiziksel görünümü.

M8-3 numunesi üzerinde 7. günde 200 µm genişlikte çatlak oluşturulmuş ve besiyeri içerisinde 60. güne kadar kürlenmiştir. Sonuçta çatlak görsel olarak tamamen kapanmıştır (Şekil 4.15).



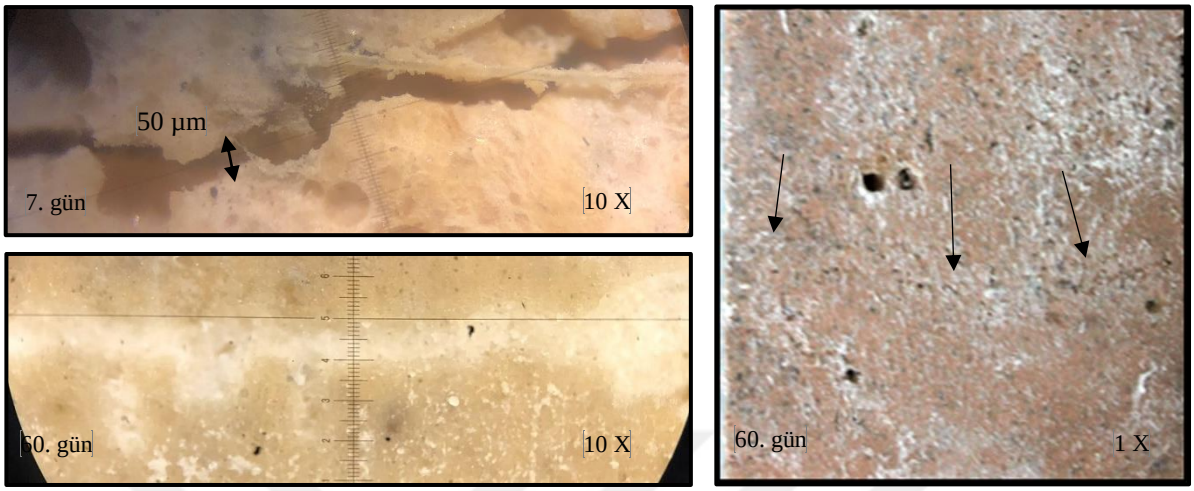
Şekil 4.15: M8-3 numunesinin besiyeri kürü öncesi ve sonrası optik ve fiziksel görünümü.

M4-1 numunesi üzerinde 7. günde 50 µm genişlikte çatlak oluşturulmuş ve bakteri kültürü içerisinde 60. güne kadar kürlenmiştir. Sonuçta çatlak görsel olarak tamamen kapanmıştır (Şekil 4.16).



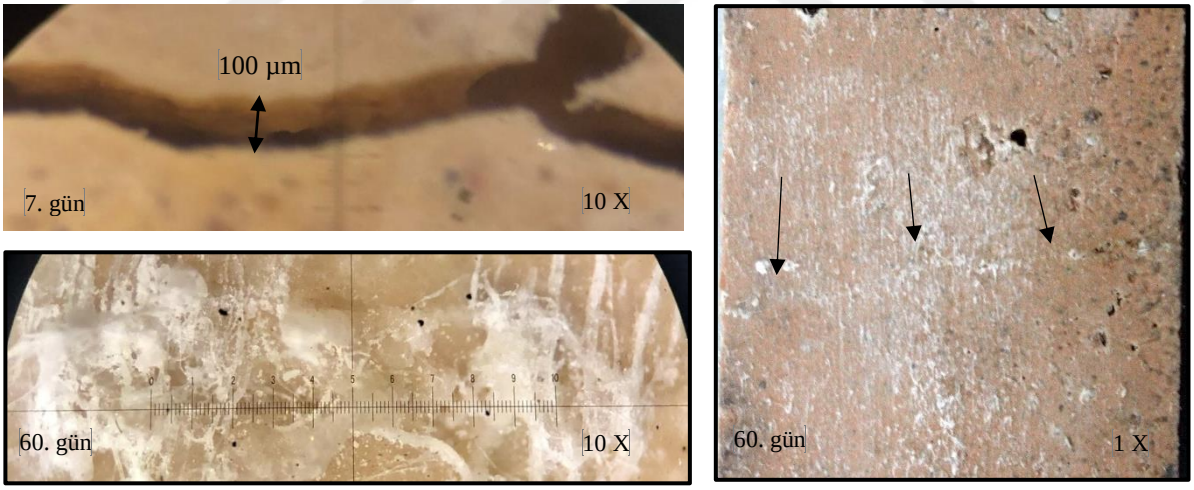
Şekil 4.16: M4-1 numunesinin kültür içerisinde kürlenme öncesi ve sonrası optik ve fiziksel görünümü.

M4-2 numunesi üzerinde 7. günde 50 µm genişlikte çatlak oluşturulmuş ve besiyeri içerisinde 60. güne kadar kürlenmiştir. Sonuçta çatlak görsel olarak tamamen kapanmıştır (Şekil 4.17).



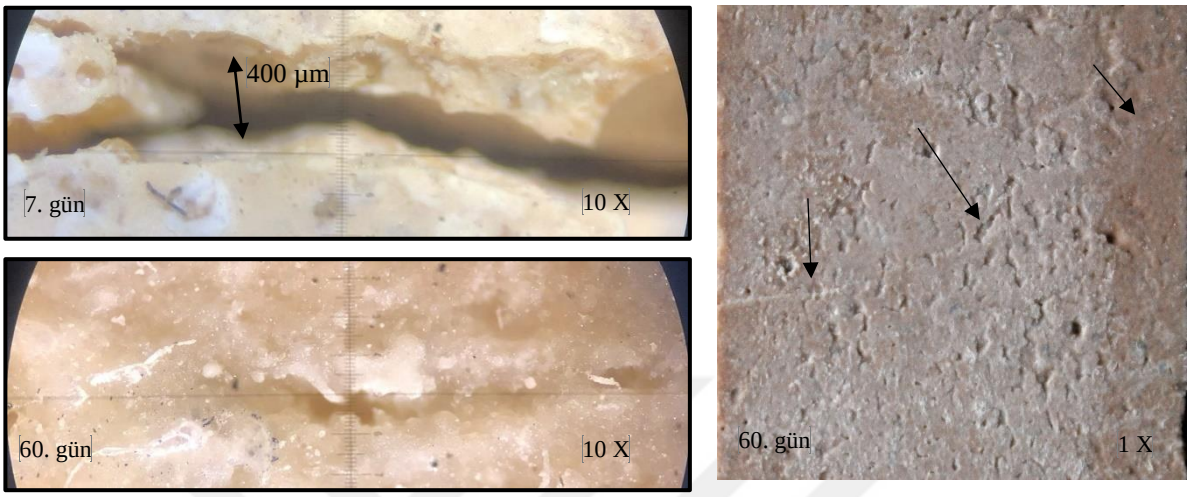
Şekil 4.17: M4-2 numunesinin besiyeri kürü öncesi ve sonrası optik ve fiziksel görünümü.

M4-3 numunesi üzerinde 7. günde 100 µm genişlikte çatlak oluşturulmuş ve besiyeri içerisinde 60. güne kadar kürlenmiştir. Sonuçta çatlak görsel olarak tamamen kapanmıştır (Şekil 4.18).



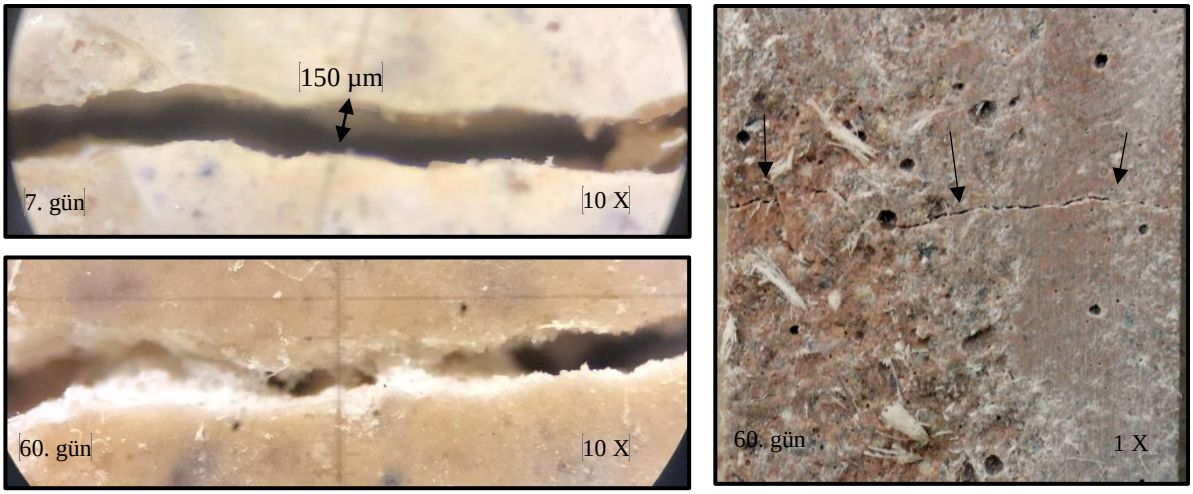
Şekil 4.18: M4-3 numunesinin besiyeri kürü öncesi ve sonrası optik ve fiziksel görünümü.

S12-1 numunesi üzerinde 7. günde 400 µm'ye varan genişlikte çatlak oluşturulmuş ve besiyeri içerisinde 60. güne kadar kürlenmiştir. Sonuçta çatlak görsel olarak yaklaşık %90 oranında kapanmıştır (Şekil 4.19).



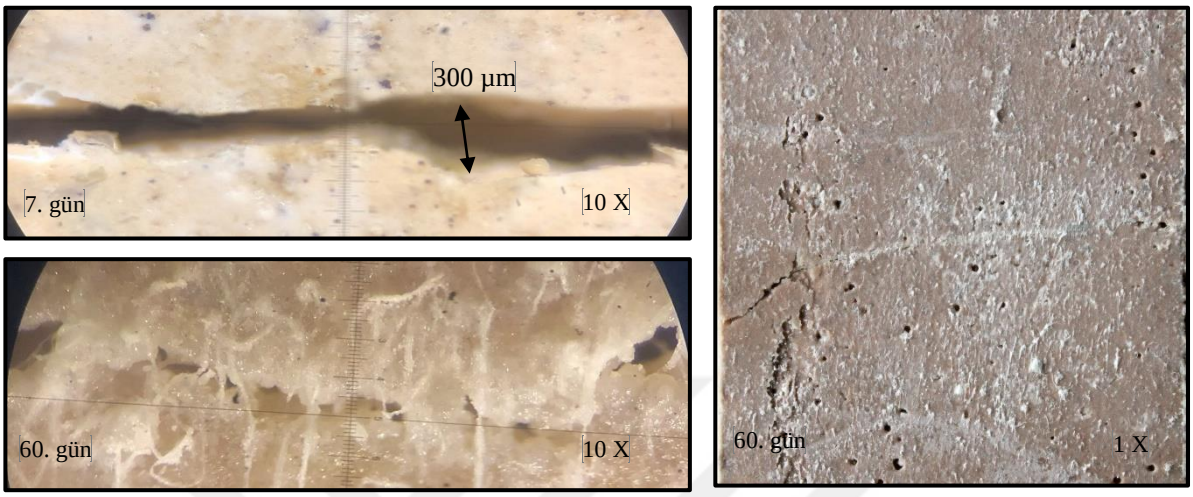
Şekil 4.19: S12-1 numunesinin besiyeri kürü öncesi ve sonrası optik ve fiziksel görünümü.

S12-2 numunesi üzerinde 7. günde 150 µm genişlikte çatlak oluşturulmuş ve kültür içerisinde 60. güne kadar kürlenmiştir. Sonuçta çatlak görsel olarak yaklaşık %30 oranında kapanmıştır (Şekil 4.20).



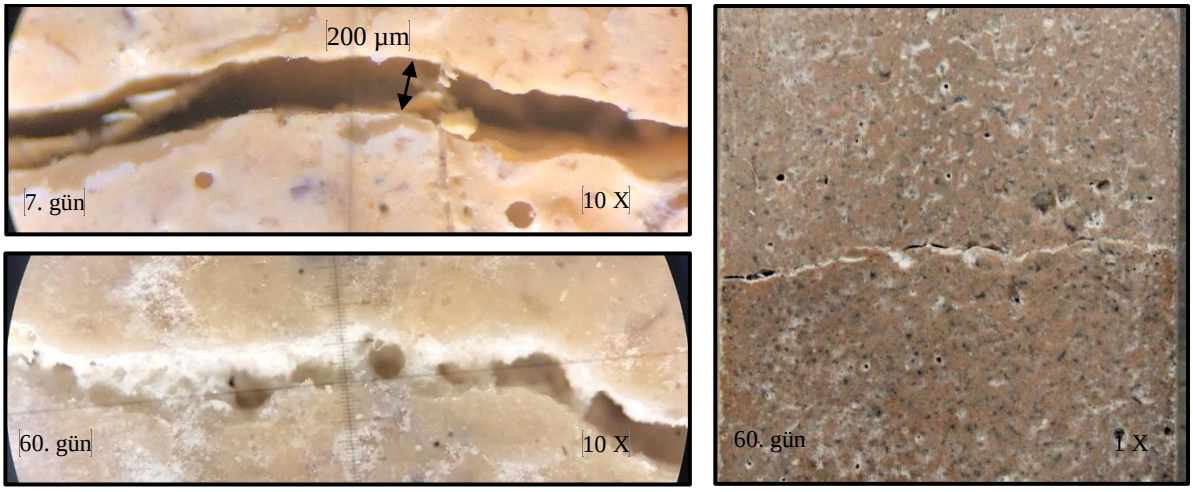
Şekil 4.20: S12-2 numunesinin kültür içerisinde kürlenme öncesi ve sonrası optik ve fiziksel görünümü.

S12-3 numunesi üzerinde 7. günde 300 µm'ye varan genişlikte çatlak oluşturulmuş ve besiyeri içerisinde 60. güne kadar kürlenmiştir. Sonuçta çatlak görsel olarak yaklaşık %80 oranında kapanmıştır (Şekil 4.21).



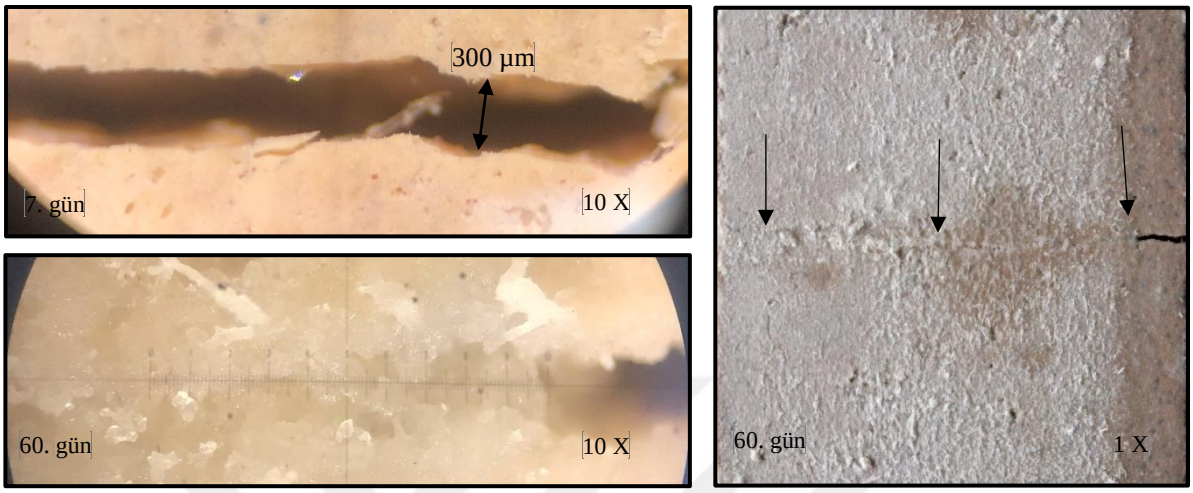
Şekil 4.21: S12-3 numunesinin besiyeri kürü öncesi ve sonrası optik ve fiziksel görünümü.

S8-1 numunesi üzerinde 7. günde 200 µm genişlikte çatlak oluşturulmuş ve kültür içerisinde 60. güne kadar kürlenmiştir. Sonuçta çatlak görsel olarak yaklaşık %30 oranında kapanmıştır (Şekil 4.22).



Şekil 4.22: S8-1 numunesinin kültür içerisinde kürlenme öncesi ve sonrası optik ve fiziksel görünümü.

S8-2 numunesi üzerinde 7. günde 300 µm'ye varan genişlikte çatlak oluşturulmuş ve besiyeri içerisinde 60. güne kadar kürlenmiştir. Sonuçta çatlak görsel olarak yaklaşık %80 oranında kapanmıştır (Şekil 4.23).



Şekil 4.23: S8-2 numunesinin besiyeri kürü öncesi ve sonrası optik ve fiziksel görünümü.

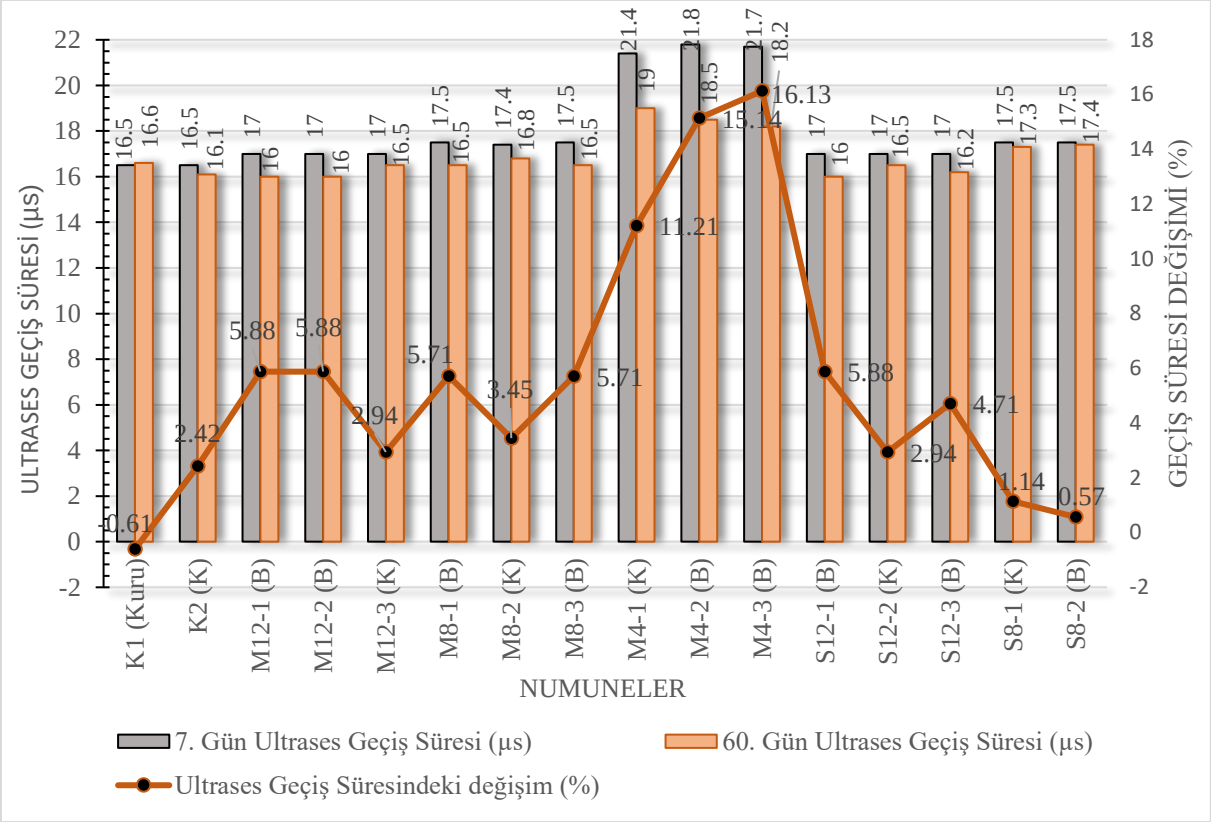
4.2.3 Ultrases Ölçüm Sonuçları

Numunelerin ultrases geçiş hızları haftalık periyotlarla ölçülmüş ve kayıt altına alınmıştır.

Tablo 4.6: Numunelerin kür öncesi ve sonrası ultrases geçiş hızı ölçüm değerleri.

NUMUNE KODU	7. Gün Ultrases Geçiş Süresi (µs)	60. GÜN Ultrases Geçiş Süresi (µs)	Ultrases Geçiş Süresindeki değişim (%)
K1 (Kuru)	16,5	16,6	-0,61
K2 (K)	16,5	16,1	2,42
M12-1 (B)	17	16	5,88
M12-2 (B)	17	16	5,88
M12-3 (K)	17	16,5	2,94
M8-1 (B)	17,5	16,5	5,71
M8-2 (K)	17,4	16,8	3,45
M8-3 (B)	17,5	16,5	5,71
M4-1 (K)	21,4	19	11,22
M4-2 (B)	21,8	18,5	15,14
M4-3 (B)	21,7	18,2	16,13
S12-1 (B)	17	16	5,88
S12-2 (K)	17	16,5	2,94
S12-3 (B)	17	16,2	4,71
S8-1 (K)	17,5	17,3	1,14
S8-2 (B)	17,5	17,4	0,57

Bu kayıtlardan 7. gün ve 60. gün ölçüm değerleri Tablo 6.6'da verilmiştir. Buna göre bakteri ile kürlenen tüm numunelerde ultrases geçiş hızı düşmüştür. Şekil 4.23'te de görüldüğü üzere kültür içerisinde iyileşmeye bırakılan numunelerin ultrases geçiş hızı değişim yüzdeleri besiyeri içerisinde kürlenen numunelere göre 2 kata kadar daha fazla geçiş hızına sahiptir.



Şekil 4.24: Numunelerin iyileştirme kürü öncesi ve sonrası ultrases geçiş süreleri değişimi.

Ayrıca Şekil 4.24'te görüldüğü üzere 12 mol ve 8 mol NaOH çözeltisi ile üretilen harçlar arasında ultrases geçiş hızları %5,88'e kadar azalırken 4 mol NaOH çözeltisi ile hazırlanan harçlardaki geçiş hızları değişimi %16,19'a kadar ulaşmıştır. Ayrıca bakteri ilave edilmeden hazırlanarak dışarıdan bakteri kültürü ile kürlenen kontrol harcının (K2) ultrases geçiş hızı, kuru olarak ortam ısısına bırakılan kontrol harcının (K1) ultrases geçiş hızından %3,03 daha azdır.

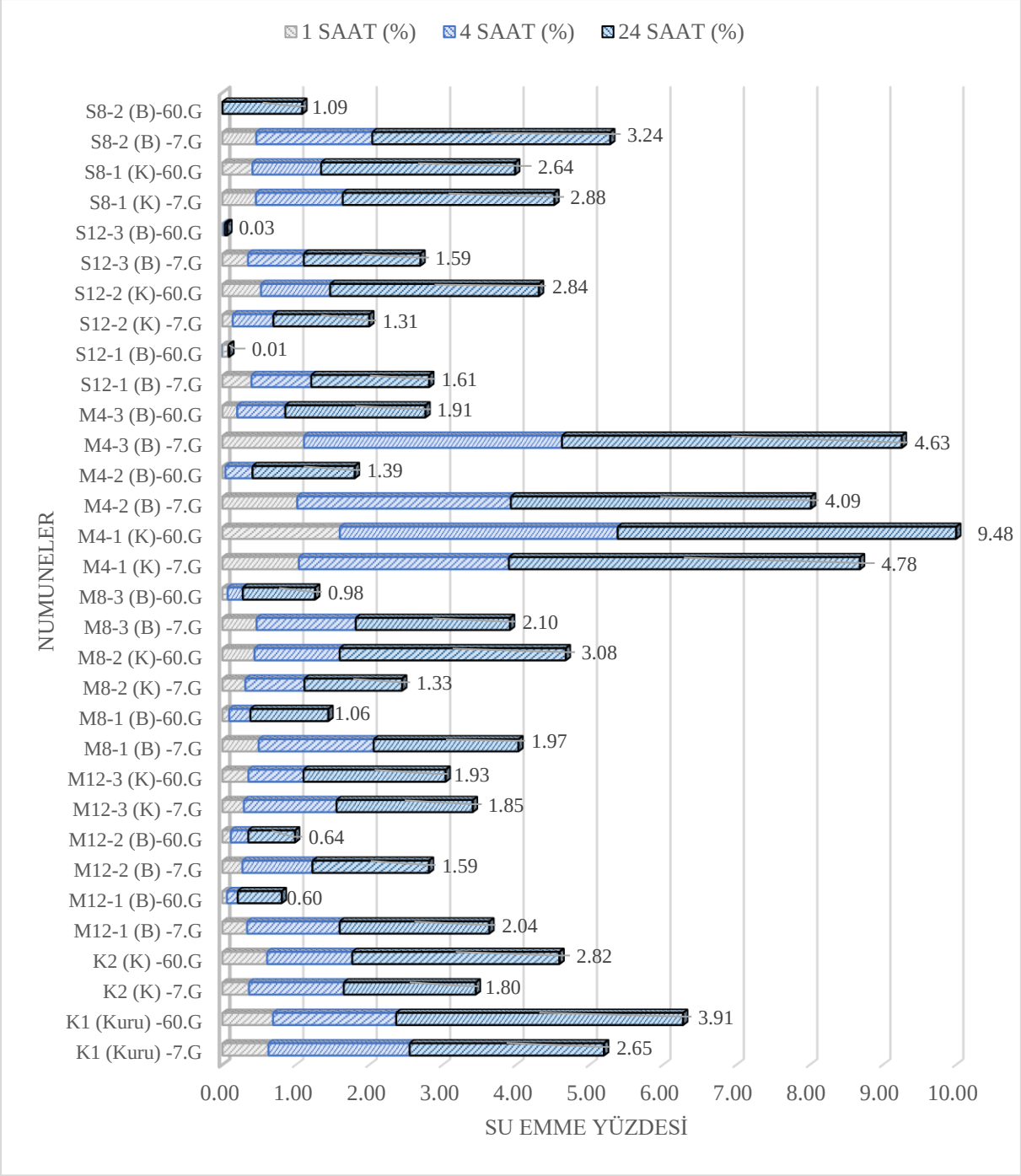
4.2.4 Kılcal Geçirimlilik Deneyi Sonuçları

Numunelerin 7. günde kür öncesi kılcal su geçirimliliği miktarları ile 60. gün iyileştirme kürü sonrası ölçülen miktarları Tablo 6.7'de verilmiştir. Numunelerde kür ortamına bağlı olarak değişen ağırlık değişimleri su emme oranlarına da yansımıştır.

Tablo 4.7: Numunelerin 7. gün kür öncesi ve 60. gün kür sonrası kılcal su geçirimlilik miktarları.

	7. GÜN				60. GÜN			
NUMUNE KODU	KURU AGIRLIK (g)	1 SAAT (%)	4 SAAT (%)	24 SAAT (%)	KURU AGIRLIK (g)	1 SAAT (%)	4 SAAT (%)	24 SAAT (%)
K1 (Kuru)	510,94	0,63	1,92	2,65	493,04	0,69	1,68	3,91
K2 (K)	521,39	0,36	1,29	1,80	500,24	0,61	1,16	2,82
M12-1 (B)	492,79	0,33	1,26	2,04	511,04	0,06	0,15	0,60
M12-2 (B)	502,37	0,27	0,95	1,59	520,98	0,11	0,24	0,64
M12-3 (K)	502,11	0,29	1,26	1,85	496,22	0,35	0,75	1,93
M8-1 (B)	499,19	0,49	1,57	1,97	515,52	0,09	0,29	1,06
M8-2 (K)	496,09	0,31	0,80	1,33	474,99	0,44	1,16	3,08
M8-3 (B)	488,72	0,46	1,35	2,10	511,04	0,07	0,21	0,98
M4-1 (K)	484,60	1,04	2,86	4,78	451,17	1,60	3,78	9,48
M4-2 (B)	487,16	1,02	2,91	4,09	501,95	0,04	0,37	1,39
M4-3 (B)	481,28	1,11	3,51	4,63	498,05	0,20	0,65	1,91
S12-1 (B)	498,94	0,39	0,81	1,61	523,54	0,08	0,00	0,01
S12-2 (K)	502,40	0,14	0,55	1,31	488,38	0,52	0,94	2,84
S12-3 (B)	509,57	0,35	0,76	1,59	533,17	0,02	0,02	0,03
S8-1 (K)	502,59	0,46	1,18	2,88	487,94	0,41	0,93	2,64
S8-2 (B)	487,76	0,46	1,58	3,24	514,01	0,09	0,24	1,09

Numunelerin kılcal su geçirimliliklerine gelindiğinde, kontrol harçlarında 7. gün ve 60. gün arasındaki su emme yüzdelerinde yaklaşık %1 oranında artış görülmüştür. Kültür içerisinde iyileşmeye bırakılan harçların su emme yüzdelerinde ise 2,5 kata kadar artış meydana gelmiştir. Bu durumun aksine, besiyerinde iyileştirilen numunelerin su emme yüzdelerinde yüksek oranda azalma görülmüştür (Şekil 4.25).



Şekil 4.25: Numunelerin kür öncesi ve sonrası kılcal su emme yüzdeleri.

4.2.5 Basınç ve Eğilme Dayanımları

Numunelerin basınç dayanımları 7. gün iyileştirme kürü öncesi ve 60. gün iyileştirme kürü sonrası olmak üzere iki ayrı zamanda ölçülmüştür. Eğilme dayanımları ise 7. günde (oluşturulan çatlak sonrası) tüm numuneler için 1 MPa ve altına düşmüştür. Ancak 60. günde (iyileştirilme sonrası) yeniden 3 noktalı eğilme deneyine tabi tutulmuş ve sonuçları Tablo 6.8'de verilmiştir.

Ancak çatlak derinliği ve genişlikleri sabit olmadığından tablodaki eğilme dayanımlarının tamamının bakteriyel iyileştirmeden kaynaklandığını söylemek pek mümkün değildir.

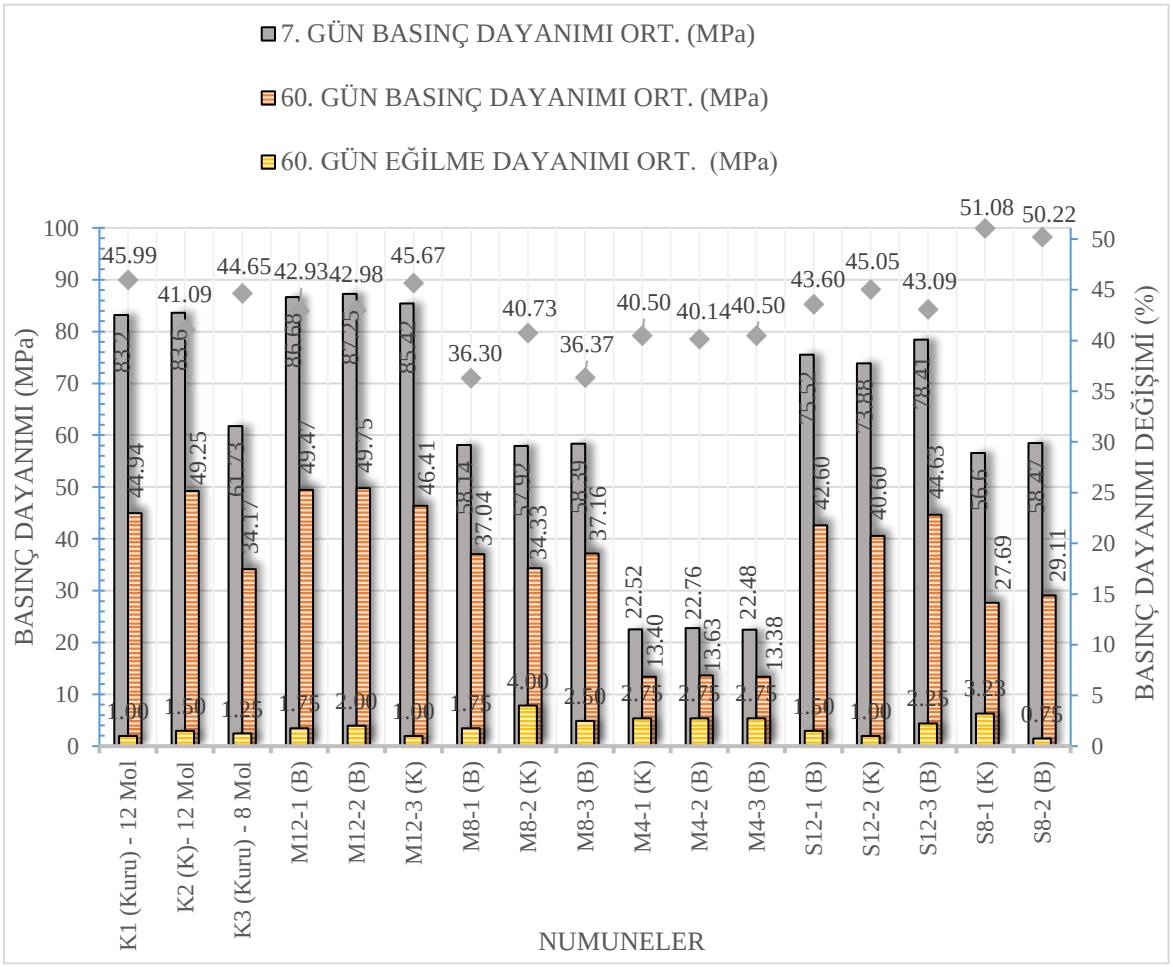
Tablo 4.8: Numunelerin 7. gün ve 60. gün basınç değerleri ve 60. gün eğilme değerleri.

NUMUNE KODU	7. GÜN BASINÇ DAYANIMI ORT. (MPa)	60. GÜN BASINÇ DAYANIMI ORT. (MPa)	7. ve 60. GÜN ARASINDAKİ BASINÇ DAYANIMI DEĞİŞİMİ (%)	60. GÜN EĞİLME DAYANIMI ORT. (MPa)
K1 (Kuru) - 12	83,2	44,94	45,99	1,00
K2 (K)- 12 Mol	83,6	49,25	41,09	1,50
K3 (Kuru) - 8	61,73	34,17	44,65	1,25
M12-1 (B)	86,68	49,47	42,93	1,75
M12-2 (B)	87,25	49,75	42,98	2,00
M12-3 (K)	85,42	46,41	45,67	1,00
M8-1 (B)	58,14	37,04	36,30	1,75
M8-2 (K)	57,92	34,33	40,73	4,00
M8-3 (B)	58,39	37,16	36,37	2,50
M4-1 (K)	22,52	13,40	40,50	2,75
M4-2 (B)	22,76	13,63	40,14	2,75
M4-3 (B)	22,48	13,38	40,50	2,75
S12-1 (B)	75,52	42,60	43,60	1,50
S12-2 (K)	73,88	40,60	45,05	1,00
S12-3 (B)	78,41	44,63	43,09	2,25
S8-1 (K)	56,6	27,69	51,08	3,23
S8-2 (B)	58,47	29,11	50,22	0,75

Tez kapsamında hazırlanan geopolimer harçlardan sıcak kür uygulanan numuneler sıcaklık etkisiyle ani dayanım kazanmaktadır. Böylece 28 günde maksimum dayanımına erişmekte ancak 28. günden sonra basınç dayanımı değerlerinde yaklaşık 90. güne kadar düşüş yaşanmaktadır. 90. günden sonra sabit dayanım değerine eriştiği görülmektedir. Bu durumda çimento esaslı harçlar için standart kabul edilen 28 günlük basınç dayanımı değeri geopolimer harçlar için 90. günde elde edilmektedir. Bu çalışma için 7. günden sonra iyileştirilmeye başlanan numunelerde bir yandan iç hidratasyon sürecinden kaynaklanan basınç dayanımı değişimi yaşanırken diğer yandan iyileştirmeden kaynaklı basınç değişimi meydana

gelmektedir. Etkileşimli ve eş zamanlı olarak gerçekleşen bu iki durum için net sınırlar belirlemek güçtür. Ancak numunelerde bakteriyel iyileştirmeden kaynaklı bir dayanım kaybı olmadığı görülmektedir.

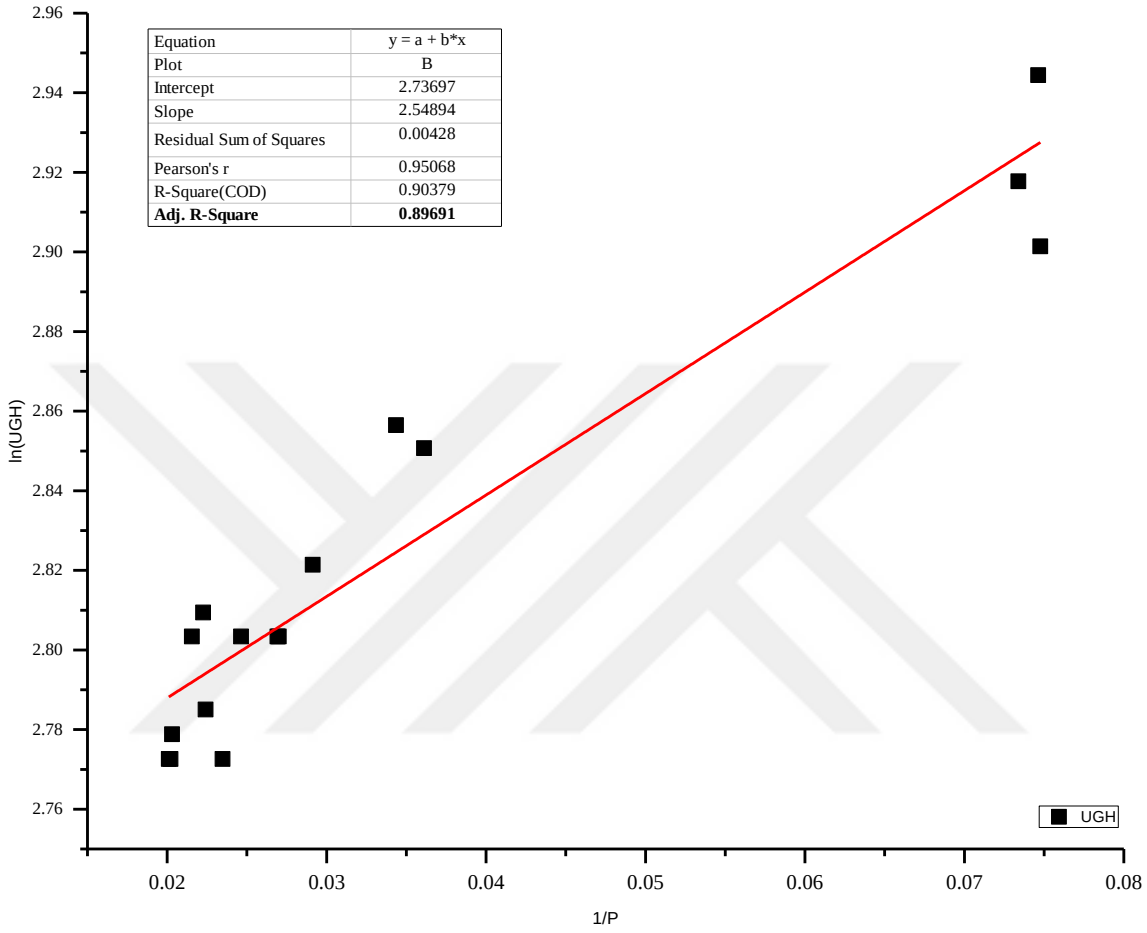
Kültür içerisinde iyileştirme kürü uygulanan numunelerde boşluk miktarı artmaktadır. Ancak bu numunelerde de 7. ve 60. gün basınç dayanımları kontrol numunesi ile karşılaştırıldığında daha yüksektir. Sonuç olarak numunelerde bakteriyel iyileşmeden kaynaklı bir dayanım kaybının olmadığı, hatta %5'e varan oranlarda dayanım kazanmış olabileceği öngörülmektedir.



Şekil 4.26: Numunelerin 7. ve 60. gün basınç dayanımları, basınç dayanımı değişimleri ve eğilme dayanımları.

Çalışmanın sonuçları arasındaki uygunluk oranını tespit edebilmek için numunelerin iyileştirme kürü sonrası ultrases geçiş hızı ve basınç dayanımı arasında korelasyon faktörü hesaplanmıştır. R değeri, korelasyon faktörü değerini göstermektedir. Burada bulunan korelasyon değerinin 0,80'den büyük olması literatürdeki önceki çalışmalarla karşılaştırıldığında uygunluk oranının kabul edilebilir olduğunu göstermektedir. Şekil 4.27'deki basınç dayanımı ve UGH arasındaki

korelasyon faktörü grafiği incelendiğinde R=0,89 değeriyle birlikte basınç dayanımı arttıkça UGH'nin de arttığı, basınç dayanımı ve UGH arasında pozitif yönlü güçlü bir ilişki olduğu görülmektedir.



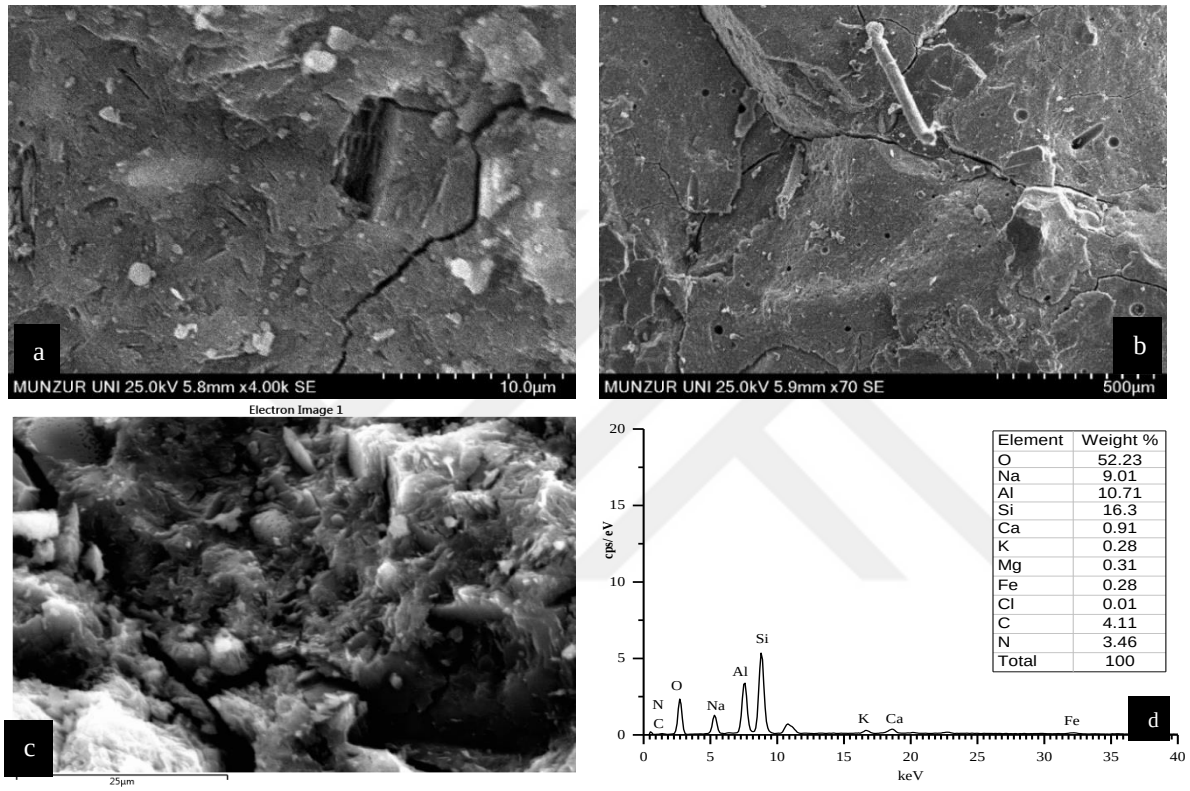
Şekil 4.27: Ultrases geçiş hızı- Basınç Dayanımı korelasyonu.

4.2.6 SEM Görüntüleri ve EDS Analizleri

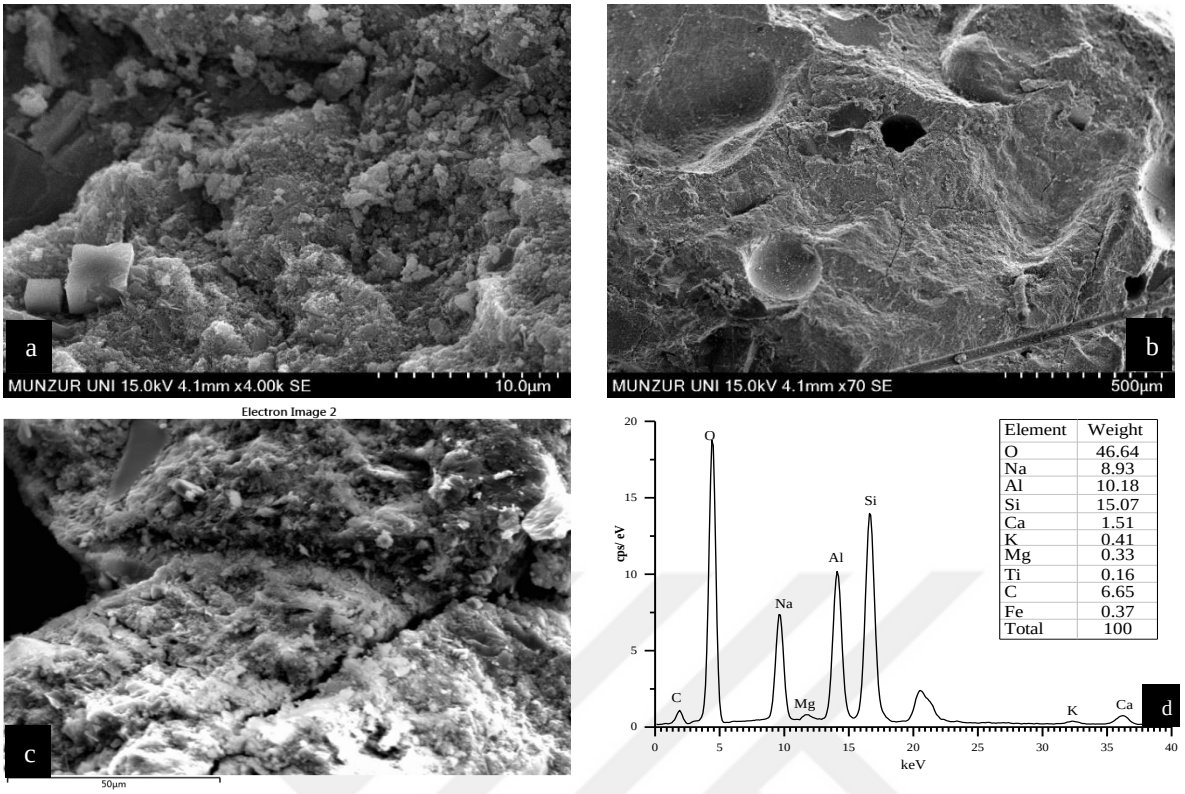
Bu tezde üretilen geopolimer harçların 7. gün kür öncesi ve 60. gün kür sonrası mikroyapısı SEM analizi ile incelenerek değişen aktivatör oranının ve bakteriyel iyileşmenin harç üzerine etkisi gözlemlenmiştir. Tüm numumuneler için alınan SEM mikrografları ve ilgili EDS spektroskopileri Şekil 4.28 ve 4.49 arasında gösterilmektedir.

Kontrol numunesinin 7. gün mikrografında (Şekil 4.28 a ve b), geopolimer matrisin iyi bir homojenlik derecesinde olduğu, kütlesel kalsit yapıları ve reaksiyona girmemiş metakaolin taneleri görülmektedir. Kontrol numunesinin ortam ısında iyileştirme yapılmadan bırakılan 60. gün numunesinin (K-1) mikrografları Şekil 4.29 a ve b'de görülmektedir. Bu görüntülerde

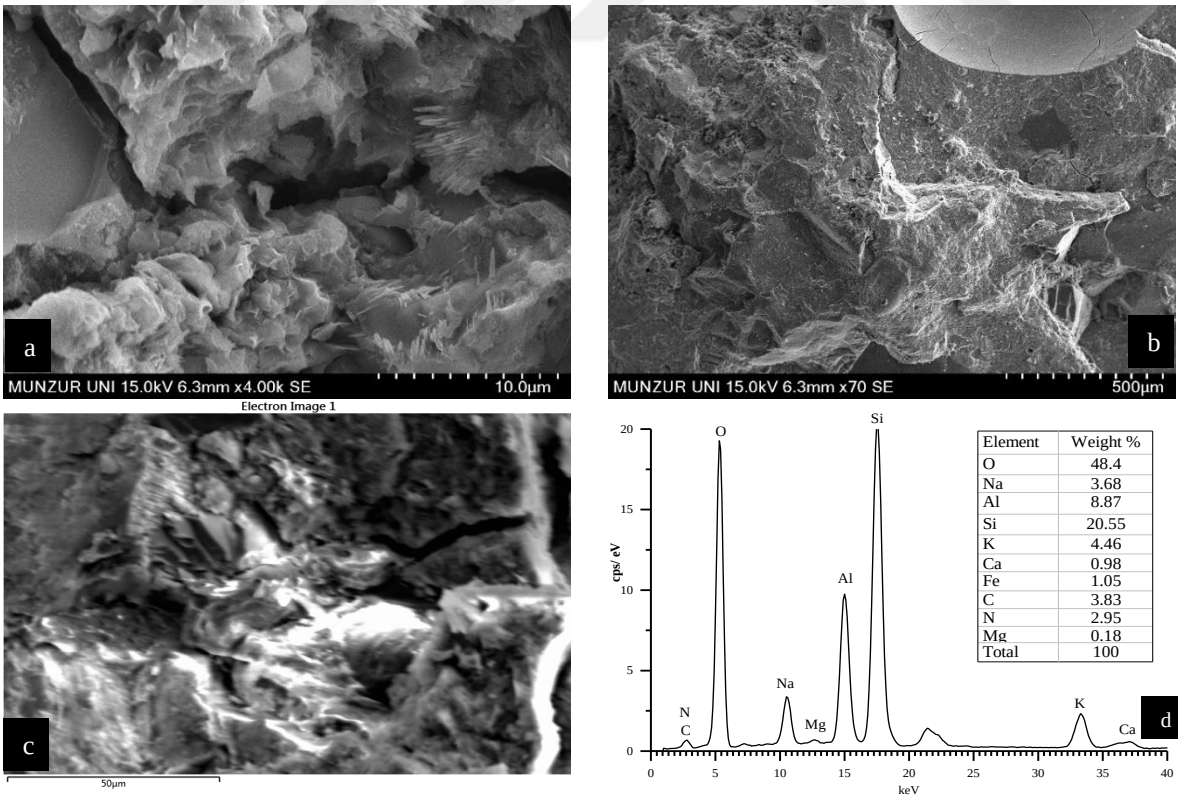
kalsit yapılarındaki yumuşama açıkça görülmektedir. Kontrol numunesinin bakteri kültürü içerisinde iyileşmeye bırakılan (K2) numunelerinin Şekil 4.30 a ve b verilen mikrografında kalsit kristallerinin yanısıra, vaterit ve aragonit kristalleri açıkça görülmektedir. K1 numunesinde izlenmeyen bu yapıların kültür içerisinde iyileştirmeye bırakılan K-2 numunesinde izlenmesi bu kalsit formlarının bakteriyel ajan tarafından oluşturulmuş olduğunu göstermektedir.



Şekil 4.28: a) Kontrol (K) numunesi 7. gün 4000X SEM görüntüsü b) 70 X SEM görüntüsü c) EDS görüntüleme alanı d) EDS analizi.

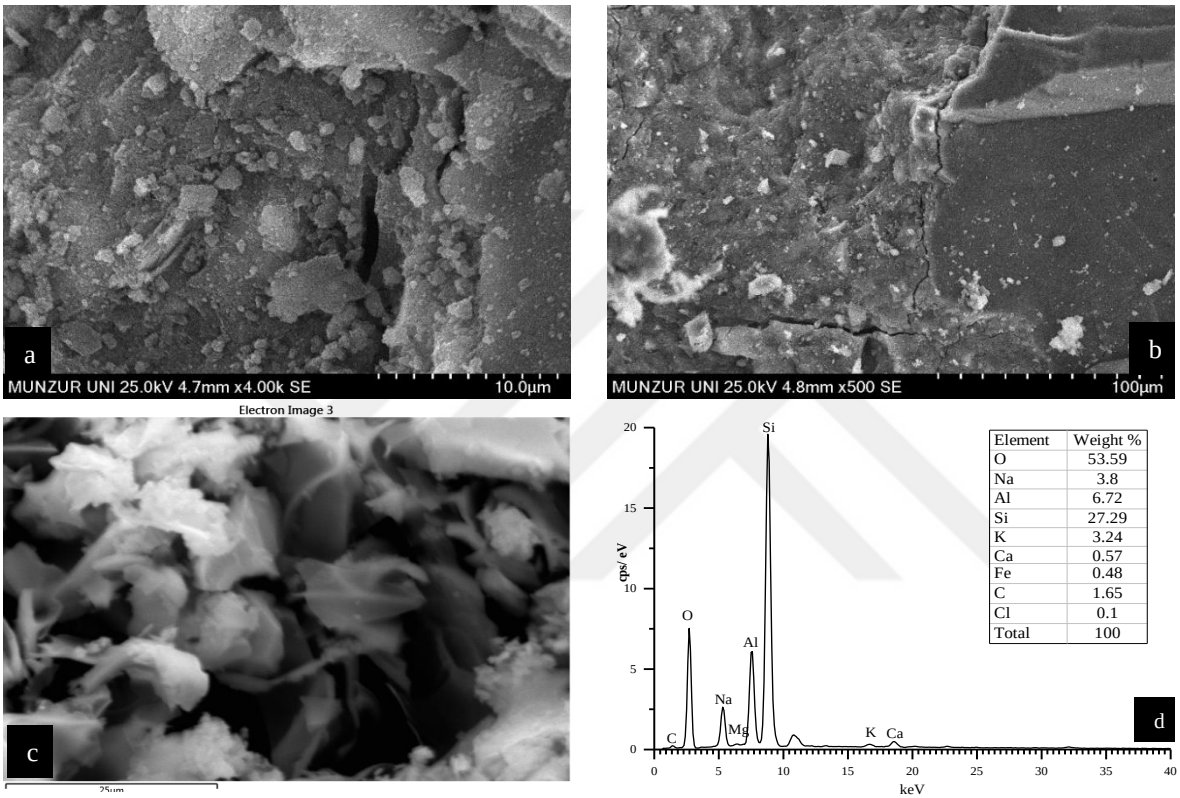


Şekil 4.29: a) 60 gün kuru ortamda iyileştirme yapılmadan bırakılmış kontrol numunesinin (K-1) 4000X SEM görüntüsü b) 70 X SEM görüntüsü c) EDS görüntüleme alanı d) EDS analizi.

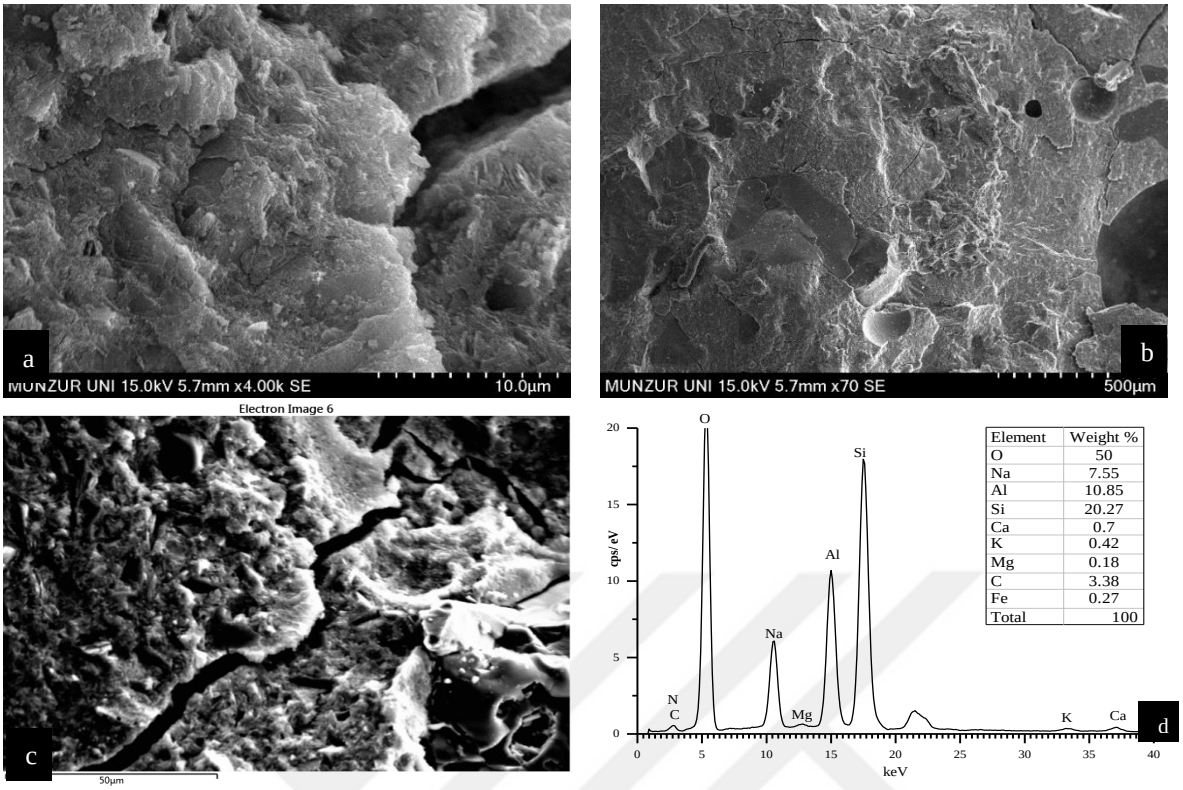


Şekil 4.30: a) 60 gün kültürde iyileştirilmiş kontrol numunesinin (K-2) 4000X SEM görüntüsü b) 70 X SEM görüntüsü c) EDS görüntüleme alanı d) EDS analizi.

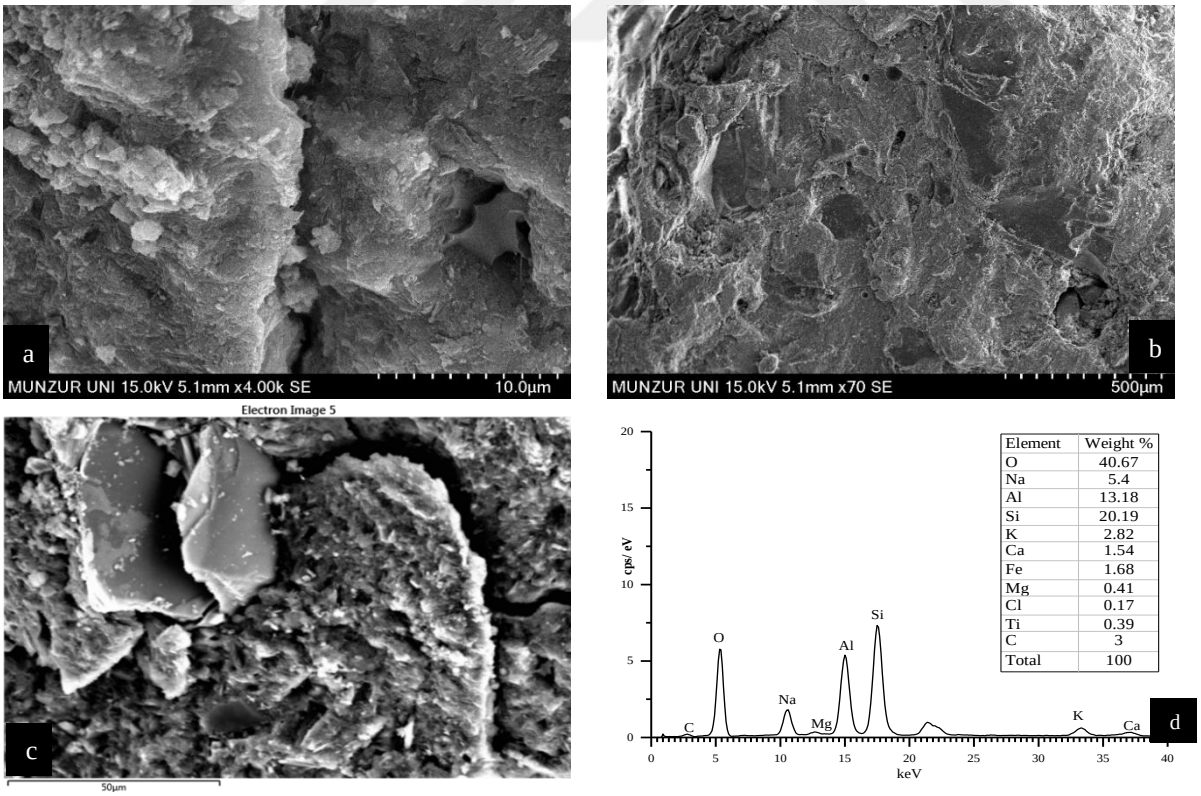
M12 numune grubunun 7. gün görüntülemelerinde (Şekil 4.31 a ve b) sert kalsit yapıları ile birlikte hidrate olmamış metakaolin ve cüruf taneleri ile spor formdaki bakteri yapıları görülmektedir. Şekil 4.32 a ve b, 4.33 a ve b, 4.34 a ve b'de ise M12 numunesinin bakteriyel iyileşme sonrası görüntülemeleri mevcuttur. Bu örneklerde kalsit yapılarının yanısıra bol miktardaki vaterit yapısı ve C-S-H jeli de izlenmektedir. Vaterit kristallerinin kalsitin sıcaklıktan etkilenen kararsız bir formu olarak harç içerisinde yer alması olağandır.



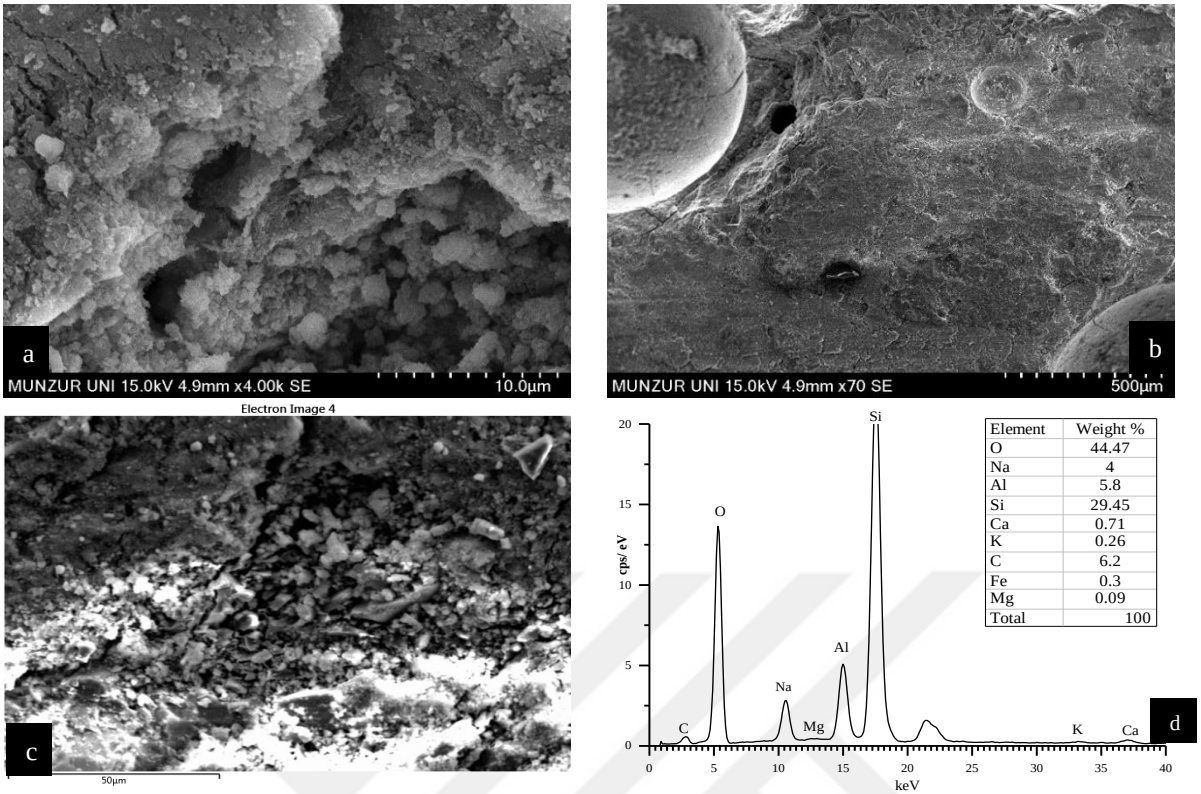
Şekil 4.31: a) M12 numunesi 7. gün 4000X SEM görüntüsü b) 70 X SEM görüntüsü c) EDS görüntüleme alanı d) EDS analizi.



Şekil 4.32: a) 60 gün besiyerinde iyileştirilmiş M12-1 numunesi 4000X SEM görüntüsü b) 70 X SEM görüntüsü c) EDS görüntüleme alanı d) EDS analizi.

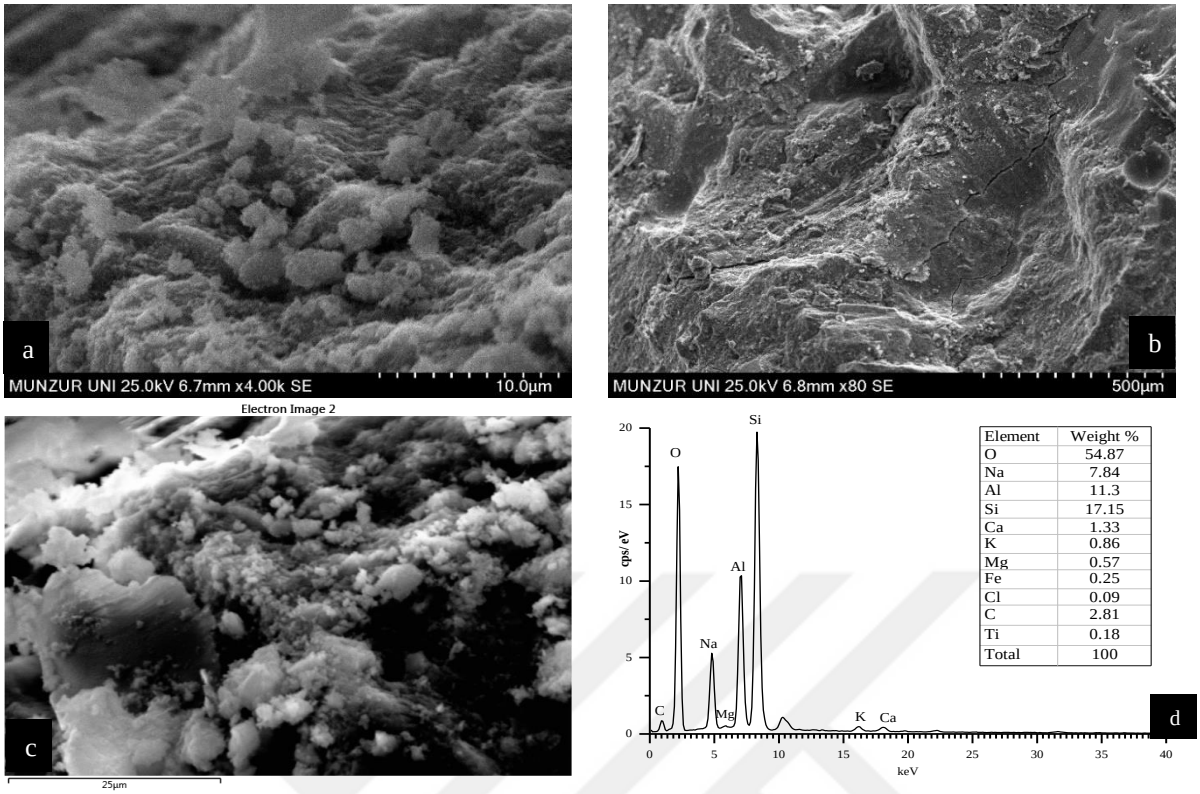


Şekil 4.33: a) 60 gün besiyerinde iyileştirilmiş M12-2 numunesi 4000X SEM görüntüsü b) 70 X SEM görüntüsü c) EDS görüntüleme alanı d) EDS analizi.

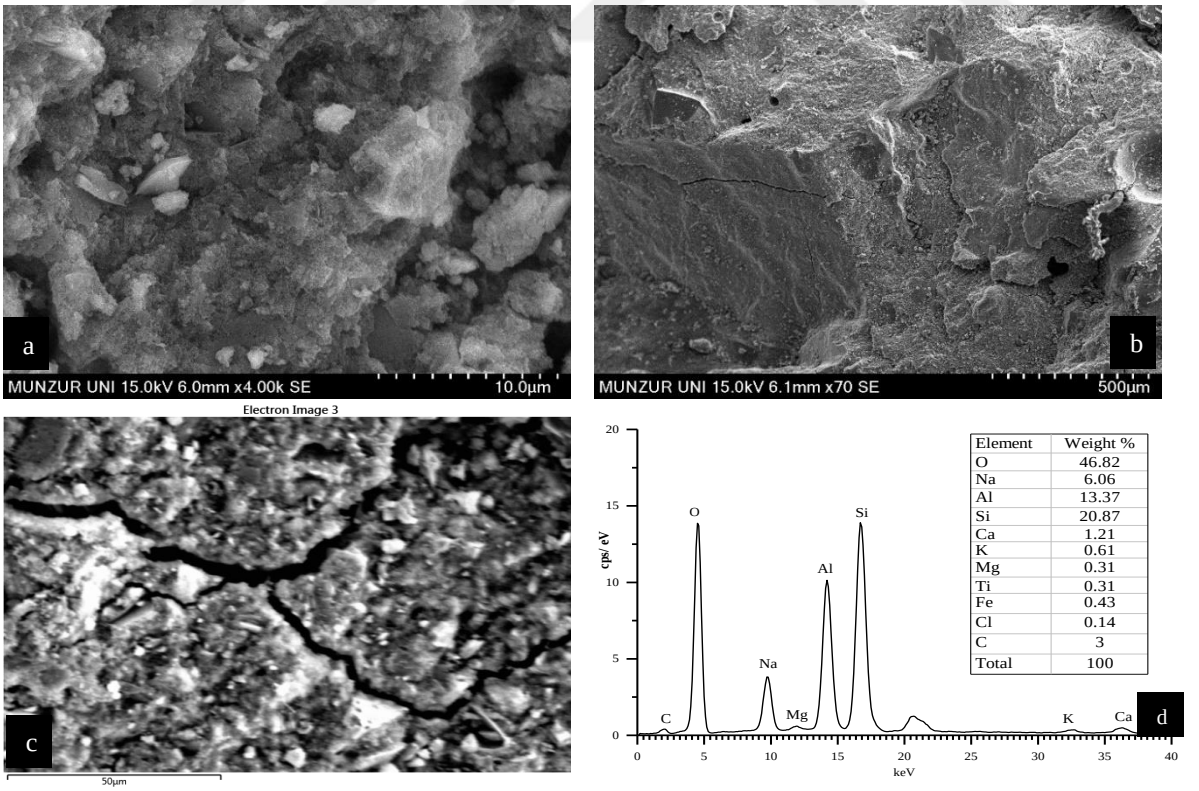


Şekil 4.34: a) 60 gün bakteri kültüründe iyileştirilmiş M12-3 numunesi 4000X SEM görüntüsü b) 70 X SEM görüntüsü c) EDS görüntüleme alanı d) EDS analizi.

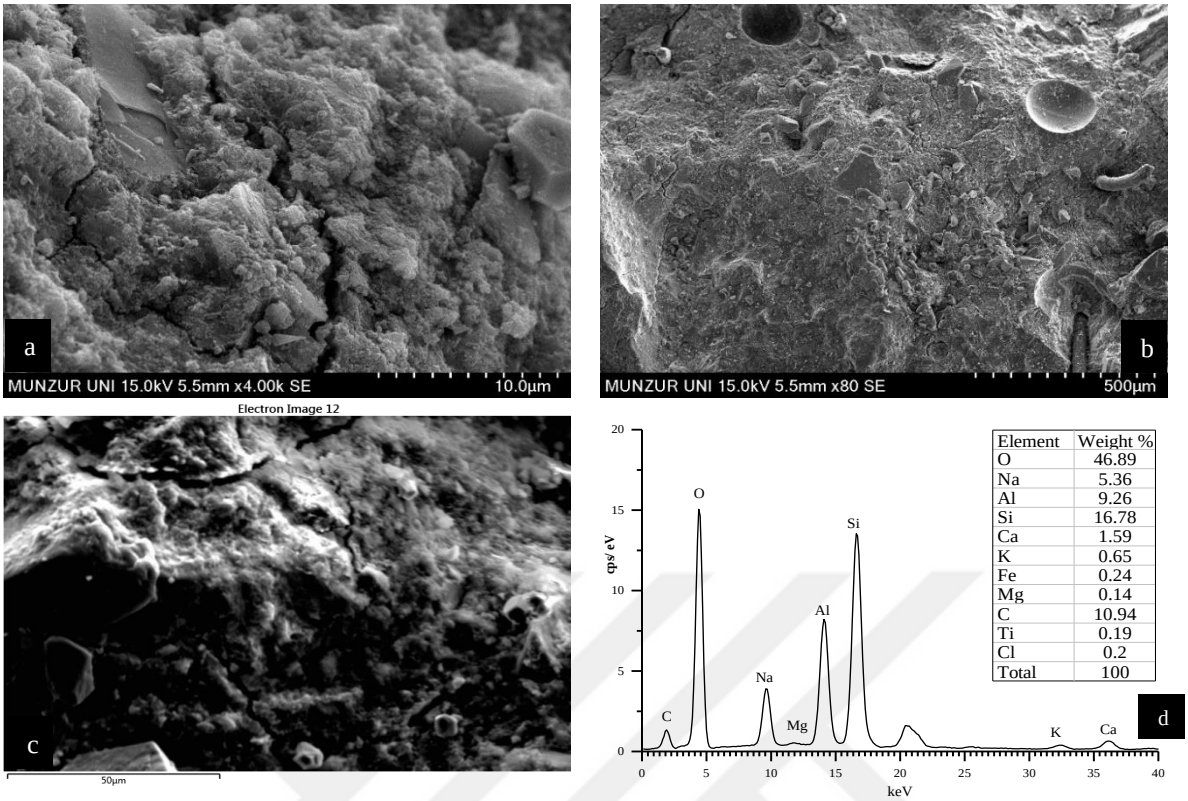
M8 numune grubunun 7. gün görüntülemelerinde (Şekil 4.35 a ve b) M12 numunesine kıyasla daha zayıf bağlanmış kalsit yapıları ve daha fazla miktarda bakteri sporları görülmektedir. Aynı numunenin 60. gün görüntülemelerinde ise (Şekil 4.36 a ve b, 4.37 a ve b, 4.38 a ve b) aynı serinin 7. gün görüntülerine göre daha fazla C-S-H jeli ve reaksiyon ürünü görülmektedir.



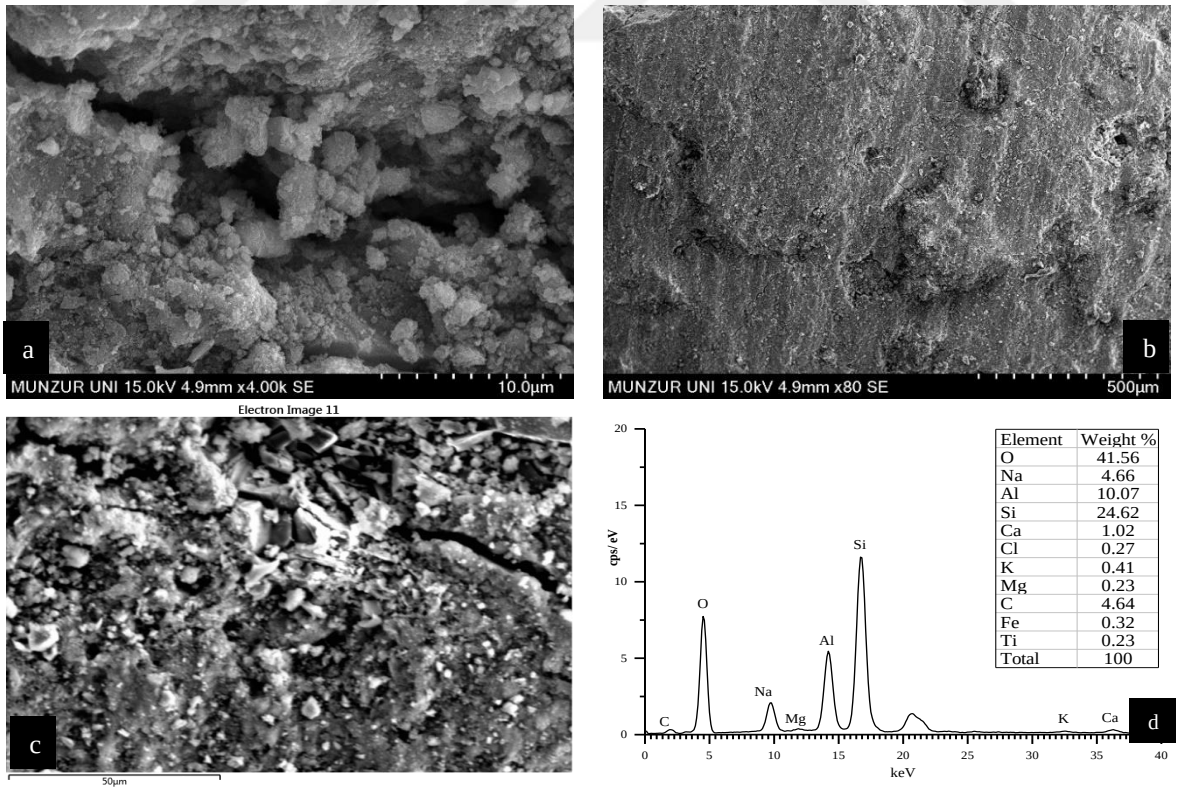
Şekil 4.35: a) M8 numunesi 7. gün 4000X SEM görüntüsü b) 70 X SEM görüntüsü c) EDS görüntüleme alanı d) EDS analizi.



Şekil 4.36 a) 60 gün besiyerinde iyileştirilmiş M8-1 numunesi 4000X SEM görüntüsü b) 70 X SEM görüntüsü c) EDS görüntüleme alanı d) EDS analizi.

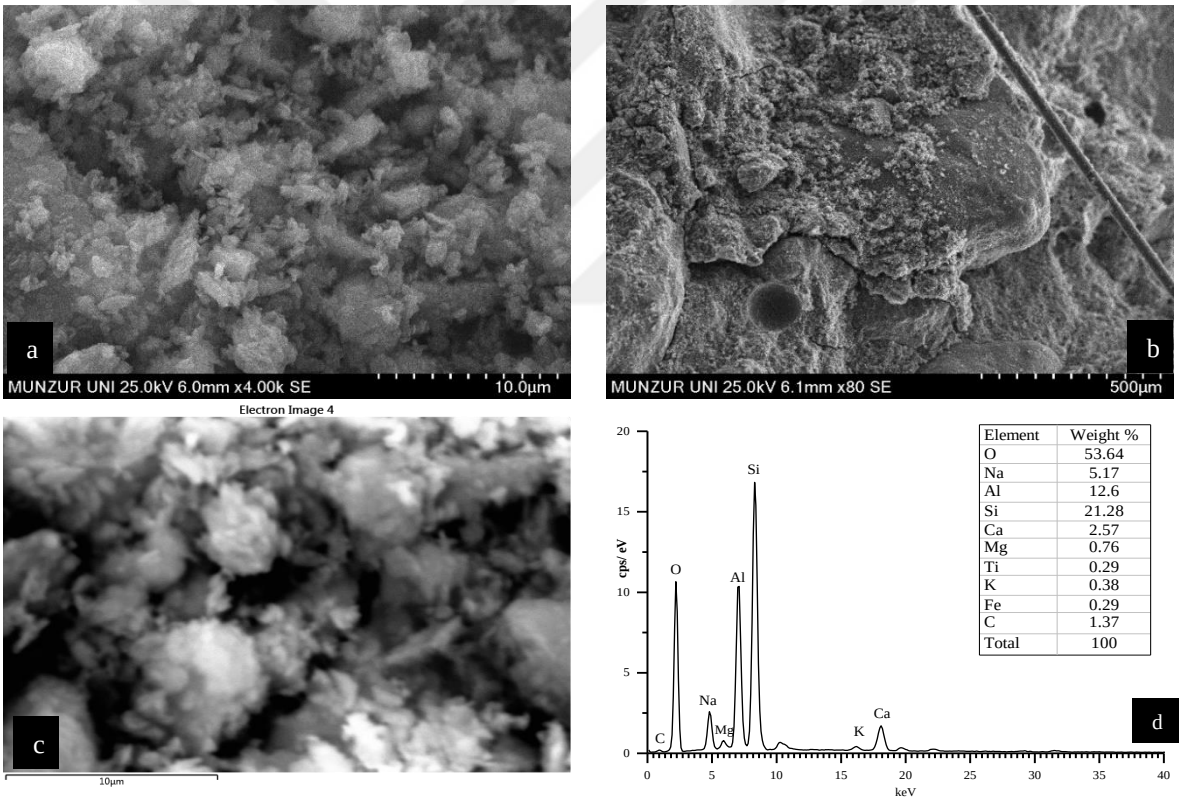


Şekil 4.37: a) 60 gün kültürde iyileştirilmiş M8-2 numunesi 4000X SEM görüntüsü b) 70 X SEM görüntüsü c) EDS görüntüleme alanı d) EDS analizi.

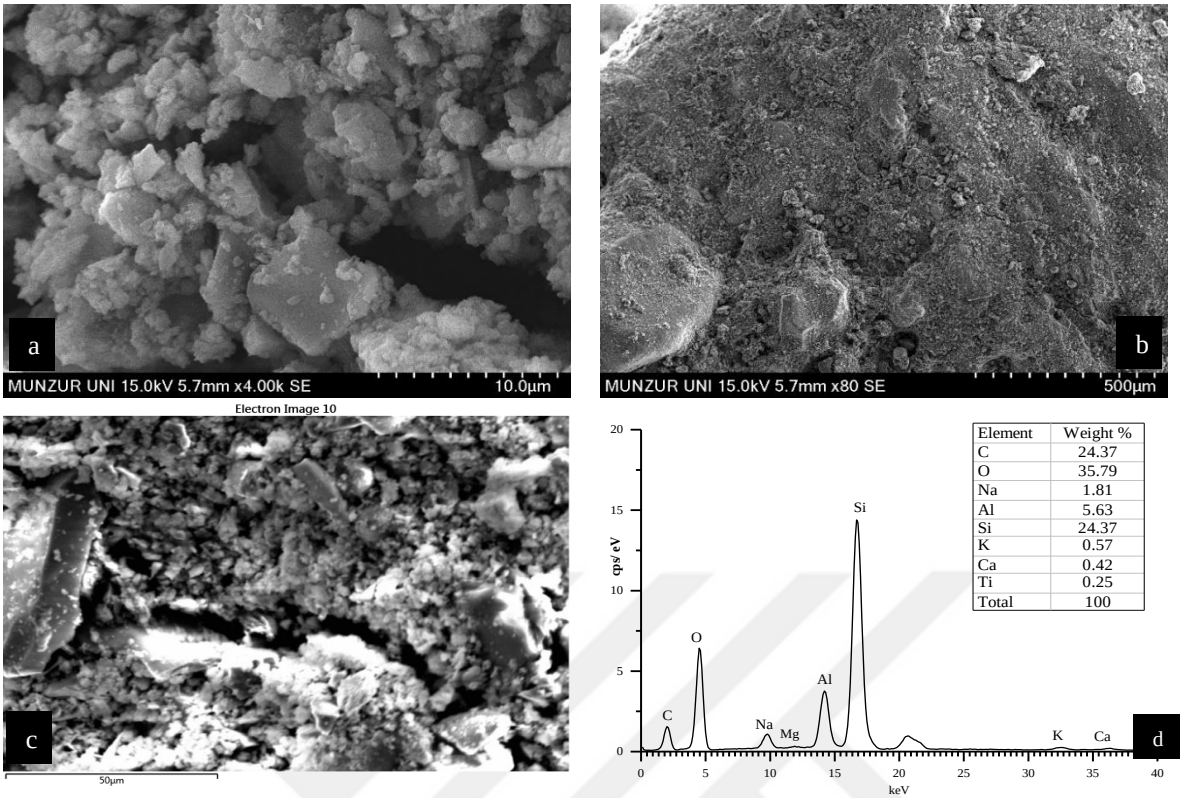


Şekil 4.38: a) 60 gün besiyerinde iyileştirilmiş M8-3 numunesi 4000X SEM görüntüsü b) 70 X SEM görüntüsü c) EDS görüntüleme alanı d) EDS analizi.

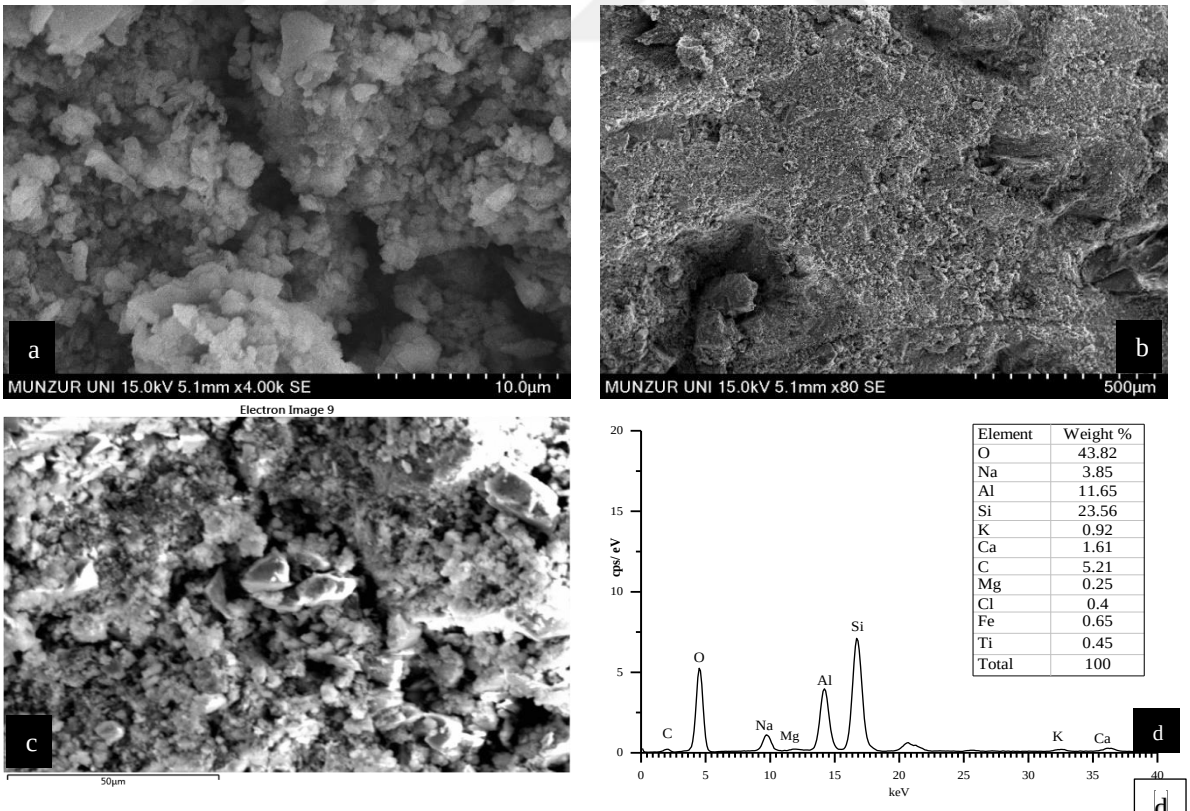
M4 numune grubunun 7. gün mikrografı incelendiğinde (Şekil 4.39 a ve b), 12 mol NaOH ile hazırlanmış serilere göre en düşük kütlesel kalsit yapısının ve en yüksek bakteri spor yoğunluğunun bu numune grubunda olduğu görülmektedir. Ayrıca bu grubun numune mikroyapısında bol miktarda hidrate olmamış metakaolin ve cüruf taneciği ile C-S-H jeli ve $Ca(OH)_2$ yapısı görülmektedir. Bu durum tamamlanmamış reaksiyonlara işaret etmektedir. Şekil 4.40 a ve b'de kültür içerisinde iyileştirilen M4-1 numunesinin mikrografı görülmektedir. Bu numune besiyerinde iyileştirme kürüne tabi tutulan M4-2 ve M4-3 numunelerine göre (Şekil 4.41 a ve b, 4.42 a ve b) daha fazla boşluk miktarı ve daha az bakteriyel spor içermektedir. Ayrıca besiyerinde iyileştirilen bu grubun mikroyapısında kristal çaplarının kültür içerisinde iyileştirilen numuneye göre daha büyük olduğu ve tanecikler arası $CaCO_3$ köprüleri oluştuğu görülmektedir.



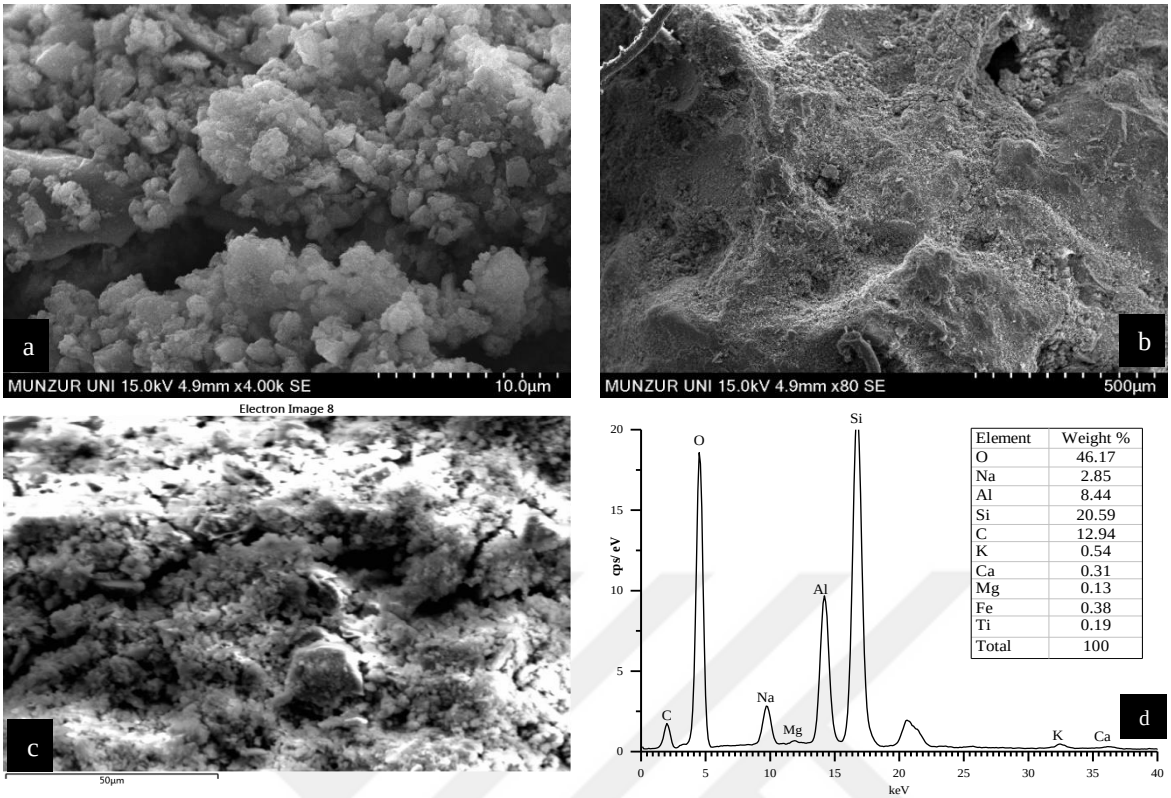
Şekil 4.39: a) M4 numunesi 7. gün 4000X SEM görüntüsü b) 70 X SEM görüntüsü c) EDS görüntüleme alanı d) EDS analizi.



Şekil 4.40: a) 60 gün bakteri kültüründe iyileştirilmiş M4-1 numunesi 4000X SEM görüntüsü b) 70 X SEM görüntüsü c) EDS görüntüleme alanı d) EDS analizi.

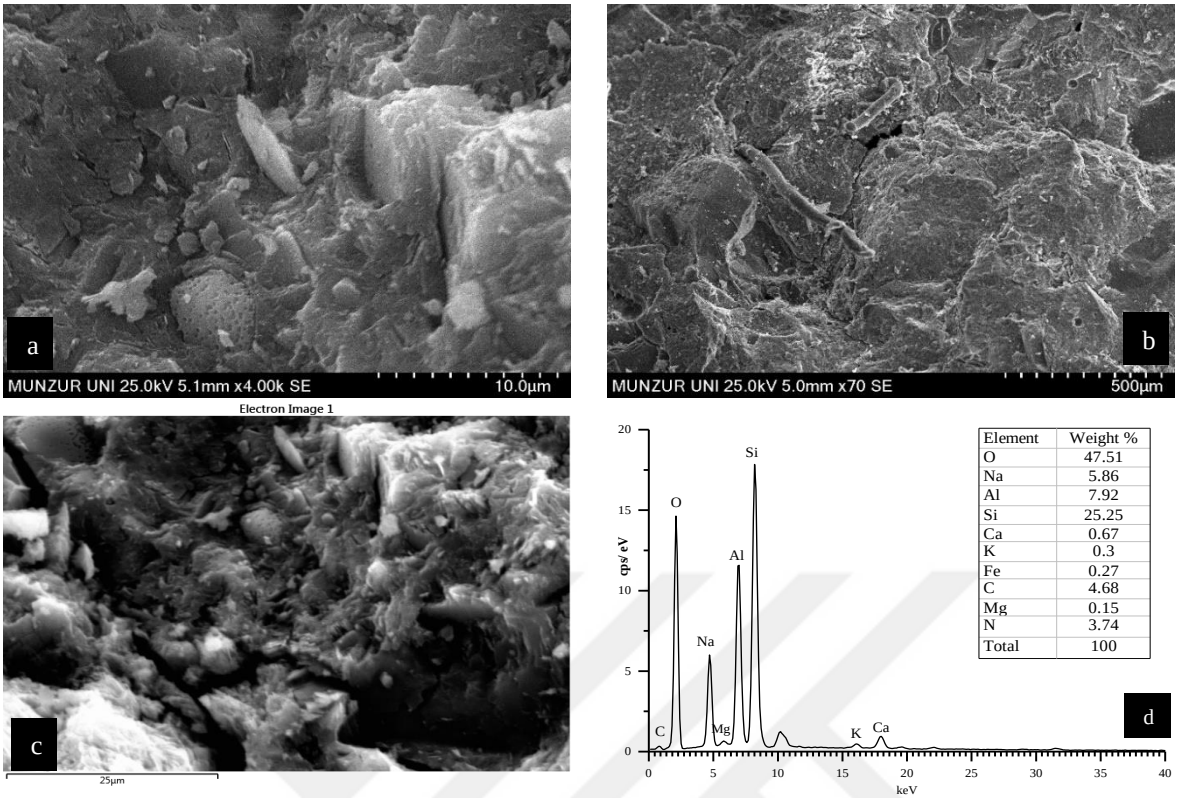


Şekil 4.41: a) 60 gün besiyerinde iyileştirilmiş M4-2 numunesi 4000X SEM görüntüsü b) 70 X SEM görüntüsü c) EDS görüntüleme alanı d) EDS analizi.

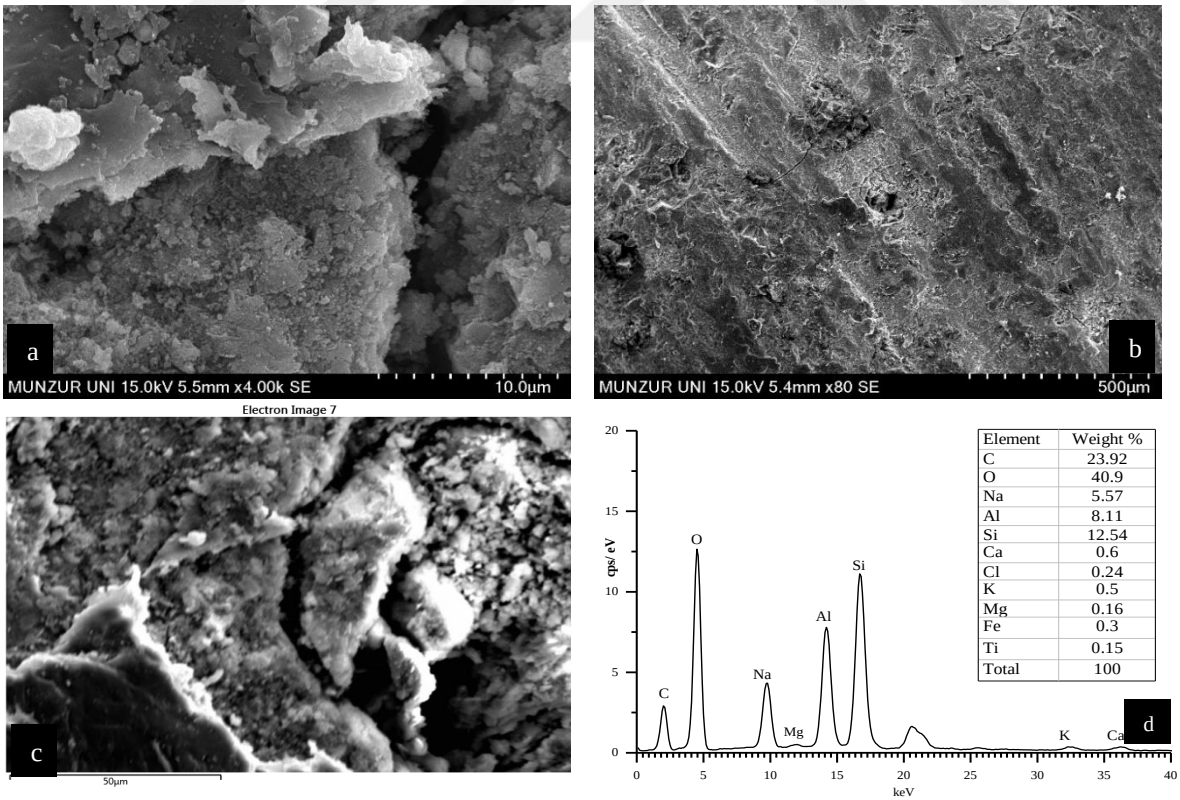


Şekil 4.42: a) 60 gün besiyerinde iyileştirilmiş M4-3 numunesi 4000X SEM görüntüsü b) 70 X SEM görüntüsü c) EDS görüntüleme alanı d) EDS analizi.

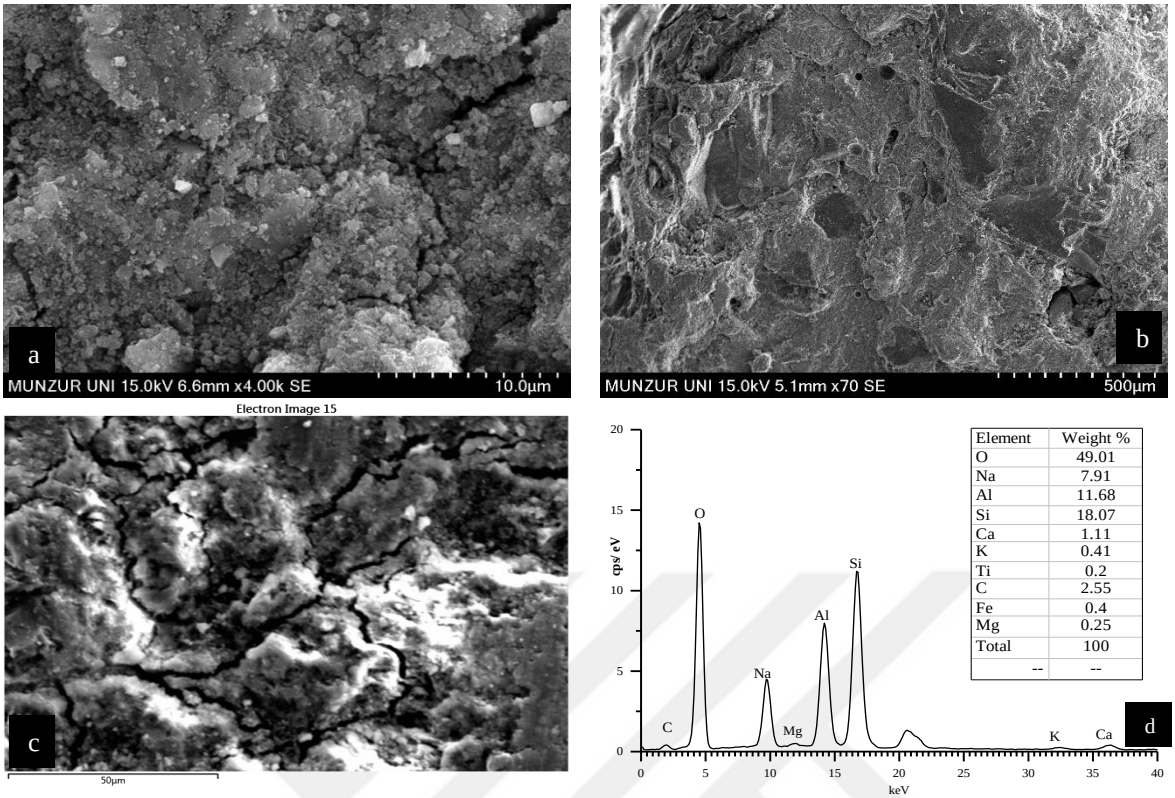
S12 numune grubunun 7. gün SEM görüntülerinde (Şekil 4.43 a ve b) M12 grubuna benzer şekilde kalsit yapıları, hidrate olmamış metakaolin ve cüruf taneleri ile birlikte geopolimer matrisin sürekliliği izlenmektedir. Ancak buradaki yapıların bakterinin ana faz içerisinde sporlaştırılarak dahil edilen M12 numune grubuna göre daha yumuşak olduğu görülmektedir. Ayrıca bu numune mikrografında canlı kalamamış bakterilerin bıraktığı bir kısım boşluklar da izlenmiştir. S12-1 ve S12-3 numunelerinin mikroyapı görsellerinde (Şekil 4.44 a ve b, 4.46 a ve b) kalsit formunun yanısıra, çok miktarda da esas olarak polikristal sferikslerden oluşmaktaolan vaterit ve etrenjit formları izlenmiştir. Aynı grubun kültür içerisinde iyileştirilen S12-2 numunesinin mikrograflarında (Şekil 4.45 a ve b) ise bu yapılara daha az rastlanılmıştır.



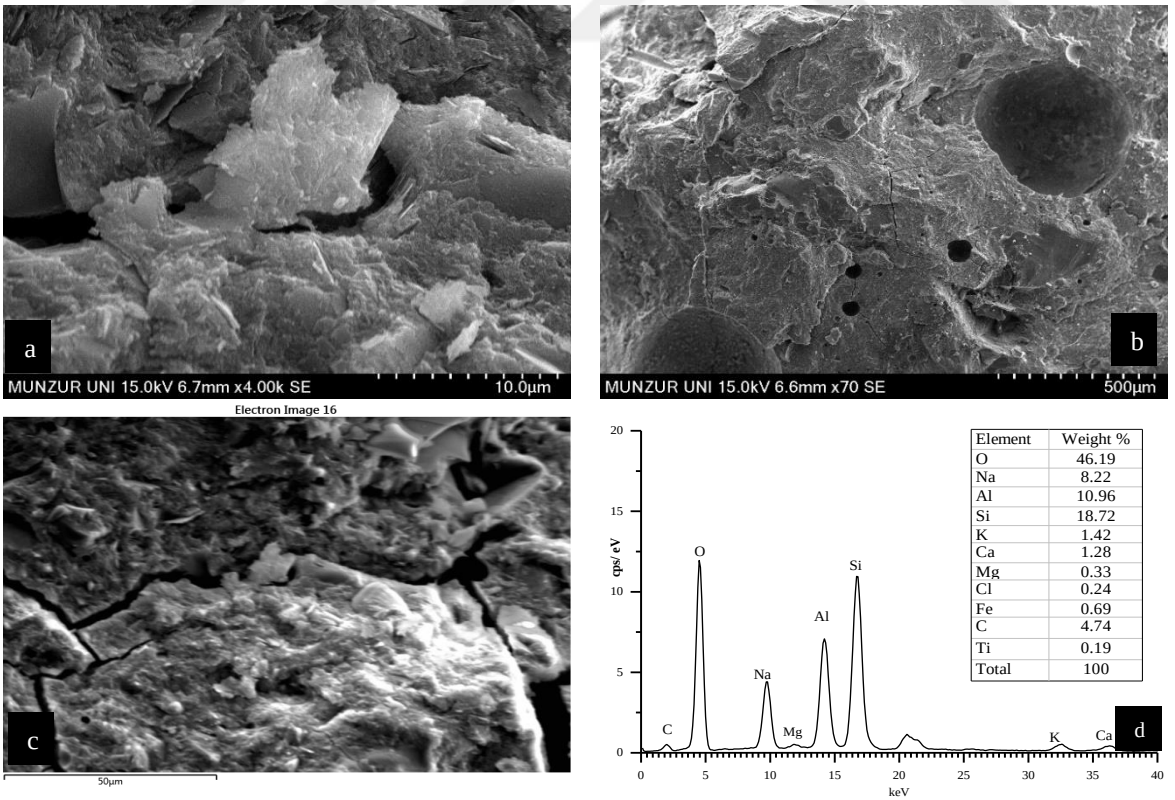
Şekil 4.43: a) S12 numunesi 7. gün 4000X SEM görüntüsü b) 70 X SEM görüntüsü c) EDS görüntüleme alanı d) EDS analizi.



Şekil 4.44: a) 60 gün besiyerinde iyileştirilmiş S12-1 numunesi 4000X SEM görüntüsü b) 70 X SEM görüntüsü c) EDS görüntüleme alanı d) EDS analizi.



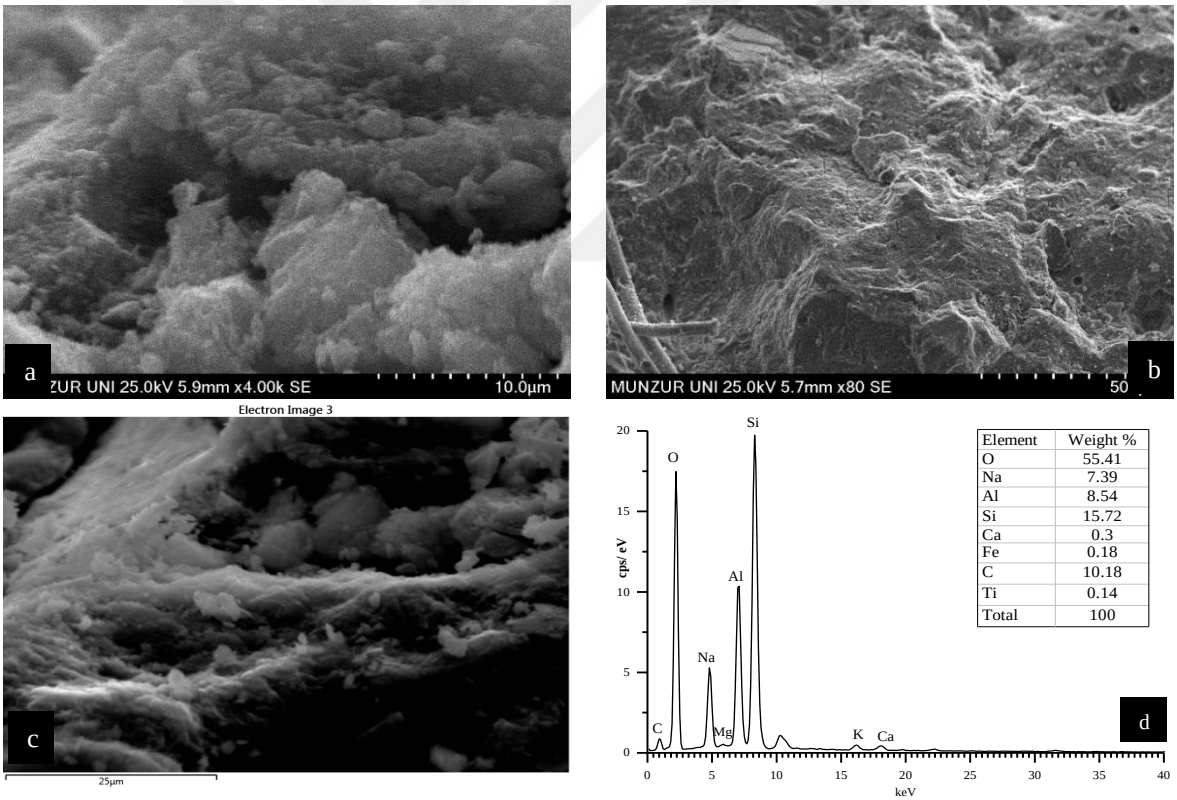
Şekil 4.45: a) 60 gün bakteri kültüründe iyileştirilmiş S12-2 numunesi 4000X SEM görüntüsü b) 70 X SEM görüntüsü c) EDS görüntüleme alanı d) EDS analizi.



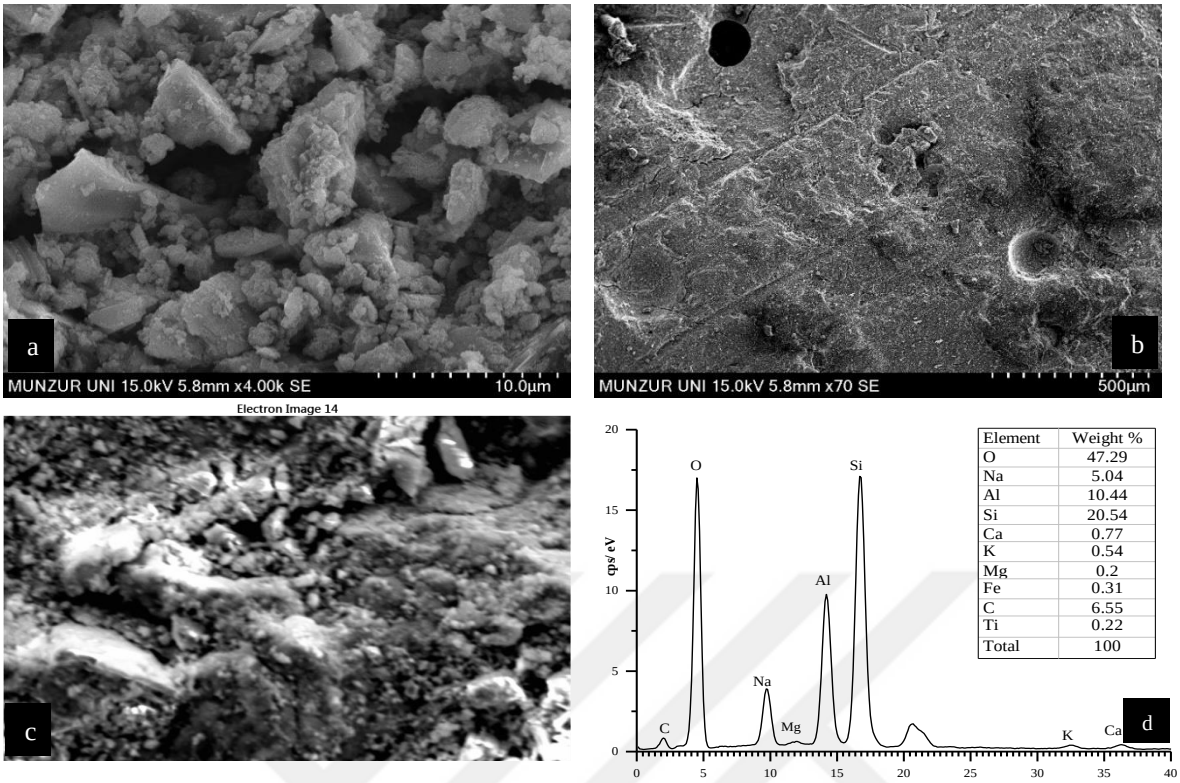
Şekil 4.46: a) 60 gün besiyerinde iyileştirilmiş S12-3 numunesi 4000X SEM görüntüsü b) 70 X SEM görüntüsü c) EDS görüntüleme alanı d) EDS analizi.

S8 numune grubunun 7. gün mikro görüntülemesinde (Şekil 4.47 a ve b) kütlesel kalsit yapılarının yanısıra, S12 numune grubuna göre daha fazla miktarda aktive olmamış metakaolin ve cüruf yspısı görülmektedir. Bu durum aktivatör oranının daha düşük olmasından kaynaklanmaktadır. Bu tanecikli yapı yerine bakteriyel iyileştirme kürü sonrası kültür içerisinde iyileştirilen S8-1 numunesinde daha büyük çaplı tanecikler oluştuğu (Şekil 4.48 a ve b), besi yerinde iyileştirilen S8-2 numunesinde ise tanecikler arası $CaCO_3$ köprüleri kurulduğu görülmüştür (Şekil 4.49 a ve b).

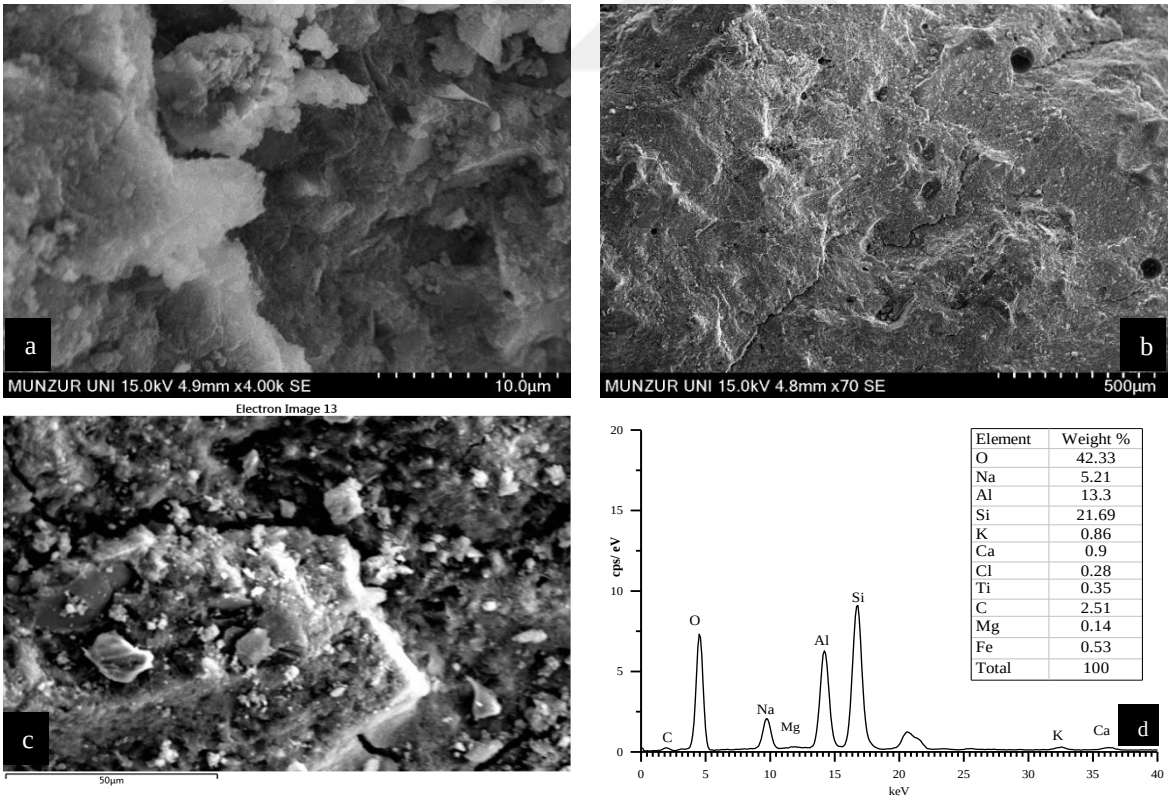
Ayrıca kültür içerisinde iyileştirilen numunelerin iyileştirme sonrası mikrografları incelendiğinde besiyerinde iyileştirilen numunelere oranla daha boşluklu bir yapı meydana geldiği görülmektedir.



Şekil 4.47: a)S8 numunesi 7. gün 4000X SEM görüntüsü b) 70 X SEM görüntüsü c) EDS görüntüleme alanı d) EDS analizi.



Şekil 4.48: a) 60 gün bakteri kültüründe iyileştirilmiş S8-1 numunesi 4000X SEM görüntüsü b) 70 X SEM görüntüsü c) EDS görüntüleme alanı d) EDS analizi.

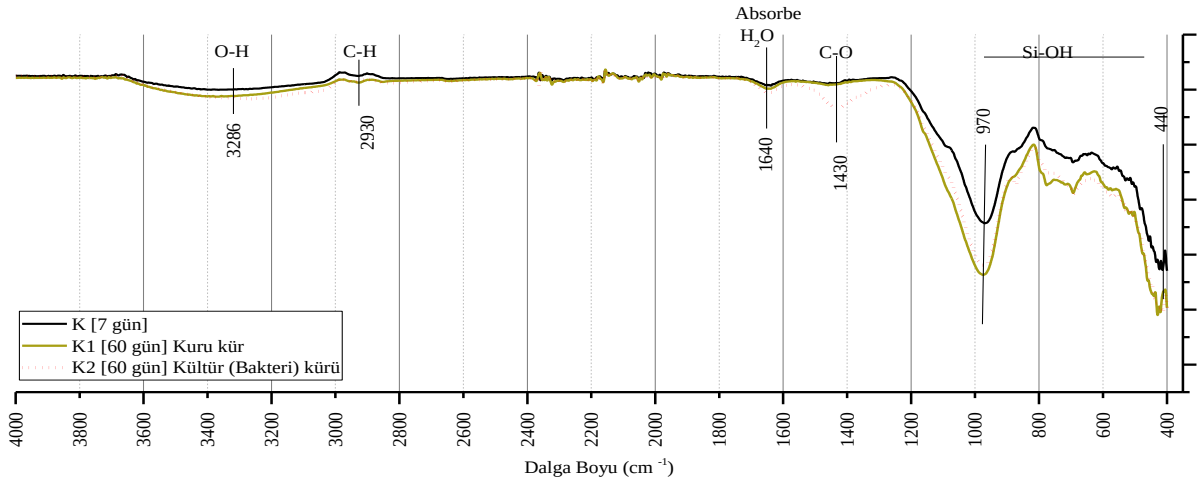


Şekil 4.49: a) 60 gün besiyerinde iyileştirilmiş S8-2 numunesi 4000X SEM görüntüsü b) 70 X SEM görüntüsü c) EDS görüntüleme alanı d) EDS analizi.

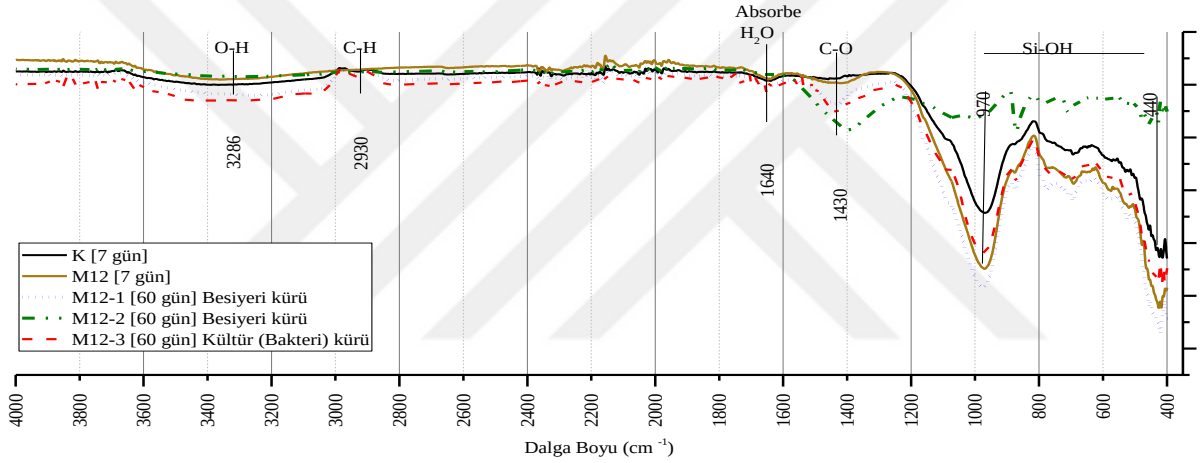
SEM analizinin yanısıra tüm numuneler için alınan EDS spektroskopileri ile matrislerin içindeki elementlerin dağılımının incelenmesi amaçlanmıştır. Tüm numunelerdeki spektrumlar beklenen element dağılımını göstermiştir. Numunelerdeki ana elementler, genel olarak geopolimerizasyon reaksiyonunu gösteren ve diğer sonuçlarla iyi bir korelasyon sağlayan Si ve Al ‘dir. Spektrumdaki diğer elementler ise ağırlık yüzdelerine göre sırasıyla sodyum, karbon, kalsiyum ve eser miktarda diğer elementlerdir. Sonuçlara göre numunelerin oksijen miktarı %35 ile %55 arasında değişmektedir. Uygulanan iyileştirme kürü sonrasında numunelerin tamamına yakınında oksijen miktarı 7. gündeki oranın altına düşmüştür. Bu durumun nedenlerinden biri iyileştirmede kullanılan S. Pasteurii bakterisinin oksijenli solunum yapan aerobik bir bakteri türü olması olarak yorumlanabilir. Numunelerin silisyum miktarı %12 ile %30 arasındadır. En yüksek silisyum oranı ise en yüksek basınç dayanımını veren M12-3 kodlu numunede ölçülmüştür. 12 mol ve 8 mol NaOH içeren numunelerde Na oranı %3,82-%8,23 arasında değişirken 4 mol NaOH içeren numnelerde Na oranı 1,81-5,17 arasında bulunmuştur.

4.2.7 FTIR Analizleri

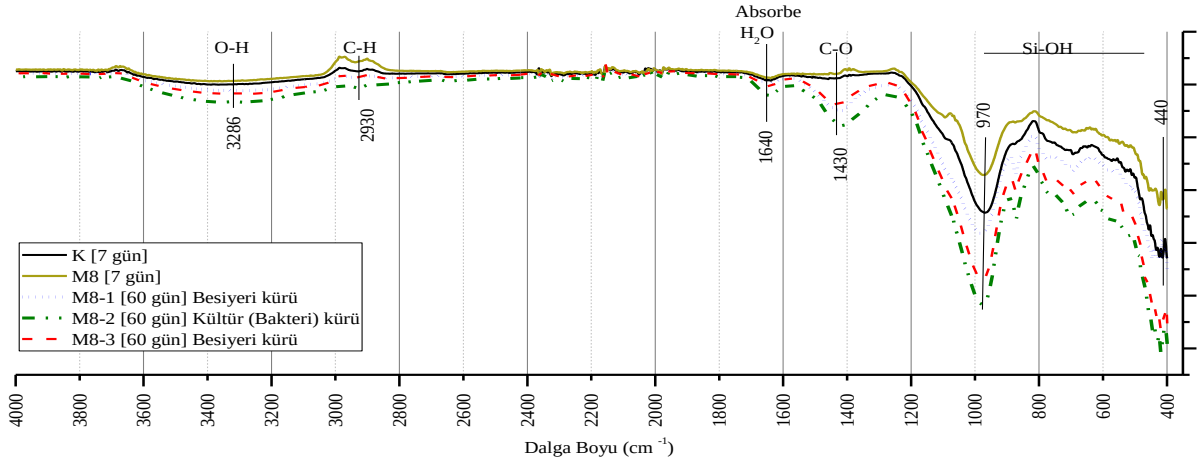
Mineraloji, geopolimer harçların sentezlenmesinde önemli bir etkendir. Bu nedenle bu tezin numunelerinin minerolojik performansını incelemek için FTIR analizi kullanılmıştır. Numuneler iyileştirme öncesi 7. gün ve iyileştirme sonrası 60. günlerde, optik mikroskop gözlemleri tamamlandıktan sonra, çatlakları dolduran ürünün kalsit yoğunluğunu tespit etmek için çatlak bölgesinden kırılmış ve kırık yüzeyden FTIR saçılması analizi için numune alınmıştır. Analiz sonucunda Si-O-H bağları ve beklenen diğer pikler izlenirken burada çöken ürünün kalsit ($CaCO_3$) ve kalsiyum hidroksit ($Ca(OH)_2$) olduğu tespit edilmiştir (Şekil 4.50-4.55).



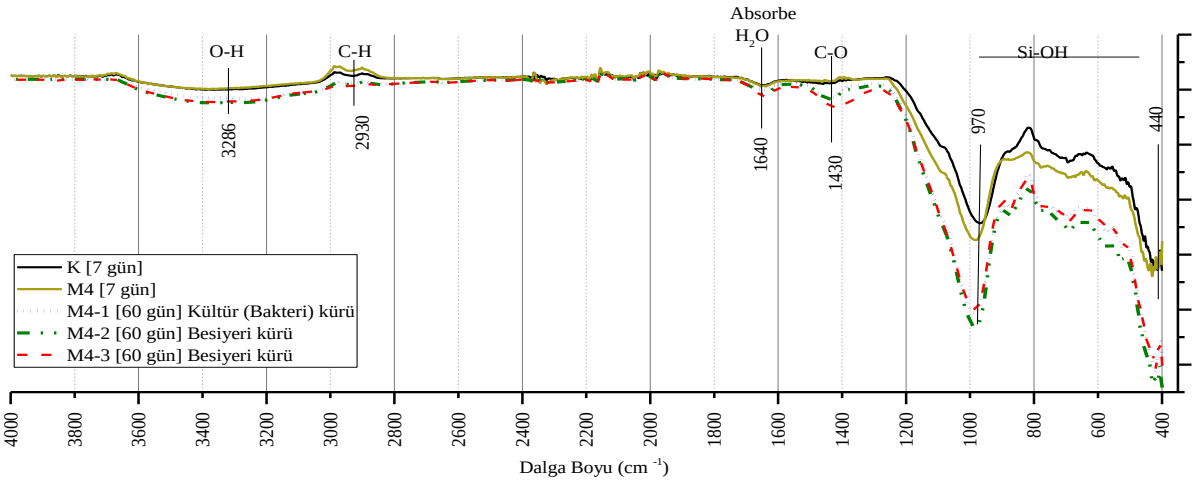
Şekil 4.50: Kontrol numunesi grubu FTIR analizi sonuçları.



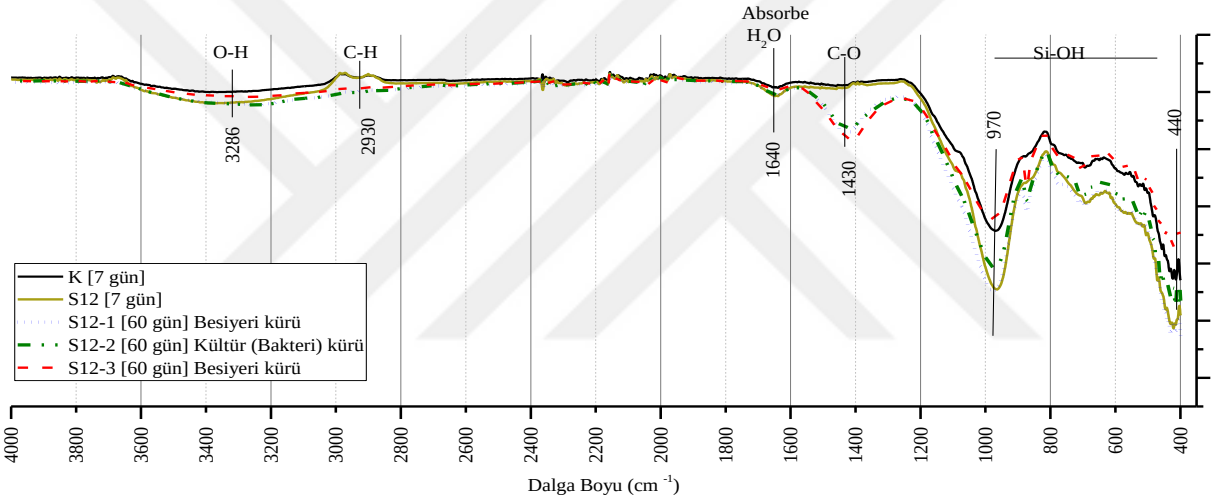
Şekil 4.51: M12 numune grubu FTIR analizi sonuçları.



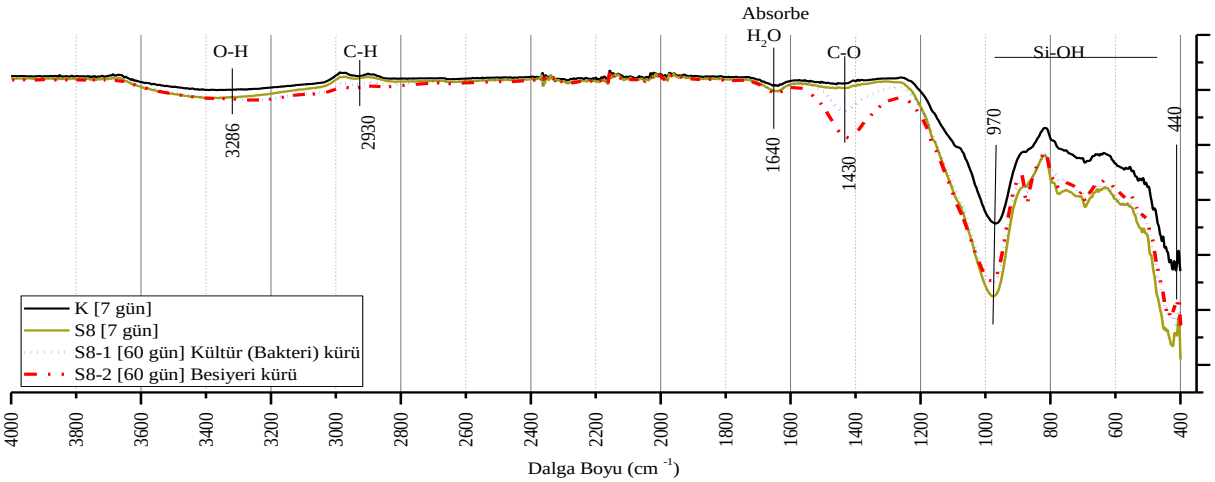
Şekil 4.52: M8 numune grubu FTIR analizi sonuçları.



Şekil 4.53: M4 numune grubu FTIR analizi sonuçları.



Şekil 4.54: S12 numune grubu FTIR analizi sonuçları.



Şekil 4.55: S8 numune grubu FTIR analizi sonuçları.

5. TARTIŞMA VE SONUÇ

Bu doktora çalışması, biyolojik bakteri hücrelerinin herhangi bir şekilde kapsüllenmeden geopolimer harca katıldığı ve yüzey çatlaklarında karbonat çökelmesinin araştırıldığı literatürdeki ilk tez çalışmasıdır. Bu çalışmada, geopolimer harçlardaki çatlakların bakteriyel olarak onarımı için gerekli olan temel şartlar, bakterinin canlılığını koruyabildiği geopolimer harç hazırlama teknikleri ve geopolimer harcın bakteri ile onarımının mümkün olup olmadığı araştırılmıştır. Bu amaçla ön deneylerde geopolimer harçlara kür şartlarının etkisi ve harç içerisine kapsülleme yapılmaksızın bakteriyel ajan eklenmesi için en uygun şartların oluşturulması amacıyla araştırmalar yapılmıştır. Ana deneylerde ise harca eklenen *Bacillus sporsarcina pasteurii* bakterisinin geopolimer harca fiziksel ve içyapı olarak etkisi incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar aşağıda listelenmiştir.

- Bakteri kültürü - NaOH titrasyon testine göre, NaOH'in azar azar ve aralıklarla dahil edildiği durumlarda bile, bakteri kültürünün canlılığını koruyabildiği maksimum pH<12'dir. Bu sonuç, sıvı formda olan bakteri kültürü ile yine sıvı formda bulunan NaOH çözeltisinin direkt olarak birbirine karıştırılamayacağını göstermektedir.

- Deneysel çalışmalar sonucunda *Bacillus sporosarcina pasteurii* bakterisinin kendiliğinden iyileştirme yapması amacıyla harca karıştırılabilmesi için karmaşık süreçler gerektirmeyen, kolay ve hızlı 2 yöntem ortaya konmuştur. Bunlardan biri bakterinin geopolimerin matris malzemesi olan metakaoline emdirildikten sonra kademeli ısı artışı ile sporlaştırılarak kullanmak, diğeri ise katı agar yüzeyindeki endosporların toplanarak karışım suyuyla birlikte harca katılması şeklindedir. Her iki yöntemde de iyileştirme kürü sonrasında numuneler bakterisiz geopolimer harçlardan daha az boşluğa sahiptir. Bu sonuç numunelerin kılcal su emme değerleri ile örtüşmektedir. Ancak katı agar yüzeyinden toplanan endosporlarla üretilen harçlarda iyileştirme daha yavaş olmaktadır. Bunun yanısıra bakteri sporu varlığı her iki durumda da geopolimer harcın priz süresini uzatmaktadır.

- Geopolimer harcın pH seviyesi ve sıcaklığı NaOH konsantrasyonuyla bağlantılıdır. NaOH konsantrasyonun artması ile birlikte ortam ısısı ani yükselişe geçmekte, çok hızlı yükselen sıcaklıkta bakteri canlılığını koruyamamaktadır. Bu nedenle aktivatör

çözeltiler soğutulduktan sonra harca ilave edilmelidir.

- Harcın içindeki NaOH miktarı arttıkça çözeltinin yoğunluğu artmakta, priz süresi boşluk oranı ve işlenebilmesi azalmaktadır. Harçta meydana gelen yayılma değeri her 4 mol/lt NaOH artışı için yaklaşık olarak %20 azalmaktadır. Boşluk miktarının artması bakterinin ihtiyacı olan yaşam boşluğu ve oksijen miktarını karşılayabilmesi için gereklidir. Ancak bu durum harcın mekanik dayanımını her 4 mol düşüş için %20 düşürmektedir. Bu durumda detay malzeme olarak kullanılabilecek düşük dayanımlı geopolimer harçların erken dönem çatlakları belirtilen yöntemlerle başarıyla iyileştirilebilir.

- Bakteriyel iyileştirme yapılacak geopolimer harç için uygulama hızı ve kolaylığı açısından en uygun yöntem 60°C'deki kuru fırın kürüdür. En yüksek dayanımı veren karşım ise 12 mol NaOH ile hazırlanan numunelerde elde edilmiştir.

- Ön deneylerin sonuçlarına göre, besiyeri ile hazırlanan harçların basınç dayanımları kontrol numunelerine göre %10 düşüktür. Bunun sebebinin besi yeri hazırlanırken kullanılan üre, pepton ya da NaCl'ün harcın hidratasyon sürecindeki negatif etkisi olduğu öngörülmektedir. Ayrıca bakteri ile üretilen ancak saf suda iyileştirme kürüne bırakılan ya da hiçbir işlem yapılmadan bekletilen numunelerin dayanımları da kontrol numunesine göre yine %5 oranında daha düşüktür. Bu durum, uygun ortam olmadığında bakteriler öldüğünden protein yapısı dağılır ve oluşan boşluklar nedeniyle basınç dayanımında bir miktar düşüş olabilir şeklinde yorumlanmıştır.

- İçerisine bakteri kültürü konulan numunelerden besiyerinde kürlenen harçların ileri yaş dayanımları bakteri mevcut boşlukları doldurduğu için yaklaşık %5 oranında daha fazladır.

- Ana deneyde kullanılan numunelere çatlak iyileştirme potansiyeli açısından bakıldığında 4, 8 ve 12 mol NaOH ile hazırlanmış harçların tamamı çatlağı iyileştirmeyi başarmış ancak 12 mol aktivatör ile iyileşme daha geç meydana gelmiştir. Bu da yüksek alkali ortamın bakteriyel iyileşmeyi geciktirdiğini göstermiştir.

- Bakterili olarak üretilen harcın çatlak sonrası iyileştirme kürü besiyeri içerisinde yapıldığında kılcal su emme yüzdeleri yüksek oranda azalmış ve birim ağırlıkları artmış, bakteri kültürü içerisinde yapıldığında ise kılcal su emme yüzdeleri 2,5 kata kadar artarak birim hacim ağırlıklarında da azalmalar meydana gelmiştir. Bu durumun nedeninin de bakteri kültürü ile iyileştirme yapılırken ortama besiyeri ile birlikte verilen bakterilerin ortamdaki besinleri tüketmesi, bu nedenle harcın içerisindeki bakteri sporlarının besin yetersizliğinden ölmesi ve yerinde boşluklar bırakması olduğu öngörülmektedir.

- Ultrases geçiş hızı değişimi yüzdelerinde 4 mol NaOH ile üretilen harçlar diğer harçlara göre 3 kat daha fazla fark oluşturmuştur. Bunun sebebi düşük aktivatörlü boşluklu yapıda bakterilerin daha fazla üreyerek, daha yüksek miktarda kalsiyum karbonat üretme şansı bulmaları olarak öngörülmektedir. Ancak harç üretimi esnasında bakteri ilave edilmeyen harcın yalnızca dışarıdan bakteri ile iyileştirilmesi ultrases geçiş hızında sadece %3 civarında bir değişim yaratmıştır.

- SEM görüntüleri 12 mol NaOH aktivatörü kullanılan harçlarda daha sağlam bağ özellikleri ve daha fazla kütlesel kalsit kristal yapısı bulunduğunu, bunun da yapıyı sertleştirerek basınç dayanımını artırdığı doğrulanmıştır. 8 ve 4 mol harçlarda ise sert kalsit yapısından ziyade daha çok C-S-H jeli ve $Ca(OH)_2$ yapısı gözlenmiştir. Bakteriyel ajanların ilave edildiği numunelerin iyileştirme kürü sonrasındaki SEM görüntülerinde, kontrol numunesine ve diğer numunelerin 7. gün mikrograflarına göre daha fazla vaterit ve aragonit formunda $CaCO_3$ yapıları gözlenmiştir. Bu durum bakteriyel ajanın, geopolimer harcın yoğun alkali ortamında, kararlı kalsit yapısından ziyade daha zayıf formlardaki bu yapılar ile boşlukları doldurduğunu ve kılcal geçirimliliği azalttığını göstermektedir.

- EDS analizlerindeki verilere göre en yüksek silisyum oranına sahip numunenin en yüksek basınç dayanımına sahip olduğu bilgisi literatürle örtüşmektedir.

- Ortama yalnızca dışarıdan bakteri verilerek iyileştirilen geopolimer harçlardaki çatlak onarımı hem daha uzun zaman gerektirmekte, hem de elemanda yüzeysel kapanma olmakla birlikte uygulanan iyileştirme kürü elemanın porozitesine ve su emme miktarına katkı yapmamaktadır.

- Bu tez kapsamında oluşturulan numunelerde endospor formda bakteri ile üretilen ve 60 günlük besiyeri ile iyileştirme kürü uygulanan numunelerin çatlakları büyük oranda kapanmıştır.

- Su emme ve boşluk miktarında anlamlı bir azalma olması için bakteri sporlarının üretim sırasında harç içerisine karıştırılması ve besiyeri ile iyileştirilmesi gerekmektedir. İyileştirme için numuneye dışarıdan verilen bakteri kültürü yüzeysel olarak çatlağı kapatsa dahi içyapıda tam tersine ağırlık kaybına ve boşluk miktarının artmasına neden olmaktadır.

- Çatlakların tamamen onarıldığı numunelerde dahi basınç dayanımında ciddi bir artış olmamıştır. Bu durumun bakterilerin çökelttiği $CaCO_3$ kristallerindeki yapının ve bağın zayıflığından kaynaklandığı düşünülmektedir. Uygulamanın basınç dayanımı açısından fark yaratabilmesi için bu bağı güçlendirebilecek kimyasallar üzerine çalışmak gerekmektedir.

- Geopolimer harç üzerindeki çatlak genişliği bakteriyel ajanın çatlak iyileştirme süresini ve potansiyelini çok büyük ölçüde belirlemektedir. 200 µm üzerindeki çatlaklarda iyileşme kürü uygulaması ekonomik olmamaktadır.

- Geopolimer harcın üretim zorluğu ile birlikte bakteriyel botonun kontamine olma riski birleştiğinde bu tür betonların ancak fabrika ortamında prefabrik olarak üretilme zorunluluğu ortaya çıkmaktadır.

- Bu tezin ürünü olan geopolimer harçlarda bakteriyel iyileştirme araştırmaları yapısal elemanlar için sürdürülebileceği gibi, uygulamanın prefabrik olarak üretilen geopolimer harç esaslı atık su boruları, seramikler, dış cephe kaplama elemanlarının iyileştirilmelerinde de kullanılabilirliği de araştırılmaya değerdir.

KAYNAKLAR

Achal, V., Mukherjee, A., Kumari, D. ve Zhang, Q., 2015. Biomineralization for sustainable construction–A review of processes and applications. Cilt 148:1-17.

Achal, V., Mukherjee, A., Basu, P. ve Reddy, M., 2009. Strain improvement of Sporosarcina Pasteurii for enhanced urease and calcite production. *J Ind Microbiol Biotechnol.*, Cilt: 36:981-988(7).

Achal, V. ve Pan, X., 2014. Influence of calcium sources on microbially induced calcium carbonate precipitation by Bacillus sp. CR2. *Applied biochemistry and biotechnology,* Cilt 173:307–317.

Achal, V., Pan X., Lee D., Kumari D. ve Zhang, D., 2013. Remediation of Cr(VI) from chromium slag by biocementation. *Chemos phere,* Cilt 93:1352–1358.

Achal, V., Pan, X. ve Ozyurt, N., 2011. Improved strength and durability of fly ash-amended concrete by microbial calcite precipitation. *Ecological Engineering*. Cilt 37(4): 554 – 559.

Alderighi, L., Gans P., Lenco A., Peters D., Sabatini A. Ve Vacca A., 1999. Hyperquad simulation and speciation (HySS): a utility program for the investigation of equilibria involving soluble and partially soluble species. *Coordination Chemistry Reviews,* Cilt 184:311–318.

Al-Thawadi, S., 2011. Ureolytic bacteria and calcium carbonate formation as a mechanism of strength enhancement of sand. *Journal of Advanced Science and Engineering Research,* Cilt 1(1): 98-114.

Amirreza Talaiekhozani , M., Zaimi Abd, M., Fulazzaky, M. ve Chew Tin, L., 2014. A review of Self-healing Concrete Research Development. *Journal of Environmental Treatment Techniques,* Cilt 2(1):1-11.

Anbu, P., Kang, C., Shin, Y. ve So, L., 2016. Formations of calcium carbonate minerals by bacteria and its multiple applications. *SpringerPlus,* Cilt 5:250.

Andalib, R., Abd Majid, M. ve Hussin, 2016. Optimum concentration of Bacillus megaterium for strengthening structural concrete. *Constr. Build. Mater.*, Cilt 118: 180-193.

Anon., 2018. *Corrossive Drinking Water.* https://www.water-research.net/index.php/drinking-water-issues-corrosive-water-lead-copper-aluminum-zinc-and-more [Erişim: 15 11 2019].

Anon., *Dokuz Eylül Üniversitesi Kişisel Sayfalar.* http://kisi.deu.edu.tr/burak.felekoglu/08.geopolimer.pdf [Erişildi: 9 10 2018].

Arıöz, Ö., 2009. Uçucu Kül Esaslı Geopolimer Tuğla Üretimi. *Eskişehir: 107M344 No'lu Tübitak projesi*, İnş. Müh. A.B.D., Anadolu Üniversitesi.

Siva, A.,Ravindiran G. Ve Achuthan, S., 2015. Bacterial Self-Healing Concrete-An Innovative Repair Technique. *International Journal of Applied Engineering Research,* Cilt 10:47.

Bachmeier, K., Williams, A. ve Warmington, J., 2002. Urease activity in microbiologically-induced calcite precipitation. *J Biotechnol.,* Cilt 93(2):171-181.

Bakharev, T., 2005. Resistance of geopolymer materials to acid attack. *Cement and Concrete Research,* Cilt 35(4):658-670.

Bang, S., Galinat, j. ve Ramakrishnan, v., 2001. Calcite precipitation induced by polyurethane-immobilized Bacillus Pasteurii. *Enzyme and Microbial Technology,* Cilt 28(4): 404-409.

Basaran,, Z., Amiri A., Ersan, Y.C., Boon, N. ve Belie, N.D., 2017. Impact of air entraining admixtures on biogenic calcium carbonate precipitation and bacterial viability. *Cement and Concrete Research,* Cilt 98: 44–49.

Basaran, A., 2013. Biomineralization in Cement Based Materials: Inoculation of Vegetative Cells". Ph.D. dissertation, *The University Texas os Austin.*

Basaran, Z., Kirisits, M. ve Ferron, R., 2015. Biomineralized cement-based materials: Impact of inoculating vegetative bacterial cells on hydration and strength. *Cement and Concrete Research,* Cilt 67: 237–245.

Bashir, J., Kathwari, I., Tiwary, A. ve Singh, K., 2016. Bio Concrete- The Self-Healing Concrete. *Indian Journal of ScienceveTeknology,* Cilt 9:47,
DOI: 10.17485/ijst/2016/v9i47/105252.

Beena, K., 2015. Microbial concrete: a multi-purpose building material-an overview. *International Journal of Advances in Engineering*, Cilt 7(6):1608–19.

Belmokhtar, N., Ammari, M., Brigui, J. ve Ben, L., 2017. Comparison of the microstructure and the compressive strength of two geopolymers derived from metakaolin and an industrial sludge. *Construction and Building Materials*, Cilt 146: 621–629.

Benini, S., Rypniewski, W., Wilson, K. ve Mangani, S., 1999. 1999. A new proposal for urease mechanism based on the crystal structures of the native and inhibited enzyme from Bacillus Pasteurii: why urea hydrolysis costs two nickels. *Structure*, Cilt 7(2): 205-216.

Boquet , E., Boronat , A. ve Ramos-Cormenzana, A., 1973. Production of calcite (calcium carbonate) crystals by soil bacteria is a general phenomenon. *Nature,* Cilt 246: 527–529.

Bundur, Z., 2017. Biyomineralizasyon ile kendiliğinden iyileşen çimento esaslı malzemeler, *İ*stanbul: *Tübitak*.

Bundur, Z, Amiri A., Ersan, Y.C., Boon, N. Ve Belie, N.D., 2017. Impact of air entraining admixtures on biogenic calcium carbonate precipitation and bacterial viability, Cement and Concrete Research, Cilt 98: 44-49.

Bundur, Z., Bae S., Kirisits, M.J. ve Ferron R. D., 2017. Biomineralization in Self-Healing Cement-Based Materials: Investigating the Temporal Evolution of Microbial Metabolic State and Material Porosity. *American Society of Civil Engineers, Cilt:* 29:8.

Bundur, Z., Kirisits M.J., M. ve Ferron , R., 2015. Biomineralized cement-based materials: Impact of inoculating vegetative bacterial cells on hydration and strength.. *Cement and Concrete Research,* Cilt 67:237–245.

Burbank, M., Weaver, T., Williams, B. ve Crawford, R., 2012. Urease activity of ureolytic bacteria isolated from six soils in which calcite was precipitated by indigenous bacteria. Cilt 29:389–395.

Callahan , B., Yuan, . Y. ve Wolfenden, R., 2005. The burden borne by urease. *The Journal of Chemical Phyisics*, Cilt 127:10828–10829.

Castanier, S., Le Metayer-Levrel, G. ve Perthuisot, J., 2000. Bacterial roles in the precipitation of carbonate minerals. *Microbial Sediments*, Sayfa 32-39.

Castanier, . S., Le Métayer-Levrel, G. ve Perthuisot, J., 1999. Carbonates precipitation and limestone genesis–the microbiologist point of view. *Sedimentary Geology,* Cilt 126 (1-4): 9-23.

Chahal, N., Siddique, R. ve Rajor, A., 2012. Influence of bacteria on the compressive strength, water absorption and rapid chloride permeability of fly ash concrete. *Construction and Building Materials,* Cilt 28:351-356.

Chau-Khun, M., Awang, A. ve Omar, W., 2018. Structural and material performance of geopolymer concrete: A review. *Construction and Building Materials*, Cilt 186; 90–102.

Chintalapudi, K. ve Rama, M., 2016. Properties of Bacterial-based Self-healing Concrete- A review. *International Journal of ChemTech Research CODEN (USA), Cilt* 9(2):182-188.

Chunxiang, Q., Huaicheng, C., Lifu , R. ve Mian, L., 2015. Self-healing of early age cracks in cement-based materials by mineralization of carbonic anhydrase microorganism. *Frontiers in Microbiology,* Cilt 6: 1225.

Cowie, j. ve Glassert, F., 1992. The reaction between cement and natural water containing dissolved carbon dioxide. *Advanced Cement Research,* Cilt 14 (15): 119-134.

Davidovits, J., 1981. Détermination de la provenance des céramiques par analyse des géopolymères contenus dans les pates céramiques cuites à basse température. *ArchéoSciences, revue d'Archéométrie,* Sayfa 53-56.

Davidovits, J., 1988. Soft Mineralurgy and Geopolymers. *Geopolymer "88, At Compiègne*, France, Cilt1: 19-23.

Davidovits, J., 1989. Geopolymers and geopolymeric materials. *in Journal of Thermal Analysis,* Cilt 35:429-441.

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

Davidovits, J., 1994. *proporties of geopolymer cements.* Saint-Quentin, France, Geopolymer Institute.

Davidovits, J., 2008. *Geopolymer: Chemistry and Applications.* St-Quentin: Institut Géopolymère.

De Muynck, W., Cox, K., De Belie, N. ve Verstraete, W., 2008. Bacterial carbonate precipitation as an alternative surface treatment for concrete. *Constr. Build. Mater.,* Cilt 22:875-885.

De Muynck, W., De Belie, N. ve Verstraete, W., 2010. Microbial carbonate precipitation in construction materials: a review. *Ecological Engineering,* Cilt 36(2): 118-136.

De Muynck, W., Debrouwer, D., De Belie, N. ve Verstraete, W., 2008. Bacterial carbonate precipitation improves the durability of cementitious materials. *Cement and Concrete Research,* Cilt 38(7): 1005-1014.

De Vargas,, A. ve diğerleri, 2011. The effects of Na 2 O/SiO 2 molar ratio, curing temperature and age on compressive strength, morphology and microstructure of alkali-activated fly ash-based geopolymers. *Cem. Concr. Compos., Cilt* 33(6): 653-660.

Dejong, J. T., Fritzges, M. B. ve Nusslein, K., 2006. Microbially Induced Cementation to Control Sand Response to Undrained Shear. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering,* Cilt 132:11.

Del Río, . A. V. Buys, B., Campos, J.L., Méndez, R. ve Mosquera-Corral, A., 2015. Optimizing upflow velocity and calcium precipitation in denitrifying granular systems. *Process Biochemistry,* Cilt 50(10): 1656-1661.

Dhami, N., Reddy, M. ve Mukherjee, A., 2013. Biomineralization of calcium carbonates and their engineered applications: a review. *Frontiers in Microbiology,* Cilt 4(314): 10-3389.

Dhami, N., Reddy, M. ve Mukherjee, A., 2014. Synergistic role of bacterial urease and carbonic anhydrase in carbonate mineralization. *Applied biochemistry and biotechnology,* Cilt 172:2552–2561.

Dreesen, R. ve Dusar, M., 2004. Historical building stones in the province of Limburg (NE Belgium): Role of petrography in provenance and durability assessment. *Materials Characterization,* Cilt 53 (2–4): 273–287.

Dry, C., 1994. Matrix cracking repair and filling using active and passive modes for smart timed release of chemicals from fibers into cement matrices. *Smart Materials and Structures,* Cilt 3(2).

Dupraz, S. ve diğerleri, 2009. Experimental approach of CO2 biomineralization in deep saline aquifers.*Chemical Geology*, Cilt 265:54–62.

Duxson, P. ve diğerleri, 2007. Geopolymer technology: the current state of the art. *Journal of Materials Science,* Cilt 42 (9): 2917-2933.

Duxson, P., Lukey, . G. ve Van Deventer, J., 2007. Physical evolution of na-geopolymer derived from metakaolin up to 1000 degrees. *Journal of Materials Science,* Cilt 42: 3044–3054.

Duxson, P., Provis C., Lukey, G. C. Ve Mallicoat S. W., ve diğerleri, 2005. Understanding the relationship between geopolymer composition, microstructure and mechanical properties. *Colloids and Surfaces A Physicochemical and Engineering Aspects,* Cilt 269: 47-58.

Edvardsen, C., 1999. Water permeability and autogenous healing of cracks in concrete. *ACI Materials Journal,* Cilt 96:448-454.

Ehrlich, H. L., 1998. Geomicrobiology: Its significance for geology. *Earth-Science Reviews*, Cilt 45:45-60.

Erdoğan, T., 2002. Materials of Construction. *Ankara: METU Press.*

Erşan, Y. Ç., De Belie, N. ve ve Boon, N., 2015. Microbially induced $CaCO_3$ precipitation through denitrification: an optimization study in minimal nutrient environment. *Biochemical Engineering Journal,* Cilt 101:108-118.

Erşan, Y. ve diğerleri, 2015. Screening of bacteria and concrete compatible protection materials. *Construction and building materials,* Cilt 88: 196-203.

Estiu G , G. ve Merz , K. J., 2004. The hydrolysis of urea and the proficiency of urease. *J Am Chem Soc.*, Cilt 126:6932–6944.

Fathy, A., Abaza, O., Sharaf, A. ve Labib, G., 2014. Propertıes of bacterıa-ınduced self-healıng mortar. *CSCE Annual Conference, At Halifax,* Cilt 56(1).

Ferris, F., Phoenix, V., Fujita, Y. ve Smith, R., 2003. Kinetics of calcite precipitation induced by ureolytic bacteria at 10 to 20 °C in artificial groundwater. *Geochimica et Cosmochimica Acta,* Cilt 67:1701-1710.

GharzouniabI, A. Sobrados I., Baklauti, S. Ve Rossignol, S., 2016. Predictive tools to control the structure and the properties of metakaolin based geopolymer materials. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering,* Cilt 511:212-221.

Ghosh, P., Mandal, S., Chattopadhyay, D. ve Pal, S., 2005. Use of microorganism to improve the strength of cement mortar. *Cem.Concr. Res, Cilt* 35(10):1980–1983.

Giannaros, P., Kanellopoulos, A. ve Al-Tabbaa, A., 2016. Damage recovery in self-healing concrete. Delft, The Netherlands, *HealCON-conferenc*e.

Glukhovsky, V., 1959. Gruntosilikaty (Soil Silicates). Kiev, *Gosstroyizdat*.

Gorospe, C., 2013. Effects of different calcium salts on calcium carbonate crystal formation by Sporosarcina Pasteurii. *Biotechnology and Bioprocess Engineering,* Cilt 18:903-908.

Gottschalk, G., 2012. Bacterial Metabolism. *Springer Science ve Business Media.*

Granger, S., Loukili, A., Pijaudier-Cabot, G. ve Chanvillard, G., 2007. Experimental characterization of the self-healing of cracks in an ultra high performance cementitious material: Mechanical tests and acoustic emission analysis. *Cement and Concrete Research,* Cilt 37: 519–527.

Guo, X. ve Pan, X., 2018. Mechanical properties and mechanisms of fiber reinforced fly ash–steel slag based geopolymer mortar. *Construction and Building Materials,* Cilt 79:633-641

Gurbuz, A., Sari, Y., Yuksekdag , Z. ve Cinar, B., 2011. Cementation in a matrix of loose sandy soil using biological treatment method. *African Journal of Biotechnology,* Cilt 10(38): 7432 - 7440.

Hall-Stoodley , L., Costerton, J. ve Stoodley, P., 2004. Bacterial biofilms: from the natural environment to infectious diseases. *Nat Rev Microbiol.,* Cilt 2(2):95-108.

Hammes, F., Boon, N. ve Villiersve, J., 2003. Strain-specific ureolytic microbial calcium carbonate precipitation. *Appl. Environ.*, Cilt 69(8):4901-9.

Hammes, F. ve Verstraete, W., 2002. Key roles of pH and calcium metabolism in microbial carbonate precipitation. *Reviews in Environmental Science and Biotechnology*, Cilt 1:3-7.

Ha, N., Ha, N.C., Oh, S.T., Sung, J.Y., Cha, K.A., Lee, M.H., ve Oh, B.H., 2001. Supramolecular assembly and acid resistance of Helicobacter pylori urease. *Nature Structural & Molecular Biology*, Cilt 8:505–509.

Hardjito, D., Wallah, S., Sumajouw, D. ve Rangan, B., 2005. On the development of fly ash-based geopolymer concrete. *Australian Journal of Structural Engineering,* Cilt 101-6: 467-472.

Harikrishnan, H. Kadaikunnan, S., Moorthy, I.G., Anuf, A.R.,,Ponmurugan, K. ve Kumar, R.S., 2015. Improvement of concrete durability by bacterial carbonate precipitation. *South Indian Journal of Biological Sciences,* Cilt 1(2): 90-96.

Hecker M. ve Volker. U., 2001. General stress response of Bacillus subtilis and other bacteria. *Adv Microb Physiol. ,* Cilt 44: 35-91.

Hsu, C., Huang, Y. ve Nimje, V., 2018. Comparative Study on the Sand Bioconsolidation through Calcium Carbonate Precipitation by Sporosarcina Pasteurii and Bacillus subtilis. *Crystals,* Cilt 8:189.

Hua, X. ve Van Deventer, J., 2000. The geopolymerisation of alumino-silicate minerals. *International Journal of Mineral Processing*, Cilt 59-3: 247-266.

Ivanov, V. ve Chu, J., 2008. Applications of microorganisms to geotechnical engineering for bioclogging and biocementation of soil in situ. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, Cilt 7(2): 139-153.

Larson , A. ve Kallio, R., 1954. Purification and properties of bacterial urease. *J Bacteriol.*, Cilt 68:67–73.

Jadhav, U. U., Lahoti, M., Chen, Z., Qiu, J., Cao, B. Ve Yang, Y., 2018. Viability of bacterial spores and crack healing in bacteria-containing geopolymer. *Construction and Building Materials*, Cilt 169:716-723.

Jang, J., Lee, N. ve Lee, H., 2014. Fresh and hardened properties of alkali-activated fly ash/slag pastes with superplasticizers. *Constr. Build. Mater.*, Cilt 50 :169-176.

Jimenez, A., Palomo, A. ve Criado, M., 2005. Microstructure development of alkali-activated fly ash cement: a descriptive model. *Cement and Concrete Research* , Cilt 35:1204 – 1209.

Jimenez-Lopez, C., Jroundi, F., Rodríguez-Gallego, J. M. ve Gonzalez-Muñoz, M. T., 2007. Biomineralization induced by Myxobacteria. *Microbiology Series*, Cilt (1):1.

Jonkers, H. M., 2007. Self healing concrete: a biological approach. Self Healing Materials, *Springer Series in Materials Science*, Cilt 195-204.

Jonkers, M., Thijssena, A., Muyzerb, G., Copuroglua, O. ve Schlangen, E., 2010. Application of bacteria as self-healing agent for the development of sustainable concrete. *Ecological Engineering, ,* 36: 230–235(2).

Kalaiselvi, P., Udayapriya, K. ve Selvam, R., 1999. Uric Acid-Binding Proteins in Calcium Oxalate Stone Formers and Their Effect on Calcium Oxalate Crystallization. *BJU Int*., Cilt 83, 919-923.

Kamennaya, N., Ajo-Franklin, C., Northen, t. ve Jansson, C., 2012. Cyanobacteria as biocatalysts for carbonate mineralization. *Minerals*, Cilt 2(4), 338-364.

Karthika, A., Sudalaimani, K., Vijayakumar, C. ve Saravanakumar, S., 2019. Effect of bio-additives on physico-chemical properties of fly ash-ground granulated blast furnace slag based self cured geopolymer mortars. *J Hazard Mater*., Cilt 361: 56-63.

Kashyap, V. ve Radhakrishna, A., 2013. Study on effect of bacteria on Cement composites. *International Journal of Research in Engineering and Technology*, eISSN: 2319-1163 | pISSN: 2321-7308.

Khale, D. ve Chaudhary, R., 2016. Compressive Strength of Metakaolin-Based Geopolymers: Influence of KOH Concentration, Temperature, Time and Relative Humidity. *Materials Sciences and Applications*, Cilt 7(11).

Kim, H., Eom, H.J., Park, C1., Jung, J1., Shin, B., Kim, W., Chung, N.,, Choi, IG. ve Park, W1., 2016. Calcium Carbonate Precipitation by Bacillus and Sporosarcina Strains Isolated from Concrete and Analysis of the Bacterial Community of Concrete. *J. Microbiol. Biotechnol.*, Cilt 26(3):540-8.

Kladi, A. ve diğerleri, 2002. Crystal Growth of Calcium Carbonate in Seawater,the effect of temperature and of the presence of Inhibitors. *Journal of Crystal Growth*, Cilt 85:106.

Knoll, A., 2003. Biomineralization and evolutionary history. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry,* Cilt 54: 329–356.

Krajewska, B., 2009. Ureases I. Functional, catalytic and kinetic properties: a review. *Journal of Molecular Catalysis B: Enzymatic,* Cilt 59:9–21.

Krivenko, P., 1994. *Alkaline cements.* Kiev, Ukraine, Proceedings of the 1 st International Conference on Alkaline Cements and Concretes, Sayfa: 131-149.

Kusbiantoro, A., Ibrahim, M., Muthusamy, K. ve Ali, A., 2013. Development of sucrose and citric acid as the natural based admixture for fly ash based geopolymer. *Procedia Environ. Sci.* , Cilt 17:596-602.

Kusbiantoro, A., Ibrahim, M., Muthusamy, K. ve Ali, A., 2013. Development of sucrose and citric acid as the natural based admixture for fly ash based geopolymer. *Procedia Environ. Sci.,* Cilt 17: 596-602.

Laidler, . K. ve Hoare , J., 1950. The molecular kinetics of the urea-urease system. III. Heats and entropies of complex formation and reaction. *J. Am. Chem. Soc.,* Cilt 72:2489–2494.

Le Metayer-Levrel, G., Castanier, S., Orial , G. ve Loubier, J., 1999. Applications of bacterial carbonatogenesis to the protection and regeneration of limestones in buildings and historic patrimony. *Sedimentary Geology,* Cilt 126(1–4): 25–34.

Li, C., Sun, H. ve Li, L., 2010. A review: the comparison between alkali-activated slag (Si1Ca) and metakaolin (Si1Al) cements.. *Cem. Concr. Res.,* Cilt 40: 1341-1349.

Li, M., Cheng, X. ve Guo, h., 2013. Heavy metal removal by biomineralization of urease producing bacteria isolated from soil. *International Biodeterioration & Biodegradation,* Cilt 76:81–85.

Lloyd, A. ve Sheaffe, M., 1973. Urease activity in soils. *Plant and Soil,* Cilt 39:71–80.

Loewenthal, R. ve Marais, G., 1978. Carbonate chemistry of aquatic systems: theory and application. *U.S. Department of Energy Office of Scientific and Technical Information,* OSTI ID: 6851788.

Lowenstam , H., 1981. Minerals formed by organisms. *Science,* Cilt 211, 1126–1131.

Lowenstam, H. A. ve Weiner, S., 1989. *On biomineralization.* New York: Oxford University Press.

Mashhadania, M., Canpolat, O., Aygörmez, Y., Uysal, M. ve Erdem, S., 2018. Mechanical and microstructural characterization of fiber reinforced fly ash based geopolymer composites. *Construction and building materials,* Cilt 167: 505-513.

Mahesvaran, S., Solomon S.D. ve Murthy, A.R, 2014. Strength improvement studies using new type wild strain Bacillus cereus on cement mortar. *Current Science,* Cilt 106:50(1).

Mann, S., Webb, J. ve Williams, R., 1989. Biomineralization chemical and biochemical perspectives. New York: NY: *VCH Publishers.*

Mavromatis, V., Pearcea, C.R., Shirokovaa, S.L., Bundeleva, I.A., ve Pokrovskya O.S., 2012. Magnesium isotope fractionation during hydrous magnesium carbonate precipitation with and without cyanobacteria. *Geochimica et Cosmochimica Acta.*, Cilt 76:161-174.

Mian, L., Chun-xiang, Q. ve Rui-yang, L., 2015. Factors affecting crack repairing capacity of bacteria-based self-healing concrete. *Construction and Building Materials,* Cilt: 87.

Mishra, A., Choudhary, D., Jain, N., Kumar, M., Sharda, N.,ve Dutt, D., 2008. Effect of concentratıon of alkalıne lıquıd and curıng tıme on strength and water absorptıon of geopolymer concrete. *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences,* Cilt 3:1.

Mitchell, A. ve Ferris, F., 2005. The coprecipitation of Sr into calcite precipitates induced by bacterial ureolysis in artificial groundwater: temperature and kinetics dependence. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, Cilt 69:4199–4210.

Mobley, H. ve Hausinger, R., 1989. Microbial ureases: significance, regulation, and molecular characterization. *Microbiol Rev*., Cilt 53:85–108.

Mobley, H., Island, M. ve Hausinger, R., 1995. Molecular biology of microbial ureases. *Microbiol Rev.*, Cilt 59:451–480.

Mohanadoss, P., 2015. Bio concrete strength, durability,permeability, recycling and effects on human health: a review. USA: *Proceedings of the Third International Conference Advances in Civil, Structural and Mechanical Engineering*.

Montes, C. ve Alouche, E., 2013. Rheological behaviour of fly ash-based geopolymers. *STP 1566 Geopolym. Binder Syst.,* Cilt: 4:72-84.

Nagan, S. ve Karthiyaini, S., 2014. A study on load carrying capacity of fly ash based polymer concrete columns strengthened using double layer GFRP wrapping. *Adv. Mater. Sci. Eng.,* Gale Document Number: GALE|A415323968.

Nemati, M., Greene, E. ve Voordouw, G., 2005. Permeability profile modification using bacterially formed calcium carbonate: comparison with enzymic option. *Process Bıochemıstry,* Cilt 40 (2), 925 - 933.

Nemati, M. ve Voordouw, G., 2003. Modification of porous media permeability, using calcium carbonate produced enzymatically in situ. *Enzyme and Microbial Technology,* Cilt 33(5), 635 - 642.

Nematollahi, B. ve Sanjayan, J., 2014. Effect of different superplasticizers and activator combinations on workability and strength of fly ash based geopolymer. *Mater. Des.,* Cilt 57: 667-672.

Newman, J. ve Choo, B., 2003. Hydration of Portland Cement in the Presence of Highly Reactive Metakaolin, *Advanced Concrete Technology.* Cilt 6:5

Ng, S., Lee, M. ve Hii, S., 2012. An overview of the factors affecting microbial-induced calcite precipitation and its potential application in soil improvement. *World Academy of Science, Engineering and TechnologyInternational Journal of Civil and Environmental Engineering,* Cilt 62:723–729.

Nolan, E., Basheer , P. ve Long, A., 1995. Effects of three durability enhancing products on some physical properties of near surface concrete. *Construction and Building Materials*, Cilt 9(5):267 – 272.

Okwadha, G. ve Li, J., 2010. Optimum conditions for microbial carbonate precipitation. *Chemosphere,* Cilt 81(9):1143-8.

Pacheco T., F., Abdollahnejad, Z. ve Miraldo, S., 2012a. An overview on the potential of geopolymers for concrete infrastructure rehabilitation. *Constr. Build. Mater.,* Cilt 36:1053-1058.

Pacheco-Torgal, F., Abdollahnejad, Z. ve Miraldo., S., 2016. Alkali-activated cement-based binders (AACB) as durable and cost competitive low CO2 binders: some shortcomings that need to be addressed.*Waltham: Elsevier Science and Tech*, Cilt 1: 195-216.

Pacheco-Torgal, F. G. J. J. S., 2008a. Adhesion characterization of tungsten mine waste geopolymeric binder. Influence of OPC concrete substrate surface treatment.. *Constr. Build. Mater.* Cilt 22: 154-161.

Palacios, M. ve Palomo, A., 2004. Alkali-activated fly ash matrices for lead immobilisation: a comparison of different leaching tests. *Advances in Cement Research,* Cilt 16: 137-144(4).

Park, J., Ann, K. ve Cho, C., 2015. Resistance of Alkali-Activated Slag Concrete to Chloride-Induced Corrosion. *Advances in Materials Science and Engineering, http://dx.doi.org/10.1155/2015/273101*

Patro Sanjaya, K. ve diğerleri, 2015. Effect of bacteria on the properties of concrete using Portland slag cement. *Proceedings of the National Conference on Recent Advances and Future Prospects in Civil Engineering.*

Pelisser, F., Guerrino, E., Menger, M. ve Michel, M., 2013. Micromechanical characterization of metakaolin-based geopolymers. *Construction and Building Materials*, Cilt 49: 547–553.

Provis, J., 2014. Geopolymers and other alkali activated materials: why, how, and what?. *Mater. Struct. ,* Cilt 47:11-25.

Purdon, A., 1940. 'The action of alkalis on blast-furnace slag. *J. Soc. Chem. Ind.- Trans. Commun.,* Cilt 59:191-202.

Qabany, A., Soga, K. ve Santamarina, C., 2012. Factors affecting efficiency of microbially induced calcite precipitation.. *J Geotech Geoenviron Eng.,* Cilt 138:992–1001.

Qian, C., Pan , Q. ve Wang , R., 2010. Cementation of sand grains based on carbonate precipitation induced by microorganism. *Science China Technological Sciences*, Cilt 53(8):2198-2206.

Rahman, M. ve Halfar, J., 2014. First evidence of chitin in calcified coralline algae: new insights into the calcification process of Clathromorphum compactum, *Nature.com*, Scientific reports 4. Article number: 6162.

Rahman, M. ve Sarker, P., 2011. Geopolymer concrete columns under combined axial load and biaxial bending, Australia: *Institute of Australia.* http://hdl.handle.net/20.500.11937/26268.

Rajendran, M. ve Soundarapandian, N., 2013. An experimental investigation on the flexural behavior of geopolymer ferrocement slabs. *J. Eng. Technol.*, Cilt 3:2.

Ramachandran, . S., 2007. Performance characteristics of bacterial concrete-a smart biomaterial. *Proceedings of the first international conference on recent advances in concrete technology,* Sayfa:. 67-78.

Ramakrishnan, V., Panchalan, R. ve Bang, S., 2001. Bacterial Concrete-A Self Remediating Biomaterial, *In Proceedings of 10th International Congress on the Polymers in Concrete,* Hawaii.

Rao, S., Reddy, V.S., Hafsa, M., Veena, P., ve Anusha P., 2013. Bioengineered concrete - a sustainable self-healing construction material. *Research Journal of Engineering Sciences*, Cilt 2(6):46–7.

Rodriguez-Navarro, C., Rodriguez-Gallego, M., Chekroun, K. ve Gonzalez-Munoz, M. T., 2003. Conservation of ornamental stone by Myxococcus xanthus-induced carbonate biomineralization. *Appl Environ Microbiol.*, Cilt 69(4): 2182-2193.

Rostami, M. ve Behfarnia, K., 2017. The effect of silica fume on durability of alkali activated slag concrete. *Construction and Building Materials*, Cilt 134: 262-268.

Rovnaník, P. ve Al, S., 2010. Effect of curing temperature structure of metakaolin-based geopolymer. *Journal of Babylon University/Engineering Sciences,* Cilt 24(7): 1176–1183.

Rovnanik, P., 2010. Effect of curing temperature on the development of hard structure of metakaolin-based geopolymer. *Construction and Building Materials*, 24(7):1176-1183.

Sarada, D., Choonia, H., Sarode, D. ve Lele, S., 2009. Biocalcification by Bacillus Pasteurii urease: a novel application. *J Ind Microbiol Biotechnol.*, Cilt 36(8):1111-1115.

Shaw , W. ve Bordeaux , J., 1955. The decomposition of urea in aqueous media. *Journal of the American Chemical Society,* Cilt 77:4729-4733.

Siddique, R. ve Klaus, J., 2009. Influence of metakaolin on the properties of mortar and concrete: a review. *Applied Clay Science*, Cilt 43: 392-400.

Silva, P. ve Crentsil, K., 2008. Medium - term phase stability of Na2O-Al2O3-SiO2-H2O geopolymer systems. *Cement and Concrete Research*, Cilt 38: 870-876.

Silver, S., Toth, K. ve Scribner, H., 1975. Facilitated transport of calcium by cells and subcellular membranes of Bacillus subtilis and Escherichia coli. *J Bacteriol*, Cilt 122(3):880-885.

Singh, B., Ishwarya, G., M., G. ve Bhattacharyy, S., 2015. Geopolymer concrete: a review of some recent developments. *Construction and Building Materials*, Cilt 85:78-90.

Sofi, M., Deventer, V., Mendis, P. ve Lıkey, G., 2007. Engineering properties of inorganic polymer concretes (IPCs). *Cement and Concrete Research*, Cilt 37:251-257.

Srinivas, T. ve Rao, N., 2017. Water absortion capacity of low calsium fly ash and slag based geopolymer concrete. *IJRCMCE*.

Stabnikov , V., Chu, J., Ivanov, V. ve Li, Y., 2013. Halotolerant, alkaliphilic urease-producing bacteria from different climate zones and their application for biocementation of sand. *World J Microbiol Biotechnol.*, Cilt 29(8):1453-60.

Ståhlberg, C., Bastviken, D., Svensson, B. ve Rahm, L., 2006. Mineralisation of organic matter in coastal sediments at different frequency and duration of resuspension. Estuarine, *Coastal and Shelf Science*, Cilt 70(1), 317-325.

Stocks-Fischer, S., Galinat, J. ve Bang, S., 1999. Microbiological precipitation of $CaCO_3$. *Soil Biology and Biochemistry*, Cilt 31(11):1563-1571.

Sumajouw, D. ve Rangan, B., 2006. Low-calcium fly ash-based geopolymer concrete: Reinforced beams and columns, *Report GC 3, Curtin*, Pearth, Australia : *University of Technology.*

TAEK, 2019. https://www.taek.gov.tr/tr/sik-sorulan-sorular/148-malzeme-teknolojisi-sss/948-taramali-elektron-mikroskobu-sem-nasil-calisir.html, *taek.gov.tr*,[Erişildi: ekim 2019].

Tang, H. H. ve Dove, P. M., 1997. Surface site-specific interaction of Aspartate with calcite during dissolution; Implication for biomineralization. *American Mineralogist*, Cilt 82: 878-887.

Tevrizci, M. M., 2010. *Metakaolin katkılı harçların bazı durabilite özelliklerinin incelenmesi..* İzmir: *Dokuz Eylül Üniversitesi*, Fen Bilimleri Ens.

Tobler, D. ve diğerleri, 2011. Comparison of rates of ureolysis between Sporosarcina Pasteurii and an indigenous groundwater community under conditions required to precipitate large volumes of calcite.. *Geochim Cosmochim Acta.*, Cilt 75:3290–3301.

Topçu, İ. ve Bilir, T., 2007. Effects of slag fineness on durability of mortars. *Journal of Zhejiang University-SCIENCE A*, Cilt 8(11): 1725–1730.

Torgal F.P., Gomes, J. ve Jalali, S., 2008. Alkali-activated binders: A review: Part 1. Historical background, terminology, reaction mechanisms and hydration products. *Construction and Building Materials, Cilt* 22(7): 1305-1314.

Umesh, U. ve diğerleri, 2018. Viability of bacterial spores and crack healing in bacteria-containing geopolymer. *Construction and Building Materials,* Cilt 169:716-723.

Uslu, O. ve Türkman, A., 1987. *Su Kirliliği ve Kontrolü.* Ankara: T.C. Başbakanlık Çevre Genel Müdürlüğü Yayınları Eğitim Dizisi.

Uysal, M., Al-mashhadan, M., Aydönmez, Y. ve Canpolat, O., 2018. Effect of using colemanite waste and silica fume as partial replacement on the performance of metakaolin-based geopolymer mortars. *Constructıon And Buıldıng Materıals,* Cilt 176: 271–282.

Vaithiyalingam, S. ve diğerleri, 2014. Biocalcification Mediated Remediation of Calcium Rich Ossein Effluent by Filamentous Marine Cyanobacteria. *Journal of Bioremediation & Biodegradation,* Cilt 5:7.

Van D., J., Provis, J., Brice, D. ve Duxson, P., 2010. Chemical research and climate change as drivers in the commercial adoption of alkali activated materials. *Waste Biomass Valor.,* Cilt 1:145-155.

Van der Ruyt M, V. d. Z. W., 2009. Biological in situ reinforcement of sand in near-shore areas. *ICE Virtual Library,* Cilt 162(1): 81 - 83.

Van Deventer, J., Provis, J. ve Duxson, P., 2012. Technical and commercial progress in the adoption of geopolymer cement.. *Miner. Eng.,* Cilt 29:89-104.

Van Jaarsveld, J. G. S. ve Van Deventer, S. J., 1999. Effect of the Alkali Metal Activator on the Properties of Fly Ash-Based Geopolymers. *Ind. Eng. Chem. Res. , Cilt* 38(10):3932-3941.

Van Tittelboom , K. ve De Belie , N., 2013. Self-Healing in Cementitious Materials—A Review. *Journal of Materials,* Cilt 6: 2182-2217.

Wang, J., 2013. Self-Healing Concrete by Means of Immobilized Carbonate Precipitating Bacteria. *Universiteit Gant,* PHd thesis, http://hdl.handle.net/1854/LU-3158752.

Wang, J., Ersan, Y., Boon, N. ve De Belie, N., 2016. Application of microorganisms in concrete: a promising sustainable strategy to improve concrete durability.. *Applied Microbiology and Biotechnology,* Cilt 100(7): 2993–3007.

Wang, J., Van Tittelboom, K., De Belie, N. ve Verstraete, W., 2012. Use of silica gel or polyurethane immobilized bacteria for self-healing concrete. *Construction and Building Materials,*Cilt 26(1): 532–540.

Whiffin, V., van Paassen, L. ve Harkes, M., 2007. Microbial carbonate precipitation as a soil improvement technique. *Geomi crobiol J,* Cilt 24:417–423.

Wiktor, V. ve Jonkers, H. M., 2011. Quantification of crack-healing in novel bacteria-based self-healing concrete. *Cement and Concrete Composites,* Cilt 33(7): 763-770.

Yang , T., Zhu, . H. ve Zhang,, Z., 2017. Influence of fly ash on the pore structure and shrinkage characteristics of metakaolin-based geopolymer pastes and mortars. *Construction and Building Materials,* Cilt 153:284–293.

Yazıcı, Ş., Anuk, D. ve Arel, H., 2010. Metakaolin Kullanımının Harçların Mekanik Özellikleri Üzerine Etkisi. *J. Fac.Eng.Arch.,* Cilt 25(2): 13-24.

Ye, H., Cartwright, C., Rajabipour, F. ve Radlinska, A., 2017. Understanding the drying shrinkage performance of alkali-activated slag mortars. *Cement and Concrete Composites,* Cilt 76:13-24.

Yongjing, W., Duc Truong, P. ve Chunqian, J., 2015. Self-healing composites: A review. *Cogent Engineering,* Cilt 2(1). DOI: 10.1080/23311916.2015.1075686.

Zeybek, O., 2009. *Uçucu Kül Esaslı Geopolimer Tuğla Üretimi.* Eskişehir: *Anadolu Üniversitesi*, Fen Bilimleri Enstitüsü.

Zhang, B., MacKenzie, . K. ve Brown, I., 2009. Crystalline phase formation in metakaolinite geopolymers activated with NaOH and sodium silicate. *J. Mater. Sci.,* Cilt 44: 4668-4676.

Zhang, J. ve Scherer, G. W., 2011. Comparison of methods for arresting hydration of cement. *Cement and Concrete Research*, Cilt 41: 1024–1036.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler	
Adı Soyadı	Berivan POLAT
Doğum Yeri	Elazığ
Doğum Tarihi	23.08.1981
Uyruğu	T.C.
Telefon	0 536 382 68 64
E-Posta Adresi	berivan.y.polat@munzur.edu.tr



Eğitim Bilgileri	
Lisans	
Üniversite	Gümüşhane Üniversitesi
Fakülte	Mühendislik Ve Doğa Bilimleri Fakültesi/ Bölümü/İnşaat
Bölümü	İnşaat Mühendisliği
Mezuniyet Yılı	2017

Lisans	
Üniversite	Fırat Üniversitesi
Fakülte	Teknik Eğitim Fakültesi
Bölümü	Yapı Ressamlığı Öğretmenliği
Mezuniyet Yılı	2003

Yüksek Lisans	
Üniversite	Fırat Üniversitesi
Enstitü Adı	Fen Bilimleri Enstitüsü
Ana Bilim Dalı	Yapı Anabilim Dalı
Programı	Yapı Eğitimi Programı
Mezuniyet Tarihi	2009

Doktora	
Üniversite	İstanbul Üniversitesi
Enstitü Adı	Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Ana Bilim Dalı	İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
Programı	İnşaat Mühendisliği Programı
Mezuniyet Tarihi	2019

Makale ve Bildiriler
Esen Y., Yilmazer B., (2011). An investigation of X ray and radio isotope energy absorption of heavyweight concretes containing barite, *Bulletin of Materials Science*, 34(1), 169-175. Esen Y., Yilmazer B., (2010), Investigation of sone physical and mechanical properties of concrete produced with barite aggregate, *Scientific Research and Essays*, 5(24), 3826-3833. Esen Y., Yilmazer B., (2008). Poliakrilonitril Lifinin Betonda Kullanımının Araştırılması. *Türkiye Hazır Beton Birliği*, Uluslararası Beton Kongresi Bildirileri, 645-651. Esen Y., Yilmazer B., (2007). Giydirme Cephede Kullanılan Kompozit Levha ile Kompakt Laminat Panellerin Karşılaştırmalı İncelemesi, *Orta Doğu Araştırmaları Dergisi*, 6(1), 103-106. Polat B., Erdem N.S., Polat A., (2017). Güneydoğu Anadolu Bölgesi için İnşaat Sektöründeki İş Güvenliği Koşullarının İncelenmesi, *International Journal of Pure and Applied Sciences*, 3(2), 68-78., Doi: 10.29132/ijpas.341909. Polat B., Polat A. (2017), İnşaat Sektöründe Doğu Anadolu Bölgesi İçin İş Güvenliği Koşullarının İncelenmesi. *International Journal of Pure and Applied Science*, 3(1), 24-32. Onat O., Gönen T., Polat B., Altuncu Y.T., (2012) Beton Teknolojisi İçin Yeni Atık Malzemeler Üzerine Bir İnceleme, *Yapı Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 8(1), 36-43. (Tam Metin Bildiri/) Uysal M., Polat B., (2017). Vişne Çürüğü Mermer Tozu Kullanımının Aşınma ve Geçirimlilik Özelliklerine Etkisi. *IV. International Multidisciplinary Congress of Eurasia* (Tam Metin Bildiri/Sözlü Sunum) Uysal M., Polat B., (2017). Vişne Çürüğü Mermer Tozu Kullanılarak Üretilen Renkli Betonların Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi. *IV. International Multidisciplinary Congress of Eurasia*, 371-376. (Tam Metin Bildiri/Sözlü Sunum)