

**T.C.
İNÖNÜ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**BAKTERİ ESASLI KENDİNİ ONARMA SİSTEMİNİN GEOPOLİMER
HAMUR VE HARÇLARIN PERFORMANSINA ETKİSİ**

DOKTORA TEZİ

Enes EKİNCİ

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. İbrahim TÜRKMEN

MAYIS 2022

**T.C
İNÖNÜ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**BAKTERİ ESASLI KENDİNİ ONARMA SİSTEMİNİN GEOPOLİMER
HAMUR VE HARÇLARIN PERFORMANSINA ETKİSİ**

DOKTORA TEZİ

**Enes EKİNCİ
(36173621020)**

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. İbrahim TÜRKMEN

MAYIS 2022

TEŞEKKÜR VE ÖNSÖZ

Bu tez çalışmasının her aşamasında yardım, öneri, bilgi, tecrübe ve desteklerini esirgmeden beni her konuda yönlendiren danışman hocam Sayın Prof. Dr. İbrahim TÜRKMEN'e,

Tez çalışmama bilgi ve tecrübeleriyle büyük katkı sağlayarak çalışmanın tüm aşamalarında desteğini gördüğüm Sayın Prof. Dr. Emre BİRHANLI ve Sayın Prof. Dr. Mehmet Burhan KARAKOÇ'a;

Çalışmalarımda ayrıca tüm hayatım boyunca olduğu gibi bu çalışmalarım süresince de benden her türlü desteklerini esirgemeyen aileme,

Tez çalışmamın her anında desteklerini esirgemeyen hocalarım Dr. Talha SARICI, Dr. Müslüm Murat MARAŞ, Dr. Fatih KANTARCI, Arş. Gör Alper ÖZMEN ve Dr. Enes GÜL'e,

Laboratuvar teknisyenimiz Sn. İlhami BAYSAL'a,

FDK-2020-2156 kodlu proje kapsamında tezime maddi destek sağlayan İnönü Üniversitesi BAP birimine

teşekkür ederim.

ONUR SÖZÜ

Doktora tezi olarak sunduğum “Bakteri Esaslı Kendini Onarma Sisteminin Geopolimer Hamur ve Harçların Performansına Etkisi” başlıklı bu çalışmanın bilimsel ahlak ve geleneklere aykırı düşecek bir yardıma başvurmaksızın tarafımdan yazıldığına ve yararlandığım bütün kaynakların hem metin içinde hem de kaynakçada yöntemine uygun biçimde gösterilenlerden oluştuğunu belirtir, bunu onurumla doğrularım.

Enes EKİNCİ



İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR VE ÖNSÖZ	i
ONUR SÖZÜ	ii
İÇİNDEKİLER.....	iii
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	vii
SEMBOLLER VE KISALTMALAR	x
ÖZET.....	xi
ABSTRACT	xii
1. GİRİŞ.....	1
1.1 Tezin Amacı.....	2
2. KAYNAK ÖZETLERİ	4
2.1 Beton.....	4
2.2. Çimentodan Kaynaklanan Çevre Problemleri	5
2.3. Geopolimer	6
2.3.1. Geopolimer üretiminde kullanılan puzolanik malzemeler	8
2.3.2. Geopolimer üretiminde YFC kullanımı.....	10
2.3.3. Geopolimer üretiminde kullanılan alkali aktivatör tipleri	12
2.3.4. Geopolimerin avantajları	13
2.3.5. Geopolimer uygulamaları	14
2.4. Bakteriler Hakkında Genel Bilgiler	15
2.4.1. Bakterilerin sınıflandırılması.....	16
2.4.1.1. Geometrik şekillerine göre sınıflandırma	16
2.4.1.2. Beslenme şekillerine göre sınıflandırma	17
2.4.1.3. Solunum şekillerine göre sınıflandırma.....	18
2.4.1.4. Gram boyama metoduna göre sınıflandırma	18
2.5. Beton Çatlakları	19
2.6. Betonda Oluşan Çatlakların Önlenmesi ve İyileştirilmesi.....	24
2.6.1. Otojen iyileştirme	24
2.6.2. Otonom iyileştirme	25
2.7. Kendini Onaran Beton	26
2.7.1 Kendini onarma mekanizması	26
2.7.2. Bakteri bazlı kendini onaran betonlar.....	27
3. MATERYAL ve METOD.....	37
3.1 Çalışmada Kullanılan Malzemeler	37
3.1.1. Geopolimer hamur ve harç üretiminde kullanılan malzemeler	37
3.1.1.1. Öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu (YFC)	37
3.1.1.2. Agrega	38
3.1.1.3. Sodyum silikat	38
3.1.2. Bakteri üretiminde kullanılan malzemeler	39
3.1.2.1. <i>Bacillus subtilis</i>	39
3.1.2.2. Üre	40
3.1.2.3. Nutrient agar	40
3.1.2.4. Nutrient broth	41
3.1.2.5. Kalsiyum nitrat tetrahidrat	41
3.1.2.6. Maya özü	42
3.2. Deneysel Çalışma	43
3.2.1. Bakteri kültür üretimi	43
3.2.2. Ön deney süreci	46
3.2.3. Geopolimer hamur örneklerinin üretimi.....	49

3.2.4. Geopolimer harç örneklerinin üretimi	51
3.2.5. Yapılan deneyler.....	53
3.2.5.1. Basınç dayanımı tayini	53
3.2.5.2. Viskozite tayini.....	53
3.2.5.3. Geopolimerizasyon ısı tayini	54
3.2.5.4. Görsel inceleme	55
3.2.5.5. Mikro yapısal inceleme	56
3.2.5.6. Fiziksel ölçümler	56
3.2.5.7. Sülfat direnci tayini	58
3.2.5.8. Asit direnci tayini	58
3.2.5.9. Rebound testi	58
3.2.5.10. Elektriksel özdirenç deneyi	59
3.2.5.11. Mini slump deneyi	60
3.2.5.12. Yarmada çekme dayanımı	61
4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA	62
4.1. Geopolimer Hamur	62
4.1.1. Geopolimer hamur örneklerinin basınç dayanımı	62
4.1.1.1. Bakteri/ bağlayıcı oranının basınç dayanımına etkisi.....	62
4.1.1.2. Bakteri konsantrasyonunun basınç dayanımına etkisi.....	64
4.1.1.3. Uygulanan kür rejiminin basınç dayanımı gelişimine etkisi	65
4.1.1.4. 7 ve 28 gün arasında meydana gelen basınç dayanımı değişimleri... 67	
4.1.2. Geopolimer hamur örneklerin reolojik özellikleri.....	68
4.1.3. Geopolimer hamur örneklerin geopolimerizasyon kinetiği.....	70
4.1.4. Çatlak onarım performansının mikroskop yardımıyla gözlemlenmesi ... 73	
4.1.5. Geopolimer hamur örneklerin mikroyapı analizleri	77
4.1.6. Geopolimer hamur örneklerinin fiziksel özellikleri	85
4.2. Geopolimer Harç	88
4.2.1. Geopolimer harç örneklerin basınç dayanımı.....	88
4.2.1.1. Bakteri/bağlayıcı oranının basınç dayanımına etkisi.....	89
4.2.1.2. Bakteri konsantrasyonunun basınç dayanımına etkisi.....	90
4.2.1.3. Uygulanan kür rejiminin basınç dayanımına etkisi	91
4.2.1.4. 7 ve 28 gün arasında meydana gelen basınç dayanımı değişimleri... 93	
4.2.2. Geopolimer harç örneklerinin elektriksel özdirenç	95
4.2.2.1. Bakteri/bağlayıcı oranının elektriksel özdirenç üzerine etkisi	95
4.2.2.2. Bakteri konsantrasyonunun elektriksel özdirenç üzerine etkisi	96
4.2.2.3. Uygulanan kür rejiminin elektriksel özdirenç üzerine etkisi.....	97
4.2.3. Geopolimer harç örneklerin yarmada çekme dayanımı.....	98
4.2.3.1. Bakteri/bağlayıcı oranının yarmada çekme dayanımına etkisi.....	98
4.2.3.2. Bakteri konsantrasyonunun yarmada çekme dayanımına etkisi.....	100
4.2.3.3. Uygulanan kür rejiminin yarmada çekme dayanımına etkisi	101
4.2.4. Geopolimer harç örneklerinin asite karşı dayanıklılığı	102
4.2.5. Geopolimer harç örneklerin sülfata karşı dayanıklılığı	103
4.2.5.1. Sülfat etkisi sonrası basınç dayanımı	103
4.2.5.2. Sülfat etkisi sonrası ağırlık değişimi	105
4.2.6. Geopolimer harç örneklerinin darbe dayanıklılığı	106
4.2.7. Geopolimer harç örneklerinin kılcal su emme değerleri	106
4.2.8. Geopolimer harç örneklerinin mikro yapısı	110
4.2.9. Geopolimer harç örneklerin fiziksel özellikleri.....	133
5. SONUÇLAR ve ÖNERİLER.....	137
KAYNAKLAR.....	142



ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2. 1 Çatlak tiplerinin sınıflandırılması, (Baradan ve diğ, 2010).....	21
Çizelge 3. 1 Öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufunun kimyasal kompozisyonu	37
Çizelge 3. 2 Sodyum silikatın fiziksel ve kimyasal özellikleri.	39
Çizelge 3. 3 Ön deneylerde kullanılan numune içerikleri	48
Çizelge 3. 4 Geopolimer hamur numunelerin karışım oranları.....	50
Çizelge 3. 5 Geopolimer harç numunelerin karışım oranları	52



ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1	Çimento üretiminden kaynaklanan CO ₂ gazı emisyonu	6
Şekil 2.2	Dünyada üretilen toplam çimento miktarı.....	6
Şekil 2.3	Geopolimer ve geleneksel Portland çimentosunun molekül yapısı	8
Şekil 2.4	Farklı bağlayıcı malzemelerin özgül yüzey alanları ve parçacık boyutları	10
Şekil 2.5	Geopolimer beton uygulama örnekleri.....	15
Şekil 2.6	Kokus (küre şeklinde) bakteri türü.....	16
Şekil 2.7	Çubuk şeklinde bakteriler	16
Şekil 2.8	Spiral şeklinde bakteriler.....	17
Şekil 2.9	Virgül şeklinde bakteriler.....	17
Şekil 2.10	Gram pozitif bakterinin mikroskop görüntüsü.....	18
Şekil 2.11	Gram negatif bakterinin mikroskop görüntüsü	19
Şekil 2.12	Betonarme elemanlarda çatlakların oluşum yerleri ve biçimleri	23
Şekil 3. 1	Öğütülmüş yüksek fırın cürufu	37
Şekil 3. 2	İnce agrega	38
Şekil 3. 3	Sodyum silikat.....	39
Şekil 3. 4	<i>Bacillus Subtilis</i> sıvı kültürü	40
Şekil 3. 5	Bakteri üretiminde ve kür ortamında kullanılan üre	40
Şekil 3. 6	Bakteri üretiminde kullanılan nutrient agar	41
Şekil 3. 7	Bakteri üretiminde kullanılan nutrient broth.....	41
Şekil 3. 8	Çökeltme ortamının oluşturulmasında kullanılan kalsiyum nitrat tetrahidrat	42
Şekil 3. 9	Çökeltme ortamının oluşturulmasında kullanılan maya özü.....	42
Şekil 3. 10	<i>Bacillus subtilis</i> katı kültürü.....	43
Şekil 3. 11	Besiyeri hazırlanma işlemlerinde kullanılan saf suyun üretildiği saf su cihazı	44
Şekil 3. 12	Alp marka dik tip otoklav	44
Şekil 3. 13	İnkübatör	45
Şekil 3. 14	10 ⁹ CFU/mL (a) ve 10 ⁷ CFU/mL (b) konsantrasyona sahip <i>Bacillus subtilis</i> sıvı kültürleri	45
Şekil 3. 15	Bakteri sporlarının mikroskopik görüntüsü (1500 kez büyütülmüş)	46
Şekil 3. 16	Üretilen geopolimer harç numuneleri	51
Şekil 3. 17	Basınç dayanımı test cihazı.....	53
Şekil 3. 18	Viskozite deney aleti	54
Şekil 3. 19	İzotermal kalorimetre cihazı	55
Şekil 3. 20	Optik mikroskop	55
Şekil 3. 21	Geopolimer numunelerin etüv kurusu haline getirilmesi.....	58
Şekil 3. 22	Rebound test mekanizması.....	59
Şekil 3. 23	Elektriksel dirençlerin ölçülmesi için hazırlanan geopolimer harç numuneleri	60
Şekil 3. 24	Mini-slump deneyi	61
Şekil 3. 25	Yarmada çekme dayanımı	61
Şekil 4. 1	Geopolimer hamur numunelerin 7 günlük basınç dayanımı değerleri.....	63
Şekil 4. 2	Geopolimer hamur numunelerin 28 günlük basınç dayanımı değerleri.....	64
Şekil 4. 3	Bakteri konsantrasyonunun 28 günlük basınç dayanımı değerlerine etkisi	65
Şekil 4. 4	Uygulanan kür rejiminin 28 günlük basınç dayanımı gelişimine etkisi.....	67
Şekil 4. 5	7 ve 28 gün arasında basınç dayanımı değerlerinde meydana gelen değişimler.	68
Şekil 4. 6	Referans ve 10 ⁹ CFU/mL konsantrasyona sahip örneklerin görünür viskozite değerleri.....	69
Şekil 4. 7	Referans ve 10 ⁷ CFU/mL konsantrasyona sahip örneklerin görünür viskozite değerleri.....	69

Şekil 4. 8 Geopolimer hamur örneklerin mini-slump test sonuçları	70
Şekil 4. 9 Referans örneğin geopolimerizasyon ısısı eğrisi.....	72
Şekil 4. 10 10^7 CFU/mL konsantrasyona sahip, bakteri/bağlayıcı oranı %2 olan örneğin geopolimerizasyon ısısı eğrisi	72
Şekil 4. 11 10^9 CFU/mL konsantrasyona sahip, bakteri/bağlayıcı oranı %2 olan örneğin geopolimerizasyon ısısı eğrisi	73
Şekil 4. 12 Mikroskop görüntüleri (devam)	76
Şekil 4. 13 Kendini onaran geopolimer hamur numunelerin mikroskopik gözlemleri	84
Şekil 4. 14 Geopolimer hamur örneklerin su emme değerleri	86
Şekil 4. 15 Geopolimer hamur örneklerin görünür gözeneklilik değerleri	87
Şekil 4. 16 Geopolimer harç örneklerin 7 günlük basınç dayanımı değerleri.....	89
Şekil 4. 17 Bakteri/bağlayıcı oranının geopolimer harç numunelerin 28 günlük basınç dayanımına etkisi.....	90
Şekil 4. 18 Bakteri konsantrasyonunun geopolimer harç numunelerin basınç dayanımına etkisi	91
Şekil 4. 19 Uygulanan kür rejiminin geopolimer harç numunelerin basınç dayanımına etkisi	93
Şekil 4. 20 7 ve 28 gün arasında meydana gelen basınç dayanımı değişimleri	94
Şekil 4. 21 Bakteri/bağlayıcı oranının elektriksel özdirenç üzerine etkisi.....	96
Şekil 4. 22 Bakteri konsantrasyonunun elektriksel özdirenç üzerine etkisi.....	97
Şekil 4. 23 Uygulanan kür rejiminin elektriksel özdirenç üzerine etkisi	98
Şekil 4. 24 Bakteri/bağlayıcı oranının yarmada çekme dayanımına etkisi	99
Şekil 4. 25 Bakteri konsantrasyonunun yarmada çekme dayanımına etkisi	101
Şekil 4. 26 Kür rejiminin yarmada çekme dayanımına etkisi	102
Şekil 4. 27 Geopolimer harç numunelerinin asit dayanıklılığı.....	103
Şekil 4. 28 Geopolimer harç numunelerin sülfat dayanıklılığı	104
Şekil 4. 29 Sülfat saldırısı sonucu meydana gelen ağırlık değişimleri.....	105
Şekil 4. 30 Absorbe edilen enerji miktarı.....	106
Şekil 4. 31 Geopolimer harç numunelerinin kılcal su emme katsayıları.....	107
Şekil 4. 32 Geopolimer harç numunelerin 24 saatlik kılcal su emme yüzdeleri	108
Şekil 4. 33 Zamana bağlı kapiler su emme değerleri	109
Şekil 4. 34 Zamana bağlı kapiler su emme yüzdeleri.....	109
Şekil 4. 35 R-A numunesine ait mikro yapısal gözlemler.....	111
Şekil 4. 36 R-W numunesine ait mikro yapısal gözlemler.....	112
Şekil 4. 37 R-N numunesine ait mikro yapısal gözlemler.....	113
Şekil 4. 38 1-A numunesine ait mikro yapısal gözlemler	114
Şekil 4. 39 1-W numunesine ait mikro yapısal gözlemler	115
Şekil 4. 40 1-N numunesine ait mikro yapısal gözlemler	116
Şekil 4. 41 2-A numunesine ait mikro yapısal gözlemler	117
Şekil 4. 42 2-W numunesine ait mikro yapısal gözlemler	118
Şekil 4. 43 2-N numunesine ait mikro yapısal gözlemler	119
Şekil 4. 44 3-A numunesine ait mikro yapısal gözlemler	120
Şekil 4. 45 3-W numunesine ait mikro yapısal gözlemler	121
Şekil 4. 46 3-N numunesine ait mikro yapısal gözlemler	122
Şekil 4. 47 4-A numunesine ait mikro yapısal gözlemler	123
Şekil 4. 48 4-W numunesine ait mikro yapısal gözlemler	124
Şekil 4. 49 4-N numunesine ait mikro yapısal gözlemler	125
Şekil 4. 50 5-A numunesine ait mikro yapısal gözlemler	126
Şekil 4. 51 5-W numunesine ait mikro yapısal gözlemler	127
Şekil 4. 52 5-N numunesine ait mikro yapısal gözlemler	128

Şekil 4. 53 6-A numunesine ait mikro yapısal gözlemler	129
Şekil 4. 54 6-W numunesine ait mikro yapısal gözlemler	130
Şekil 4. 55 6-N numunesine ait mikro yapısal gözlemler	131
Şekil 4. 56 Geopolimer harç örneklerin XRD analizi	132
Şekil 4. 57 Geopolimer harç numunelerinin su emme değerleri	134
Şekil 4. 58 Geopolimer harç örneklerin görünür porozite değerleri	135
Şekil 4. 59 Geopolimer harç örneklerinin geçirimli gözeneklerin hacmi	136



SEMBOLLER VE KISALTMALAR

ρ	: Elektriksel direnç
V	: Voltaj
I	: Akım
YFC	: Öğütülmüş yüksek fırın cürufu
CFU	: Colony-forming unit (Koloni oluşturan birim)
SEM	: Taramalı elektron mikroskobu
EDS	: Enerji Dağılımı X- ışını Spektroskopisi
XRD	: X-Işınları Difraktometresi
A	: Laboratuvar koşullarında kür yöntemi
W	: Suda kür yöntemi
N	: Çökeltme ortamında kür yöntemi
R	: Referans numune
1	: 10^9 :CFU/ml konsantasyonsa sahip % 1 bakteri/bağlayıcı oranında üretilen numune
2	: 10^9 :CFU/ml konsantasyonsa sahip % 2 bakteri/bağlayıcı oranında üretilen numune
3	: 10^9 :CFU/ml konsantasyonsa sahip % 3 bakteri/bağlayıcı oranında üretilen numune
4	: 10^7 CFU/ml konsantasyonsa sahip % 1 bakteri/bağlayıcı oranında üretilen numune
5	: 10^7 CFU/ml konsantasyonsa sahip % 2 bakteri/bağlayıcı oranında üretilen numune
6	: 10^7 CFU/ml konsantasyonsa sahip % 3 bakteri/bağlayıcı oranında üretilen numune

ÖZET

Doktora Tezi

BAKTERİ ESASLI KENDİNİ ONARMA SİSTEMİNİN GEOPOLİMER HAMUR VE HARÇLARIN PERFORMANSINA ETKİSİ

Enes EKİNCİ

İnönü Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

156 + xii sayfa

2022

Danışman: Prof. Dr. İbrahim TÜRKMEN

Bu çalışmada öğütülmüş yüksek fırın cürufu (YFC) kullanılarak üretilen geopolimer hamur ve harç örneklerinin çeşitli performans özelliklerine *Bacillus subtilis* ilavesinin etkileri araştırılmıştır. Ön deneyler kapsamında, farklı geopolimer hamur numunesi içeriği ve kür ortamları gibi parametreler dikkate alınarak, toplam 10 grup numunenin analizleri yapılmıştır. Ön deneylerin tamamlanmasının ardından, ana deneylerde kullanılacak numune içeriği belirlenmiştir. İyileştirici madde olarak *Bacillus subtilis* tip bakterilerin kullanıldığı bu çalışmada, bakteri kültürleri, 10^7 ve 10^9 CFU/mL olmak üzere iki farklı konsantrasyonda üretilmiştir. Ayrıca, bakteri/bağlayıcı oranı ise % 1, 2 ve 3 olarak seçilmiştir. Yalnızca sodyum silikat (Na_2SiO_3) kullanılarak aktive edilen geopolimer kompozitler için, toplam sıvı/bağlayıcı oranı geopolimer hamur örneklerinde 0.4, geopolimer harç örneklerinde ise 0.55 olarak sabit tutulmuştur. Bakteri sıvı kültürlerinin taze karışımlara direkt olarak eklendiği tüm örnekler, ilk 7 gün laboratuvar şartlarında kür edilmiş, 7. günün sonunda ise üç farklı kür ortamına (çökeltme ortamı, su kürü ve ortam koşulları) bırakılmıştır. Taze ve sertleşmiş durumdaki geopolimer kompozitler üzerinde bakteri konsantrasyonu, bakteri dozajı ve kür şartlarının etkisini incelemek amacıyla birçok mekanik, geçirimsizlik ve durabilite testleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen bulgular, mikrobiyal kaynaklı kendini onarma mekanizmasının geopolimer kompozitlerin performansını önemli ölçüde arttırdığını ortaya koymuştur. Bakteri dozajı açısından optimum değerler ise geopolimer hamur örneklerde %1, geopolimer harç örneklerde ise %3 olarak belirlenmiştir. Sonuçlar, ayrıca, bakterilerin karışıma direkt olarak ilave edilmesi halinde, verimli bir kendini onarma işlemimin ancak üre ve kalsiyum içeren uygun bir kür ortamı (çökeltme ortamı) ile sağlanabileceğini göstermiştir. Öte yandan, elde edilen tüm deney sonuçları, mikro yapısal gözlemler ile doğrulanmıştır. Kendini onarma yeteneğine sahip olduğu düşünülen tüm grup örneklerin SEM görüntüleri belirgin kalsiyum karbonat (CaCO_3) oluşumlarını göstermiştir. Benzer şekilde, EDS analizi sonuçları da bu örnek gruplarında CaCO_3 oluşumuna işaret eden üç ana elementin (Ca, C ve O) yüksek atomik oranlarda yer aldığını ortaya çıkarmıştır. Ayrıca XRD analizi sonuçları kendini onaran geopolimer harç örneklerinde belirgin kalsit piklerinin varlığını doğrulamıştır.

Anahtar Kelimeler: Geopolimer, *Bacillus subtilis*, durabilite, geçirimsizlik, basınç dayanımı

ABSTRACT

PhD. Thesis

THE EFFECT OF BACTERIA-BASED SELF-HEALING SYSTEM ON THE PERFORMANCE OF GEOPOLYMER PASTES AND MORTARS

Enes EKİNCİ

Inonu University
Graduate School of Nature and Applied Sciences
Department of Civil Engineering

156 + xii sayfa

2022

Supervisor: Prof. Dr. İbrahim TÜRKMEN

In this study, the effects of *Bacillus subtilis* addition on various performance properties of geopolymer paste and mortar samples produced using ground blast furnace slag (GBFS) were investigated. Within the scope of the pre-tests, a total of 10 groups of samples were analyzed, taking into account the parameters such as different sample content and curing mediums. After completion of pre-tests, the sample content to be used in the main experiments was determined. In this study, in which *Bacillus subtilis* was used as a healing agent, bacteria were produced at two different concentrations (10^7 and 10^9 CFU/mL). Bacteria/binder ratio was also selected as 1, 2 and 3 %. For geopolymer composites activated only by using Na_2SiO_3 , the total liquid/binder ratio was kept constant as 0.4 and 0.55 for geopolymer paste and mortar samples, respectively. All of samples, in which bacterial liquid cultures were added directly to the fresh mixtures, were cured under laboratory conditions for the first 7 days, and at the end of the 7th day, they were left in three different curing mediums (precipitation medium, water and ambient conditions). Many mechanical, permeability and durability tests were carried out to examine the effects of bacterial concentration, bacterial dosage and curing conditions on fresh and hardened geopolymer composites. The obtained findings revealed that the microbial-induced self-healing mechanism significantly increased the performance of geopolymer composites. Optimum values in terms of bacterial dosage were determined as 1% and 3% for geopolymer paste and mortar samples, respectively. The results also showed that in case of the addition of bacteria directly to the mix, efficient self-healing can only be achieved with a suitable curing medium containing urea and calcium. On the other hand, all the experimental results obtained were confirmed by microstructural observations. SEM images of all group samples thought to be capable of self-healing showed significant CaCO_3 formations. Similarly, the results of the EDS analysis revealed that the three main elements (Ca, C and O) that point to the formation of CaCO_3 are located in high atomic ratios in these sample groups. In addition, XRD analysis results confirmed the presence of prominent calcite peaks in the self-healing geopolymer mortar samples.

Keywords: Geopolymer, durability, permeability, *Bacillus subtilis*, compressive strength

1. GİRİŞ

Günümüzde, sürekli gelişen sanayileşme ve kentleşme faaliyetlerinin betona olan talebi günden güne arttırdığı bilinmektedir. Şöyle ki, beton kullanılarak üretilen herhangi bir yapı ile muhatap olmadığımız tek bir günün dahi olmadığı söylenebilir. Hatta betonun günlük hayatımızda kapladığı yeri, onu tanımlamak için söylenen “suyun ardından insanlar tarafından en çok kullanılan malzemedir” ifadesi ile birlikte düşünecek olursak bu yapı malzemesinin ne kadar önemsenmesi gerektiği ve hakkında maksimum bilgi sahibi olmanın ne kadar zorunlu olduğu ortaya çıkmaktadır.

Betonun popüleritesinin bu denli yüksek olması, üretimi ve kullanımı aşamalarında beraberinde getirdiği birtakım avantajlardan kaynaklanmaktadır. Bu avantajlar; i) başlangıçtaki plastik kıvamı nedeniyle istenilen şeklin verilebilmesi, ii) çelik donatılar ile çok iyi aderans kabiliyetine sahip olması, iii) oldukça yüksek basınç dayanımı değerlerine erişebilmesi şeklinde özetlenebilir. Bahsedilen bu avantajların yanı sıra, beton üretiminde kullanılan çimentonun çevre kirliliğine neden olması, betonun özellikle çekme ve eğilme yükleri altında kolayca çatlayabilmesi, sahip olduğu gevrek yapısı ve geçirimsizlik özellikleri ise başlıca olumsuz özelliklerini oluşturmaktadır.

Öte yandan, betonun kalıcılığını olumsuz şekilde etkileyen, taze ve sertleşmiş betonda meydana gelebilen çatlakların çeşitli oluşum nedenleri vardır. Beton bünyesinde gerçekleşen birtakım reaksiyonlar, beton içine gömülü donatı parçalarının genişmesi ve dış etkiler nedeniyle oluşabilecek bu çatlakların oluşum zamanları ise büyük ölçüde farklılık göstermektedir. Ne zaman ve nasıl oluştuğuna bakılmaksızın, meydana gelen tüm çatlakların onarılması ve bu sayede betonda yüksek durabilitenin sağlanması ise hayati bir önem arz etmektedir.

Betonda, hidrate olmamış çimento partiküllerinin devam eden hidratasyonu sonucu gözlenen otojen iyileşme ve dış bir iyileştirici madde eklenmesi yoluyla elde edilen otonom iyileştirme yöntemleri kullanılarak çatlakların onarım işlemi gerçekleştirilmektedir. Bu kendini onarma

yöntemlerinden en dikkat çekici olanı ise mikrobiyal kaynaklı CaCO_3 çökeltilmesi oluşturmak suretiyle çatlakların onarılması işlemidir. Bahsedilen bu biyokimyasal onarım sürecinde; üreyi $(\text{CO}(\text{NH}_2)_2$, amonyum (NH_4) ve karbonata (CO_3^{-2}) dönüştüren negatif yüklü hücre duvarına sahip bakteri türleri katyonları (Ca^{+2}) çekmektedir. Negatif yüklü hücre duvarında biriken Ca^{+2} iyonları ise daha sonra CO_3^{-2} ile reaksiyona girerek CaCO_3 oluşturmaktadır. Üreolitik bakterilerin rutini olan bu reaksiyon basamakları, yapı elemanlarında oluşabilecek çatlakların herhangi bir dış etkiye ihtiyaç duymadan kendi kendine onarılmasını sağlayarak, özellikle geçirgenlik başta olmak üzere yapı elemanlarının hemen her özelliği üzerinde birçok olumlu etki sağlamaktadır. Bahsedilen bu olumlu etkilerin temelinde ise CaCO_3 çökeltilmesinin boşluklar üzerindeki dolgu etkisinden kaynaklandığı belirtilmelidir.

Diğer yandan, betonun temel yapı taşı olan çimento üretiminden kaynaklı çevresel problemleri minimize edebilmek, endüstriyel faaliyetler sonucu yan ürün olarak açığa çıkan malzemeleri üretime kazandırmak, böylece çevre dostu ve ekonomik bir yapı malzemesi üretimi gerçekleştirmek amacıyla geopolimer adı verilen yeni nesil bir bağlayıcı ile ilgili araştırmalar da son yıllarda sıklıkla sürdürülmektedir.

1.1 Tezin Amacı

Bu tezin amacı, öğütülmüş yüksek fırın cürufunun (YFC) bağlayıcı malzeme olarak kullanıldığı ve Na_2SiO_3 kullanılarak aktive edilen geopolimer hamur ve harç numunelerinde farklı konsantrasyon ve dozajlarda *Bacillus subtilis* ilavesiyle kendini onarma kapasitesini incelemektir. Bu amaçla, farklı numune içerikleri ve kür ortamlarının değişken olarak belirlendiği toplam 10 deney grubu ön deneylere tabi tutulmuştur. Dökümü takip eden 7. günün sonunda basınç gerilmeleri ile farklı büyüklüklerde çatlaklar oluşturulan deney grupları, 28. günün sonuna dek farklı kür şartlarında (çökeltme ortamı, su kürü ve ortam koşulları) bekletilmiştir. Gerçekleştirilen mikro yapısal analizler (SEM-EDS) ve mikroskobik gözlemler sonucunda, çatlak onarımı gerçekleşen numuneler arasında ana deneylerde kullanılacak numune içeriğine ve uygulanacak kür yöntemlerine karar verilmiştir.

Daha sonra, iki farklı konsantrasyona sahip *Bacillus subtilis* ilavesi ile üretilen geopolimer hamur ve harç numunelerinde üç farklı bakteri/bağlayıcı oranı ve üç farklı kür yönteminin kendini onarma kapasitesi üzerindeki etkileri detaylı olarak incelenmiştir. Geopolimer hamur numuneleri üzerinde basınç dayanımı, viskozite ölçümü, mini-slump testi, geopolimerizasyon kinetiğinin belirlenmesi, mikroskobik gözlemler, geçirimsizlik özellikleri ve mikro yapısal (SEM-EDS) analizler gerçekleştirilmiştir. Geopolimer harç örnekleri üzerinde ise, basınç dayanımı, elektriksel özdirenç, yarmada çekme dayanımı, asit direnci, sülfat direnci, darbe dayanıklılığı, kılcal su emme ve geçirimsizlik özelliklerinin belirlenmesi amacıyla deneyler tamamlanmıştır. Elde edilen tüm deneysel bulgular ise mikro yapı analizleri (SEM, XRD ve EDS) ile doğrulanmıştır.

Tez çalışması sonucunda elde edilen bulgular ışığında, geopolimer hamur ve harç numunelerinde uygun bakteri/bağlayıcı oranı, bakteri konsantrasyonu ve kür rejimi seçimi ile verimli bir kendini onarma mekanizmasının sağlanabileceği saptanmıştır. Mikrobiyal kaynaklı kendini onarma mekanizmasını sayesinde, geopolimer kompozitlerin mekanik özelliklerinde çok önemli artışlar gözlenmiş, dayanıklılık performansları da referans numune gruplarına kıyasla oldukça yüksek seviyelere çıkmıştır. Birçok farklı parametre dikkate alınarak üretilen kendini onaran geopolimer kompozit üretimiyle birlikte; çok ciddi miktarlarda CO₂ gazı salınımına neden olan çimentonun kullanılmadığı, çevre dostu, yüksek mekanik ve durabilite özelliklerine sahip ve bünyesinde oluşacak çatlakları onarabilen yenilikçi bir yapı malzemesinin varlığından söz etmek mümkün olmuştur.

2. KAYNAK ÖZETLERİ

2.1 Beton

Beton küresel anlamda açık ara en yaygın, en önemli ve çok yönlü olarak kullanılabilen bir yapı malzemesidir. Sahip olduğu önemli avantajlar sebebiyle bu mertebeye ulaşmış olan beton, uygun tasarım, üretim ve bakım aşamalarının düzgün yapılması halinde ekonomik ömrü çok yüksek, üstün mekanik özelliklere sahip, maliyeti nispeten düşük, dayanıklılığı yüksek bir ürün olarak karşımıza çıkmaktadır. İstenilen her geometride üretilip, hemen her iklim şartlarında kullanımı mümkün olan bir yapı malzemesi olan beton sahip olduğu bu özellikler sayesinde popülaritesini kaybetmemektedir.

Agrega, çimento, su ve gerektiğinde çeşitli katkı maddelerinin birlikte karıştırılması sonucu oluşan betonun plastik kıvamını korumuş olduğu süredeki durumuna taze beton, katılma olayından sonra gerçekleşen durumuna ise sertleşmiş beton adı verilmektedir. Bahsedilen bu iki durumda da betondan beklenen birtakım performans ölçütleri bulunmaktadır. Taze betondan beklenen performans kriterleri arasında kolayca karılabilme, taşınabilme, yerleştirme, sıkıştırma ve yüzey düzeltme işlemleri için yeterli sürenin bulunması gibi maddeler yer alırken, sertleşmiş betondan ise belirli günlerde hedef dayanımın altında bir dayanıma sahip olmaması, yıpratıcı dış etkiler neticesinde yeterince dayanıklı olması, yeterli hacim sabitliğine sahip olması ve geçirimsiz olması beklenmektedir (Erdoğan, 2007). Ayrıca, betonun dış etkilere karşı dayanıklılığının, sahip olduğu dayanım özelliklerinden daha önemli olduğunu vurgulayan çalışmalar da gerçekleştirilmiştir (ACI Committee, 1997; Woods, 1968).

Betonun içerisine nüfuz edebilecek su, CO₂, oksijen, asit, sülfat ve klorür gibi maddeler sebep oldukları çeşitli reaksiyonlar nedeniyle betonda bozulmalara yol açmaktadırlar. Bahsedilen bu bozulmalar, kapak atma, betonun yumuşaması, çatlak oluşumu, gözeneklerin artması, dayanım kaybı şeklinde ortaya çıkabilmektedir. Bu şekilde yapısı bozulan betonun hizmet ömrü de kısalmaktadır. Bahsedilen bu yıpratıcı etkilere karşı dayanıklılık sağlamak için çeşitli yöntemler var olsa da, betonu korumak amacıyla gerçekleştirilen girişimlerin temelinde geçirimsiz bir beton üretiminin gerçekleştirilmesi yatmaktadır.

Betonarme yapıların durabilitesini etkileyen farklı fiziksel ve kimyasal reaksiyonların temel sebebinin; su ile zararlı maddelerin beton bünyesindeki boşluk ve çatlaklar yoluyla taşınım mekanizması olduğu ifade edilmiştir. Betonun sahip olduğu çatlakların çapı ve dağılımının ise bahsedilen bu taşınım işlemi üzerinde çok önemli bir etkisi olduğu belirtilmiştir. Bu durum, dayanıklılığı yüksek bir beton üretimi için betonun boşluk yapısını iyi tanımak gerektiğini gözler önüne sermektedir (Baradan ve Aydın, 2013).

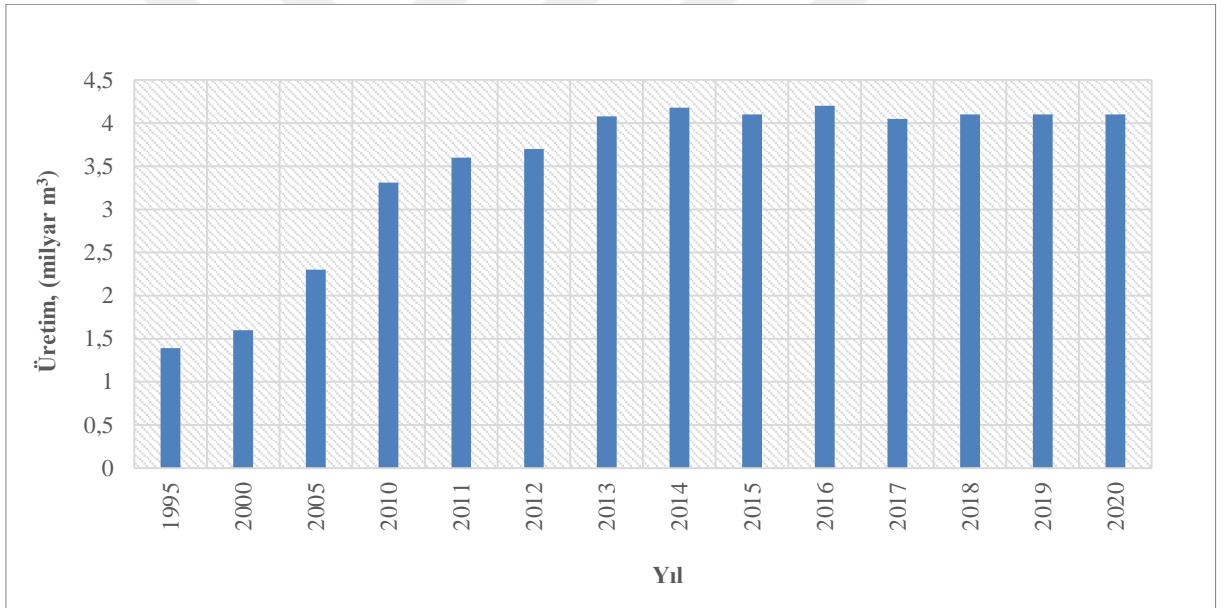
2.2. Çimentodan Kaynaklanan Çevre Problemleri

Endüstriyel anlamda meydana gelen büyük gelişim ve değişimler doğal kaynakların tüketilmesi noktasında en önemli sebep olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu bağlamda, küresel anlamda suyun ardından en çok kullanılan malzeme olarak nitelendirilen (Mathew ve diğ., 2013) betona yönelik talebin artması da yaşanan iklim değişikliklerine ve dünyanın ortalama sıcaklığının yükselmesine neden olmaktadır. Ortaya çıkan bu olumsuz sonuçların temel sebebinin ise betonun en önemli bileşeni olarak nitelendirilen çimentonun varlığı olduğu söylenebilir.

İnşaat sektöründe vazgeçilmez bir yapı malzemesi olarak görülen çimentonun, özellikle son yıllarda, oldukça yüksek bir kullanım kapasitesine sahip olduğu bilinmektedir. 2019 yılında dünyada yıllık 4,1 milyar ton üretimi gerçekleşen çimentonun (US Geological Survey (USGS), 2014) yıllık artış miktarının ise %9 mertebesinde olduğu belirtilmiştir. Bu rakamların yanı sıra, 1 kg çimento üretimi başına yaklaşık 0,81 kg CO₂ gazı salınımının olduğu düşünülürse, çimento üretimi ve kullanımının sürdürülebilir bir yaşam için ne kadar büyük bir tehdit oluşturduğu daha net bir şekilde anlaşılacaktır (Hendriks ve diğ., 2000; Huntzinger ve Eatmon, 2009). Ayrıca, çimento üretiminden açığa çıkan CO₂ salınımının yaklaşık yarısının CaCO₃'ün kalsinasyon işleminden kaynaklandığı, geri kalan kısmının ise çimento üretimi esnasında kullanılan yakıtlardan dolayı meydana geldiği belirtilmiştir (Hendriks ve diğ., 2000; Huntzinger ve Eatmon, 2009; United States. Environmental Protection Agency, 1999). Bu durum, çimento üretiminden kaynaklanan CO₂ gazı emisyonlarının azaltılmasının sadece çevre dostu yakıtların kullanılmasıyla mümkün olmadığını ve çimento hammaddelerinden kaynaklanan çevre sorunlarının önlenemeyeceğini açıkça gözler önüne sermektedir. Şekil 2.1 çimento üretiminden doğaya salınan CO₂ gazı emisyonlarını göstermektedir. Ayrıca, Şekil 2.2'de dünyada yıllık toplam çimento üretimini gösteren bilgiler yer almaktadır.



Şekil 2. 1. Çimento üretiminden kaynaklanan CO₂ gazı emisyonu, (URL 1, greenspec.co.uk)



Şekil 2. 2 Dünyada üretilen toplam çimento miktarı, (URL 2, statista.com)

2.3. Geopolimer

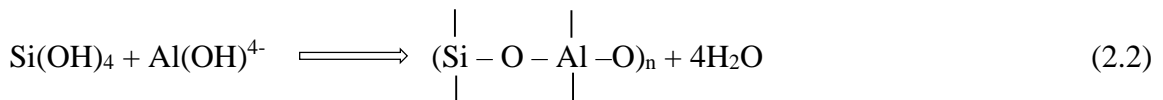
Çimento üretiminde kullanılan hammaddelerden dolayı meydana gelen çevre tahribatının yanı sıra, çimentolu kompozitlerin dış etkilere karşı yeterli dayanıklılığı gösterememesi de çimentoya alternatif yapı malzemelerinin araştırılması noktasında temel bir neden olmuştur (Baradan ve diğ., 2012).

CO₂ gazı salınımından kaynaklanan çevre problemlerinin artması, araştırmacıları geleneksel Portland çimentosuna alternatif teşkil edecek yeni bir bağlayıcı malzemenin varlığını araştırma zorunluluğuna yöneltmiştir. Amorf alümino-silikat hammaddeler ile alkali aktivatörlerin kimyasal reaksiyonları sonucu oluşan geopolimer bağlayıcılar, Portland çimentosu kullanılarak üretilen muadillerine göre daha çevreci alternatifler olarak öne çıkmaktadır (Ouellet-Plamondon ve Habert, 2015; Li ve diğ, 2019; Zhao ve Sanjayan, 2011).

1970’lerde Fransız bilim adamı Davidovits (2008) tarafından geniş bir malzeme yelpazesini tanımlamak üzere literatürde yer bulan geopolimer malzemeler, yıllar içerisinde gittikçe daha çok popüler hale gelen bir araştırma konusu olmuştur. Kireç ve geleneksel Portland çimentosunun ardından üçüncü nesil bağlayıcı olarak kabul edilen geopolimer bağlayıcılar, inorganik polimer, alkali aktive edilmiş çimentolar, alkali bağlı seramikler gibi malzemeler şeklinde de adlandırılmaktadır. Bu farklı isimlendirmelere rağmen, bu terimlerin tümü aynı kimyasal yöntemleri kullanarak sentezlenen bağlayıcıları tarif etmektedir (Duxon ve diğ, 2007; Singh ve diğ, 2015).

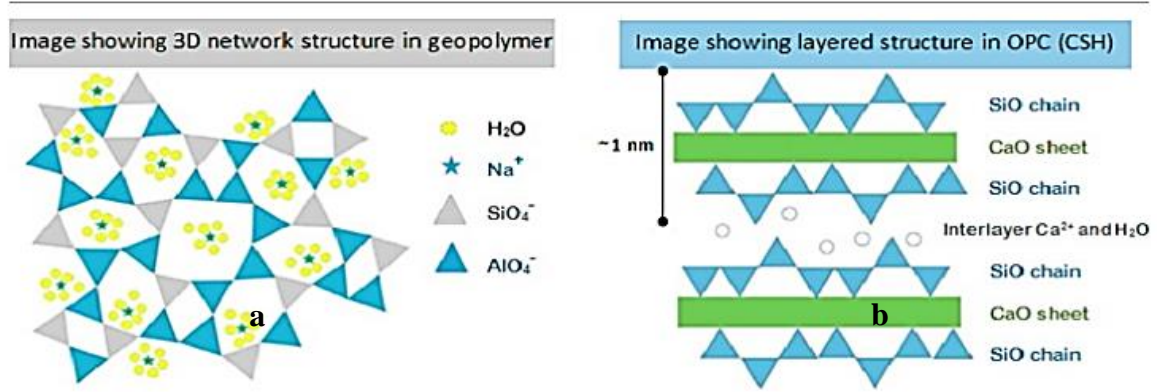
Üç boyutlu polimerik zincir ve halka yapısı oluşumu ile sonuçlanan geopolimerizasyon prosesinin silisyum-alüminyum mineralleri üzerinde ve yüksek alkali koşullar altında önemli ölçüde hızlanan ve Si-O-Al-O bağlarının üç boyutlu polimerik zincirini oluşturan bir kimyasal reaksiyonu içerdiği belirtilmiştir (Rangan, 2008; Aleem ve Arumairaj, 2012; Ma ve diğ, 2018). Geopolimerizasyon prosesi, ayrıca, alümina ve silika açısından zengin atık malzemeleri, mükemmel mekanik özelliklere sahip değerli bağlayıcı malzemelere dönüştürebilen bir işlem olarak da tanımlanmıştır (Kaur ve diğ, 2018).

Geopolimerizasyon reaksiyonu Denklem 1 ve 2’de verilmiştir.



Yukarıda denklemlerden de görüleceği gibi, bünyesinde Si ve Al içeren ve amorf yapıda bulunan herhangi bir malzemenin, geopolimer üretiminde kullanılabileceği söylenebilir. Bu

malzemeler; yapay yolla oluşan endüstriyel yan ürünler (yüksek fırın cürufu, silis dumanı, uçucu kül, metakaolin) olabileceği gibi, doğal yollar ile oluşmuş puzolanik malzemeler de (volkanik tuf, pomza) olabilir. Geopolimer bağlayıcılar ile geleneksel Portland çimentosunun molekül yapıları arasındaki fark Şekil 2.3’de verilmiştir.



Şekil 2. 3 Geopolimer (a) ve geleneksel Portland çimentosunun molekül yapısı (b), (Lahoti ve diğ, 2019)

Ayrıca, geopolimerizasyon sürecinin, bağlayıcı olarak kullanılan ham maddelerin kimyasal kompozisyonundan, kür rejiminden, alkali aktivatör tipi ve konsantrasyonundan büyük ölçüde etkilenen kompleks bir kimyasal reaksiyon olduğu belirtilmiştir (Saloma ve diğ, 2017; Hadi ve diğ, 2019; Zakka ve diğ, 2021).

2.3.1. Geopolimer üretiminde kullanılan puzolanik malzemeler

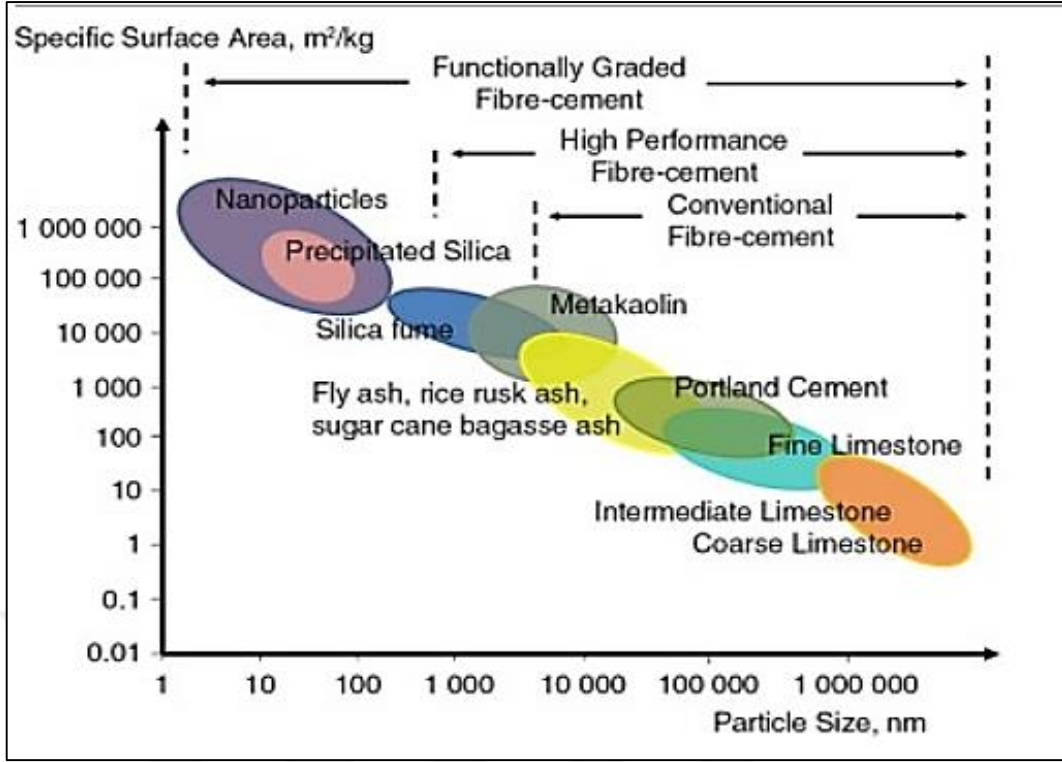
Yapılan literatür taraması sonucunda geopolimer kompozit üretiminde sıklıkla kullanılan başlıca doğal puzolanik malzemeler; pomza (Allahverdi ve diğ, 2008), volkanik tuf Al-Zboon ve diğ, 2016; Ekinci ve diğ, 2019), pişmiş kil (Silva ve diğ, 2019) iken, yüksek fırın cürufu (Kumar ve diğ, 2010; Cheng ve Chiu, 2003), uçucu kül (Rattanasak ve Chindaprasirt, 2009; Olivia ve Nikraz, 2012), metakaolin (Muñiz-Villarreal ve diğ, 2011; Pouhet ve Cyr, 2016) gibi endüstriyel faaliyetler sonucu oluşan yapay puzolanik malzemeler de en çok kullanılan ham maddeler arasında yerini almaktadır.

Geopolimer kompozit üretiminde termik santral ve demir çelik üretim tesislerinin faaliyetleri sonucunda açığa çıkan uçucu kül ve yüksek fırın cürufu gibi puzolanik malzemelerin kullanılması, çimentodan kaynaklı çevresel problemlerin minimize edilmesinin yanı sıra, bu

atık malzemelerin depolanması, taşınması ve bertaraf edilmesi gibi problemleri de ortadan kaldırmaktadır (Pavithra ve diğ, 2016).

Endüstriyel faaliyetlerin ve nüfusun istikrarlı bir şekilde büyümesiyle birlikte yüksek fırın cürufu, pirinç kabuğu külü, uçucu kül gibi endüstriyel atık malzemelerin oluşum miktarları da önemli ölçüde artmaktadır. Sürdürülebilir bir ekonomik kalkınma, temiz bir çevre ve ekonomik üretim prosedürleri gibi hayati girişimlerin gerçekleştirilebilmesi için bu atık malzemelerin beton üretiminde kullanılması önemli bir yer tutmaktadır. Bu atık malzemelerin beton üretiminde kullanılmasıyla çevre kirliliği azaltılacak, atık malzemeler yeniden üretimde değerlendirilmiş olacak ve maliyeti düşük yapı malzemesi üretimi gerçekleştirilmiş olacaktır (Hassan ve diğ, 2020; Van Deventer ve diğ, 2012).

Öte yandan, geopolimer ham maddeleri, Davidovits tarafından tipik büyüklükleri 20 μm 'yi aşmayan 0,54 ila 0,86 g/cm^3 arasında bir gevşek yoğunluğa, 300 m^2/kg ila 500 m^2/kg arasında yüksek bir yüzey alanına, parlak bir doku ve genelde yuvarlak şekle sahip ve zeolitlere benzer şekilde amorf bir mikro yapıya sahip olan bir inorganik malzeme topluluğu olarak tanımlanmıştır (Davidovits, 1999; Amran ve diğ, 2020). Farklı puzolanik malzemelerin sahip olduğu yüzey alanları ve incelikleri ile ilgili bilgiler Şekil 2.4'te verilmiştir.



Şekil 2. 4 Farklı bağlayıcı malzemelerin özgül yüzey alanları ve parçacık boyutları (Sobolev ve Gutiérrez, 2005; Amran ve diğ, 2020)

2.3.2. Geopolimer üretiminde YFC kullanımı

Hematit (Fe_2O_3), magnetit (Fe_3O_4) gibi demir cevherleri doğada demir oksit olarak bulunmaktadır. Demir elde edebilmek amacıyla, demir bahsedilen bu demir cevherlerinin yüksek fırın denilen fırınlarda çok yüksek sıcaklıklarda ($1600\text{ }^\circ\text{C}$ sıcaklığa kadar) ısıtılmaları gerekir. Bu ısıtma işlemi sayesinde demir madeni, oksijen ve diğer yabancı maddelerden arındırılarak kullanıma hazır hale getirilmektedir. Fırında meydana gelen yüksek sıcaklıklar, yakıt olarak kullanılan kömürün karbonu ile demir oksit bünyesindeki oksijeni CO ve CO_2 formunda doğaya salmaktadır. Geride ise, eriyik durumda olan demir ile yine eriyik durumdaki CaO, SiO_2 , Al_2O_3 , MgO, MnO ve S gibi bileşenler kalmaktadır. Geride kalan demirin yoğunluğu, diğer maddelerden daha yüksektir bu da demirin fırının en alt kısmında, geri kalan maddelerin ise demirin üzerinde yerleşmesine sebep olmaktadır. İşte bu şekilde, demirden ayrılan diğer maddeler topluluğuna yüksek fırın cürufu (YFC) adı verilir (Erdoğan, 2017).

Yüksek sıcaklıklarda demir üretimi esnasında bir yan ürün olarak ortaya çıkan YFC, esas olarak kalsiyum, silikat ve alüminoksitlerden oluşmaktadır. Ancak, YFC'nin kimyasal kompozisyonu demir üretiminde kullanılan ham maddeye, fiziksel özellikleri ise erimiş halde bulunan malzemeleri soğutmak için kullanılan soğutma işlemine bağlı olarak değişiklik göstermektedir (El-Chabib, 2020).

Demir çelik üretim tesislerinde bulunan yüksek fırının bir yan ürünü olarak açığa çıkan yüksek fırın cürufu (YFC) yaklaşık 1500 °C sıcaklıklarda elde edilmektedir (Suresh ve Nagaraju, 2015). Bu sıcaklıklarda erimiş halde elde edilen cürufun kimyasal bileşiminin geleneksel Portland çimentosu ile benzerlik gösterdiği (yaklaşık %40 CaO, %30-40 SiO₂) belirtilmiştir. Demir cevherinin demire indirgenmesi esnasında, atık maddelerin demirin üzerinde yüzen bir cüruf oluşturduğu bilinmektedir (Ananthayya ve WP, 2014; Suresh ve Nagaraju, 2015). Eriyik halinde oluşan bu cüruftan YFC elde etmek amacıyla sıvı cürufun su içinde hızlı bir şekilde söndürülmesi gerekmektedir (Sahithi ve Priyanka, 2015). Yukarıda bahsedildiği gibi elde edilen ve sıcaklığı 1500 °C dolaylarında olan YFC, yavaş bir hızla soğutulduğunda kristal yapıya, su içerisine dökülmek suretiyle hızlı bir şekilde soğumaya maruz bırakıldığında ise granüle durumda amorf hale gelmektedir (Erdoğan, 2007).

Üretim işleminden kısaca bahsedilen YFC'nin geopolimer kompozit üretiminde kullanılabilirliği ile ilgili ise birçok çalışma gerçekleştirilmiştir. Örneğin, farklı molaritelerde (8, 12 ve 16 M) NaOH ve Na₂SiO₃'ün aktivatör olarak kullanıldığı uçucu kül ve YFC bazlı geopolimer hamur ve harç örnekleri üzerinde priz süresi ve basınç dayanımı değerlerinin incelendiği bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, üretilen geopolimer harç örneklerinin basınç dayanımı değerlerinin YFC ikame oranı arttıkça arttığını ve benzer şekilde YFC ikame oranının artmasıyla birlikte priz sürelerinde de kayda değer düşüşler yaşandığını göstermiştir (Rao ve Rao 2015).

Uçucu kül ve YFC'nin farklı ikame oranlarında karıştırılmasıyla üretilen geopolimer hamur örneklerinin 7 ve 28 günlük basınç dayanımına etkisinin incelendiği bir çalışmada ise , YFC ikame oranının artmasıyla birlikte 7 ve 28 günlük basınç dayanımı değerlerinin önemli oranlarda artış gösterdiği tespit edilmiştir. Deneysel bulgular, ayrıca, sadece Na₂SiO₃ ile aktive edilen tüm örneklerin (ham madde tipinden bağımsız bir şekilde) 28 günlük basınç

dayanımlarının %85'ten fazlasını ilk 7 günde aldığını göstermiştir (Ekinci ve Türkmen, 2021).

Benzer şekilde, sürdürülebilir bir yapı malzemesi üretimi için YFC ve pirinç kabuğu külünün ham madde olarak tercih edildiği diğer bir çalışmada, % 85 oranında YFC kullanımının ilk 3 günde 69 MPa mertebesinde basınç dayanımına yol açtığı gözlenmiştir (Mehta ve Siddique, 2018).

2.3.3. Geopolimer üretiminde kullanılan alkali aktivatör tipleri

Geopolimer üretiminde katı veya sıvı halde kullanılabilen alkali aktivatörler genelde silikatlar ve hidroksitlerin çözeltilerinin birleştirilmesi şeklinde uygulanmaktadır. Alkali sıvılar, silika ile dört kat koordinasyon içinde bulunan alüminin negatif yükünü dengelemek için alkali aktivatörlerin hazırlanmasında kullanılan, yaygın olarak potasyum (K) veya sodyum (Na) bazlı çözünür alkali metallerle yoğunlaştırılmış sulu alkali hidroksit veya silikat çözeltilerini içermektedir (Shalini ve diğ, 2016). Bahsi geçen bu alkali çözeltiler, Si ve Al bakımından zengin ham maddelerden Si ve Al atomlarını çıkararak ve aktive ederek geopolimer adı verilen yeni nesil bir bağlayıcı malzemeyi üretmektedir (Madheswaran ve diğ, 2013).

Geopolimer üretiminde sıklıkla kullanılan alkali aktivatörler NaOH, KOH, Na_2SiO_3 ve K_2SiO_3 'tür. Bu alkali aktivatörler geopolimer kompozit üretiminde yalnız başına kullanılabildiği gibi birbirleri ile farklı karışım oranlarında karıştırılarak çok bileşenli aktivatör şeklinde de kullanılmaktadır.

Nematollahi ve Sanjayan, (2014) tarafından yapılan bir çalışmada, iki farklı aktivatör çözeltisi (sadece NaOH ve $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ oranı 2,5 olan iki bileşenli) ve altı farklı süper akışkanlaştırıcı kullanılarak üretilen geopolimer hamur numunelerinin işlenebilirlik ve mekanik özellikleri incelenmiştir. Elde edilen deneysel bulgular, $\text{Na}_2\text{SiO}_3+\text{NaOH}$ çözeltisinin kullanıldığı örneklerin daha yüksek basınç dayanımına sahip olduğunu göstermiştir. Sonuçlar ayrıca, görsel inceleme yoluyla, çok bileşenli aktivatör ($\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH} = 2.5$) tarafından aktive edilen uçucu kül bazlı geopolimer hamurun viskozitesinin, NaOH ile aktive edilen uçucu kül bazlı benzerlerine kıyasla çok daha yüksek olduğunu ortaya çıkarmıştır.

Benzer şekilde, Kaur ve diğ. (2018) tarafından yapılan bir çalışmada 12, 14 ve 16 M NaOH ve Na₂SiO₃/NaOH oranı 2:1 olarak tasarlanmış uçucu kül bazlı geopolimer harç örneklerinin 3, 7, 14 ve 28. günlerdeki basınç dayanımları incelenmiştir. Tüm geopolimer harç örnekleri 24 saat boyunca 80 °C kür sıcaklığına maruz bırakılmış ve ardından test gününe kadar oda sıcaklığında bekletilmiştir. Araştırma sonuçları, uçucu kül esaslı geopolimer hamur örneklerinin basınç dayanımının artan NaOH konsantrasyonu ve kür süresiyle artış gösterdiğini ortaya çıkarmıştır. Sonuçlar, ayrıca, aktivatör çözeltisine Na₂SiO₃ eklenmesinin basınç dayanımı değerlerini kayda değer bir şekilde arttırdığını göstermiştir.

Abdul Rahim ve diğ. (2015) tarafından yapılan bir çalışmada ise, araştırmacılar NaOH ve KOH aktivatörlerinin uçucu kül esaslı geopolimer kompozitlerin basınç dayanımına etkisini araştırmışlardır. Elde edilen sonuçlar, en yüksek basınç dayanımı değerlerinin 65.28 MPa ile NaOH ile aktive edilen örneklerden elde edildiğini, KOH ile aktivasyon metodunda ise yalnızca 28.73 MPa değerinin elde edilebildiğini göstermiştir.

Gerçekleştirilen bir diğer çalışmada ise, alkali çözeltilerin türü ve konsantrasyonunun geopolimerizasyon reaksiyonunu yönetme açısından çok önemli bir yere sahip olduğu belirtilmiştir. Özellikle geopolimer örneklerin basınç dayanımı özelliği açısından kullanılan aktivatörlerin aktivasyon potansiyeli (eşit konsantrasyonlar dikkate alınarak) aşağıdaki gibi sıralanmıştır (Komljenović ve diğ. 2010; Singh ve Middendorf, 2020):



2.3.4. Geopolimerin avantajları

Rangan, (2014) tarafından yapılan bir çalışmada, geopolimer betonların geleneksel betonlara göre çeşitli avantajlarının olduğu belirtilmiştir. Örneğin, bir ton uçucu kül veya YFC maliyetinin, bir ton Portland çimentosu maliyetinden çok daha az olduğu ve böylece geopolimer üretiminde kullanılacak alkali sıvıların maliyetini hesaba kattıktan sonra bile, geopolimerler ile benzer performans seviyesine ulaşabilecek geleneksel betonların çok daha yüksek maliyete sahip olacağına altı çizilmiştir. Benzer şekilde, geopolimerlerin sahip olduğu düşük büzülme özelliği, düşük sünme özelliği, sülfat saldırılarına karşı gösterdiği

mükemmel direnç, üst yüzey yangın direnci gibi özelliklerin de geopolimer kompozitlerin sahip olduğu en önemli avantajlardan birkaçı olduğu belirtilmiştir.

Tüm bunların yanısıra, uçucu kül ve YFC gibi endüstriyel yan ürünlerin depolanması sürecinin kullanışlı tarım arazilerini işgaline yol açması ve bu atıkların bertaraf edilmesinin gittikçe daha büyük bir problem haline gelmesi de sürdürülebilir bir çevre için büyük bir tehdit oluşturmaktadır. Bu malzemelerin geri dönüştürülebilir bir formda geopolimer üretiminde kullanılabilirliği ise geopolimerlerin sağladığı en büyük avantajlardan biri olarak karşımıza çıkmaktadır (Pavithra ve diğ, 2016).

2.3.5. Geopolimer uygulamaları

Avustralya'nın Queensland eyaletinde 2014 yılında açılışı gerçekleştirilen Brisbane West Wellcamp Airport (BWWA) Havalimanı'nda 40.000 m³ geopolimer beton uygulaması gerçekleştirilmiştir. Bu değer, bahsedilen havalimanı projesini dünyadaki bu yeni beton sınıfının en büyük uygulama örneği haline getirmiştir. Geopolimer betonun sahip olduğu yüksek çekme mukavemeti, düşük büzülme ve işlenebilirlik özellikleri nedeniyle bu inşaat kaleminde çok uygun olduğu belirtilmiştir. 435 mm kalınlığında dökülen geopolimer ağır hizmet betonu, dönüş düğümü, apron ve taksi yolu olarak hizmet vermeye devam etmektedir (URL 3). Ayrıca, Avustralya'da bulunan Queensland Üniversitesi'nde geopolimer beton kullanılarak inşa edilen 4 katlı Küresel Değişim Enstitüsü binası da Şekil 2.5'de gösterilmiştir.

1994 - 1995 Grand Prix sezonu boyunca, Benetton Formula 1 ekibi, geopolimer kompozitten yapılmış benzersiz bir termal kalkan tasarlamıştır. Tasarım, tüm parçalar egzoz alanının etrafına konuşlanmış ve titanyumun yerini alan özel parçalardan oluşmuştur. Bir Formula 1 otomobilinde görülen şiddetli titreşime ve ısıya (700°C'nin üzerinde) karşı mükemmel derecede dayanıklılık performansı gösteren geopolimer kompozitler günümüzde halen çoğu Formula 1 takımı tarafından kullanılmaktadır (geopolymer.org). Ayrıca, Porsche marka otomobil firması tarafından geopolimer-kompozit bir egzoz borusu sistemi geliştirilmiştir (Porsche PCT Patent, 2004).



Şekil 2. 5 Geopolimer beton uygulama örnekleri, (URL 3)

2.4. Bakteriler Hakkında Genel Bilgiler

Monera alemini oluşturan prokaryot canlıların en çok bilinen sınıfı olan bakteriler, dünyada hemen her yerde bulunmaktadır. Daha çok organik atıkların bol olduğu yerlerde ve sularda yaşayan bakteriler, buzullar içerisinde yaşabildiği gibi 80 °C sıcaklığa sahip kaplıcalarda da yaşamına devam edebilmektedir (Schlegel ve Zaborosch, 1993).

19. yüzyılın sonları, bakteri taksonomisinin başlangıcı olarak kabul edilmiş ve bakteriler fenotipik temelinde sınıflandırılmıştır. Ancak, prokaryotlar ve ökaryotlar arasındaki ayrımlar 1960'larda tanıtılmıştır (Schleifer, 2009). Bakterilerin fenotipik sınıflandırması, onları; gram boyama reaksiyonu, mikroskopik hücresel morfoloji, oksijen gereksinimleri ve endospor oluşturma yeteneklerini içeren tanımlaması kolay birtakım özelliklere dayalı farklı gruplara ayırmıştır (Post, 2019). Öte yandan, 1872 yılında Ferdinand Cohn altı bakteri türünü morfolojisine göre sınıflandıran ilk kişi ünvanını taşımaktadır (Cohn, 1972).

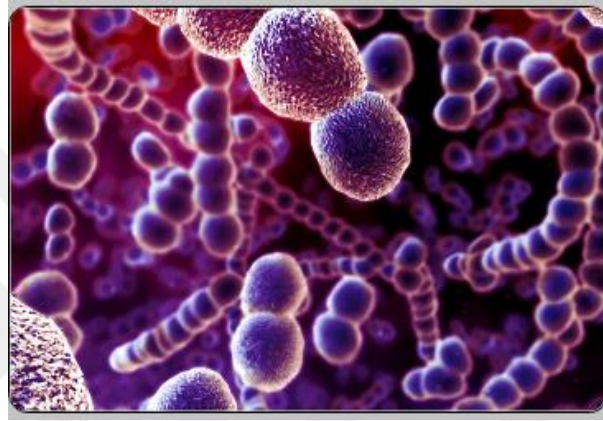
2.4.1. Bakterilerin sınıflandırılması

Bakteriler; türlerine, şekillerine ve yapılarına göre sınıflandırılmaktadır.

2.4.1.1. Geometrik şekillerine göre sınıflandırma

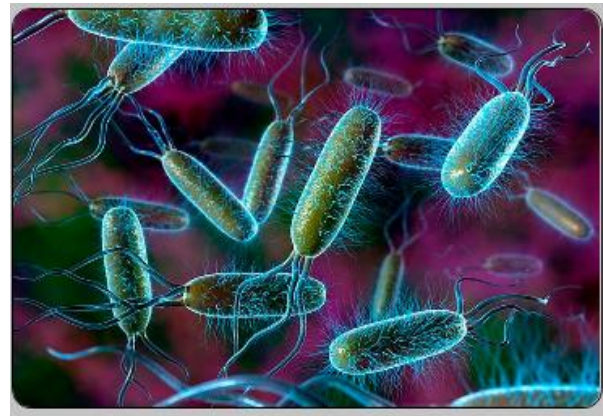
Geometrik şekillerine göre bakteriler dört gruba ayrılırlar:

- *Küre şeklindeki bakteriler*: Tek başına veya toplu ortamda yaşayabilen bakterilerden olan kokus grubunun şekillerinin küre olması bu bakterilerin farklı bir sınıf oluşturması bakımından yeterli olmuştur (Hogg, 2013).



Şekil 2. 6 Kokus (küre şeklinde) bakteri türü, (Hogg, 2013).

- *Çubuk şekilli bakteriler*: Bacillus olarak adlandırılan bu bakteri türleri çubuk türü bir şekle sahiptirler (Hogg, 2013).



Şekil 2. 7 Çubuk şeklinde bakteriler, (Hogg, 2013).

- *Spiral şekilli bakteriler*: Spirillum adı verilen bu bakteri türünün son derece kıvrımlı bir yapısı ve uçlarından iki adet kamçısı bulunmaktadır (Hogg, 2013).



Şekil 2. 8 Spiral şeklinde bakteriler, (Hogg, 2013).

- *Virgül şeklinde bakteriler*: Virgül şeklinde olan bu bakterilere vibrio adı verilmektedir (Hogg, 2013).



Şekil 2. 9 Virgül şeklinde bakteriler, (Hogg, 2013).

2.4.1.2. Beslenme şekillerine göre sınıflandırma

Bakteriler beslenme şekillerine göre iki gruba ayrılmaktadır:

-*Ototrof bakteriler*: Kendileri için gerekli olan enerjiyi inorganik bileşiklerin oksitlenmesinden elde eden, hücrelerin inşa edilmesi için gereken karbonu da CO₂'den veya karbonattan sağlayabilen bakteri türleridir. Ototrof bakteriler, enerjilerini aldıkları maddelerin türlerine göre nitrifikasyon bakteriler, kükürt bakterileri ve demir bakterileri olmak üzere üç ayrı alt gruba ayrılmaktadır. Nitrifikasyon bakteriler enerjilerini amonyak ve nitrit gibi inorganik azot bileşiklerden sağlarken, kükürt bakterileri ise enerjilerini hidrojen sülfür, tiyosülfat ve kükürt gibi inorganik bileşiklerin oksitlenmesinden almaktadırlar.

Demir bakterileri ise enerjilerini atık sularda bulunan iki değerlikli demir bileşiklerin oksidasyonundan sağlamaktadırlar (Hogg, 2013).

- *Heterotrof bakteriler*: Karbon kaynağı olarak organik maddeleri, enerji kaynağı olarak da organik maddelerin indirgenme-yükseltgenme reaksiyonlarından elde edilen enerjiyi kullanabilen bakteri türleridir. En önemli türleri; sülfat indirgeyen, nitrat indirgeyen, karbonlu maddelerin ve azotlu maddelerin ayrışmasını sağlayan bakterilerdir (Hogg, 2013).

2.4.1.3. Solunum şekillerine göre sınıflandırma

Bakteriler yaptıkları solunum şekline göre dört gruba ayrılmaktadır:

- *Aerob bakteriler*: Oksijenli solunum yapmaktadırlar.

- *Anaerob bakteriler*: Oksijensiz solunum yapmaktadırlar.

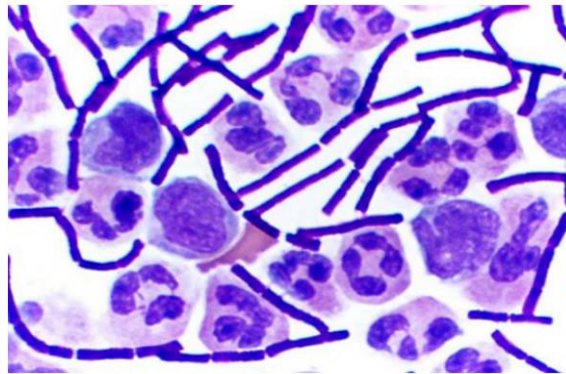
- *Geçici aerob bakteriler*: Daha çok oksijensiz solunum yapan bu tür bakteriler az miktarda oksijenli solunum da yapmaktadırlar.

- *Geçici anaerob bakteriler*: Daha çok oksijenli solunum yapan bu tür bakteriler az miktarda oksijensiz solunum da yapmaktadırlar (Hogg, 2013).

2.4.1.4. Gram boyama metoduna göre sınıflandırma

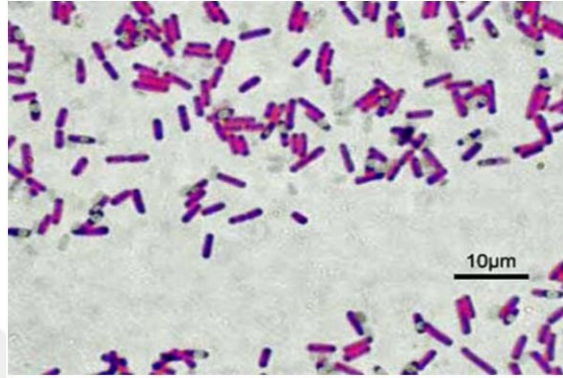
Bakteriler gram boyama metoduna göre iki gruba ayrılmaktadır:

- *Gram pozitif bakteriler*: Gram boyama yöntemi uygulanmış bu tür bakteriler, mikroskopik gözlem sonucunda mavi-siyah veya mor renk almaktadırlar. Gram pozitif bakterilerin bu renkleri almaları, hücre çeperlerinde ultraviyole ve iyot karışımının bulunmasından kaynaklanır. Gram pozitif bakterilerin hücre duvarları kalın bir yapıya sahiptir (Harley ve Prescott, 1996).



Şekil 2.10 Gram pozitif bakterinin mikroskop görüntüsü

- *Gram negatif bakteriler*: Gram boyama yönteminde kristal viyole boyayı tutamayan bakteri türleridir. Kristal viyole boyanın ardından karşı boya eklendiğinde, bu bakteriler kırmızı-pembe renge boyanmaktadır. Patojen bir tür olan bu bakterilerin insanlarda hastalığa neden olma olasılığı yüksektir. Hücre duvarlarında gram pozitiflere göre daha ince peptidoglikan bulunmaktadır (Harley ve Prescott, 1996).



Şekil 2. 1 Gram negatif bakterinin mikroskop görüntüsü

2.5. Beton Çatlakları

Betonun durabilitesini olumsuz bir biçimde etkileyen çatlaklar farklı birtakım nedenlerden kaynaklanmaktadır. Temel olarak, herhangi bir bölgede oluşan çekme gerilmelerinin betonun çekme halindeki birim şekil değiştirmesini aşacak bir şekilde oluşması çatlakların meydana gelmesine sebebiyet vermektedir (Baradan ve diğ, 2002).

Beton matrisinde meydana gelen gerilmeler, beton içine gömülü maddelerin genişmesi ve dış etkiler olmak üzere üç ana oluşum grubunda toplanan çatlakların tamamen önlenmesi neredeyse imkansız olsa da bu sorunları azaltmak için birtakım önlemler almak gereklidir. Genel anlamda, taze ve sertleşmiş betonda görülebilen çatlaklardan taze betonda oluşabilecek çatlaklar; büzülme, plastik oturma, taze don hasarı ve kalıp-zemin hareketleri gibi etkenlerden kaynaklanırken, sertleşmiş betonda ise; çeşitli büzülme olayları, termal etkiler, kimyasal, biyolojik, fiziksel etkenler ve son olarak yapısal nedenlerden kaynaklı çatlak oluşumları gözlenmektedir. Ek olarak, yanlış projelendirme, uygun olmayan malzeme seçimi ve beton teknolojisi kurallarının gerektirdiği prensiplere uygun olmayan işçilikler

betonarme yapılara asıl zarar veren çatlakların oluşmasına neden olmaktadır (Baradan ve diğ, 2002).

Betonarme yapıların durabilitesini etkileyen olayların hemen hepsinde iki ana faktör vardır. Bunlardan birincisi su, ikincisi ise zararlı maddelerin beton bünyesindeki boşluk ve çatlaklar yardımıyla taşınımı olarak karşımıza çıkmaktadır (Baradan ve diğ, 2002). Kısaca, hizmet ömrü yüksek bir beton üretebilmenin temel şartının zararlı maddelerin matris içerisindeki taşınımını engelleyecek şekilde boşluksuz ve çatlaksız bir malzeme üretimi olduğu söylenebilir.

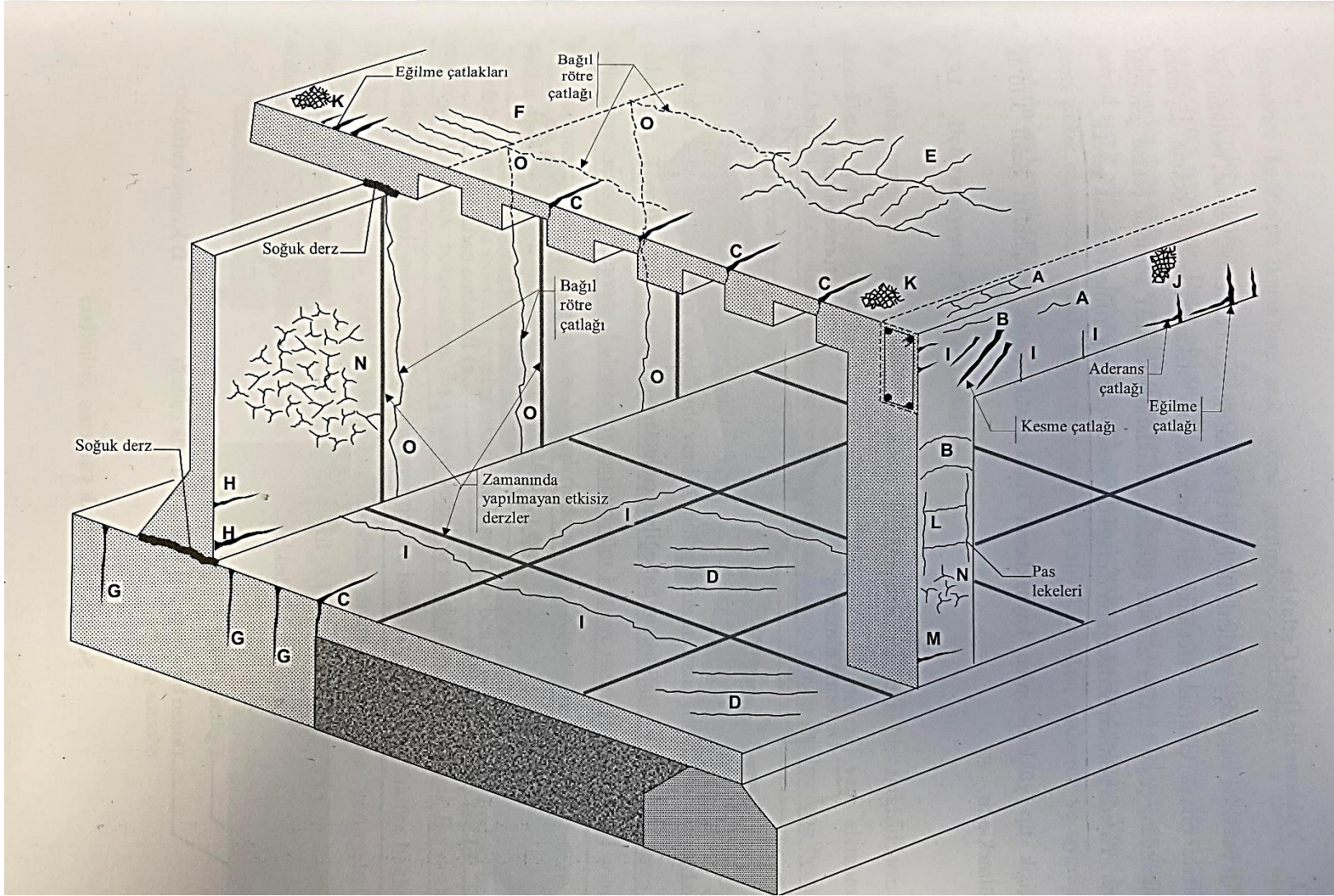
Geleneksel betonların neredeyse kaçınılmaz bir özelliği olarak görülen mikro çatlakların sürekli bir ağ oluşturması durumunda betonun geçirgenliğinin önemli ölçüde artacağı ve beton içerisine agresif maddelerin girişinin kolaylaşacağı belirtilmiştir (Wiktor ve Jonkers, 2011; Schlangen ve Joseph, 2009). Betonarme elemanlarda oluşabilecek çatlak tiplerinin sınıflandırılması Çizelge 2.1’de, bu çatlakların oluşum yerleri ve biçimleri ise Şekil 2.12’de verilmiştir.

Çizelge 2. 1 Çatlak tiplerinin sınıflandırılması, (Baradan ve diğ, 2010)

Çatlak Tipi	Konumu	Alt Grupları	En sık rastlanan bölgeler	Ana neden	İkincil nedenler/ faktörler	Önlemler	Görülme zamanı
Plastik Oturma	A	Donatı Üstü	Derin Kesitler	Aşırı Terleme	Erken yaşlarda hızlı kuruma koşulları	Terlemeyi azaltmak veya yeniden vibrasyon	10 dk – 3 saat
	B	Üst Bölgeler (Kemer)	Kolon Üstleri				
	C	Farklı Derinlikteki Kesitler	Asmolen, Mantar Döşemeler				
Plastik Rötre	D	Diyagonal	Yollar, döşemeler	Erken yaşta hızlı kuruma	Düşük miktarda terleme	Erken kür koşullarının iyileştirilmesi	30 dk – 6 saat
	E	Rastgele	Betonarme döşemeler				
	F	Donatı Üstü	Betonarme döşemeler	Erken yaşta hızlı kuruma, yüzeye yakın donatı			
Erken Termal Büzülme	G	Dış Kısıtlama	Kalın Duvarlar	Aşırı ısı üretimi	Hızlı Soğuma	Isıyı azaltmak veya izolasyon yapılması	1 gün – 2 veya 3 hafta
	H	İç Kısıtlama	Kalın Döşemeler	Aşırı sıcaklık			
Uzun Dönemli Kuruma Büzülmesi	I		İnce döşeme veya duvarlar	Yetersiz derzler	Aşırı büzülme, yetersiz kür	Su miktarının azaltılması, uygun kür koşulları	Birkaç hafta veya aylar sonra
Kabuk Şeklinde Soyulma	J	Kalıp Yüzeyi	Pürüzsüz görünümlü beton	Geçirgen olmayan kalıp	Yüksek çimento dozajı, kötü kür	Kür koşulları, perdah işlemleri	1 – 7 gün veya çok daha geç
	K	Akışkan Beton	Döşemeler	Aşırı perdah			

Çizelge 2.1. (Devam)

Donatı Korozyonu	L	Doğal	Kolon ve kirişler	Pas payı yetersizliği	Düşük kaliteli beton	Nedenlerin ortadan kaldırılması	2 yıldan sonra
	M	Kalsiyum Korür	Prefabrike beton	Aşırı kalsiyum klorür			
Alkali-Agrega Reaksiyonu	N		Nemli bölgeler	Reaktif agraga artı yüksek alkalili çimento		Nedenlerin ortadan kaldırılması	5 yıldan sonra



Şekil 2. 2 Betonarme elemanlarda çatlakların oluşum yerleri ve biçimleri, (Baradan ve diğ, 2010)

2.6. Betonda Oluşan Çatlakların Önlenmesi ve İyileştirilmesi

Yapılarda güvenlik ve sürdürülebilirlik konularında artan endişeler, kendini onaran akıllı malzemeler ve bozulmayı önleyici onarım yöntemlerinin geliştirilmesine neden olmuştur. Beton matrisinde oluşan ve engellenmesi neredeyse imkansız olan küçük boyutlu çatlakların (<300 µm) yapının direkt olarak çökmesine neden olmayacağı, ancak yapının işlevselliğini, hizmet ömrünü ve bozulma hızını büyük oranda etkileyeceği belirtilmiştir (Van Tittelboom ve diğ, 2011; Li ve Herbert, 2012; De Belie ve diğ, 2018).

2.6.1. Otojen iyileştirme

Çimento esaslı malzemelerde gözlenen otojen olarak çatlak iyileştirme kapasitesi, çimentolu matrisin geleneksel bileşenlerine dayansa da özel katkıların eklenmesi yoluyla da sağlanabilir (De Belie ve diğ, 2018). Ancak, otojen iyileştirme, genel anlamda malzemenin orijinal bileşenleri yardımıyla gerçekleştirilen bir onarım prosesi olarak tanımlanmaktadır (Rajczakowska ve diğ, 2019). Otojen iyileştirmede çatlaklar kısmen veya tamamen kendiliğinden kapanarak malzemenin mekanik ve dayanıklılık özelliklerini iyileştirme olgusu vardır (De Belie ve diğ, 2018).

Geçmiş çalışmalarda, otojen olarak kendini onarma olayının esas olarak çimentolu matris içerisindeki fiziksel, kimyasal ve mekanik proseslerin karmaşık yapısından kaynaklandığı şeklinde elde edilen bulgular mevcuttur (Mihashi ve Nishiwaki, 2012; De Rooij ve diğ, 2013; Van Tittelboom ve De Belie, 2013).

En önemli otojen iyileştirme yöntemleri;

- 1- Hidrate olmamış çimento partikülerinin devam eden hidrasyonu,
- 2- Beton matrisinde bulunan Ca^{+2} iyonları ile su içerisinde bulunan CO_3^{-2} arasındaki reaksiyon sonucu $CaCO_3$ oluşumu olarak sıralanabilir.

Geleneksel Portland çimentosu kullanılarak üretilen betonlarda bahsedilen bu otojen iyileşmenin mümkün olmasının yanı sıra, geopolimer kompozitlerde bu şekilde bir otojen iyileşmenin reaksiyona girecek Ca^{+2} kationunun ve çimentonun devam eden hidrasyonunun mevcut olmaması nedeniyle meydana gelebileceği belirtilmiştir (Jadhav ve diğ, 2018).

2.6.2. Otonom iyileştirme

Otojen iyileştirme mekanizmasının aksine, kendini onarma mekanizmasının sağlanması amacıyla betonun ana bileşenlerine ek olarak ilave edilen birtakım yenilikçi malzemeler yoluyla gerçekleştirilen onarma metotlarına otonom iyileştirme mekanizması adı verilmektedir (De Belie ve diğ, 2018).

Optimize edilmiş bir karışım dizaynıyla kendini iyileştirme mekanizması otojen olarak gerçekleştirilebileceği gibi, bir iyileştirici ajan eklemek suretiyle otonom (özerk) kendini onarma mekanizması da uygulanabilmektedir. Otonom onarım süreçlerinde sıklıkla kullanılan iyileştirici ajanlar; kalsiyum nitrat, epoksi reçine, poliüretan, süper emici polimer ve alkalifilik tür olan endospor oluşturabilen bakterilerdir (Rajczakowska ve diğ, 2019).

Gerçekleştirilen çalışmalarda betonun kendini onarma yeteneği kazanması amacıyla kullanılan birçok iyileştirici ajan tipi önerilmiştir. Kimyasal bazlı onarım malzemelerinin yanı sıra (Dry, 2000; Li ve Yang, 2007), kendini onarma kapasitesinin bakterilerin metabolik aktivitesi sayesinde oluşan CaCO_3 çökeltmesi yoluyla elde edilen biyolojik bir onarım mekanizması yoluyla gerçekleştirilebileceği de ortaya çıkmıştır (De Muynck ve diğ, 2008).

Polat R., (2013) tarafından yapılmış bir başka çalışmada ise yoğun bir iç yapıya sahip olan yüksek dayanımlı beton üretiminde otojen rötrenin olumsuz etkilerini minimize edebilmek amacıyla geliştirilmiş perlit agregası ve kilin suya doymuş halde kullanımı araştırılmıştır. Deneysel bulgular, geliştirilmiş perlit agregası ve geniş ürünlerin (CaO ve MgO) kullanıldığı örneklerde otojen rötrenin azaldığını ortaya çıkarmıştır.

Gerçekleştirilen bir diğer çalışmada ise, çimento esaslı malzemelerde otojen büzülme azaltmak için nano-MgO ilavesinin kullanımı araştırılmıştır. Hamur ve harç karışımlarında bağlayıcı malzemenin ağırlıkça %2,5, 5 ve %7,5'i oranlarında ikame edilen nano-MgO katkısının otojen büzülme ve priz süresini azalttığı, basınç dayanımını da %8 mertebesine kadar arttırdığı gözlenmiştir. Elde edilen bulgular neticesinde nano-MgO katkısının genişleyen bir katkı maddesi olarak kullanılabilmesi sonucuna varılmıştır (Polat ve diğ, 2017).

2.7. Kendini Onaran Beton

Geleneksel insan yapımı malzemelerden farklı olarak, kendi kendini iyileştiren yeni nesil malzemeler, hasardan sonra ilk işlevlerini geri kazanmaya çalışmaktadır. Örneğin, hasarlı malzemeler yüzeydeki çizikleri kapatabilmekte veya mekanik özelliklerin geri kazanılmasında başarılı olabilmektedir. Doğal yaşamdan esinlenerek yapılan kendi kendini iyileştirme sürecinde temel mantık, iyileşme sürecini başarmak için malzeme içinde bir hareketliliğin başlatılmasıdır (Hager, 2017).

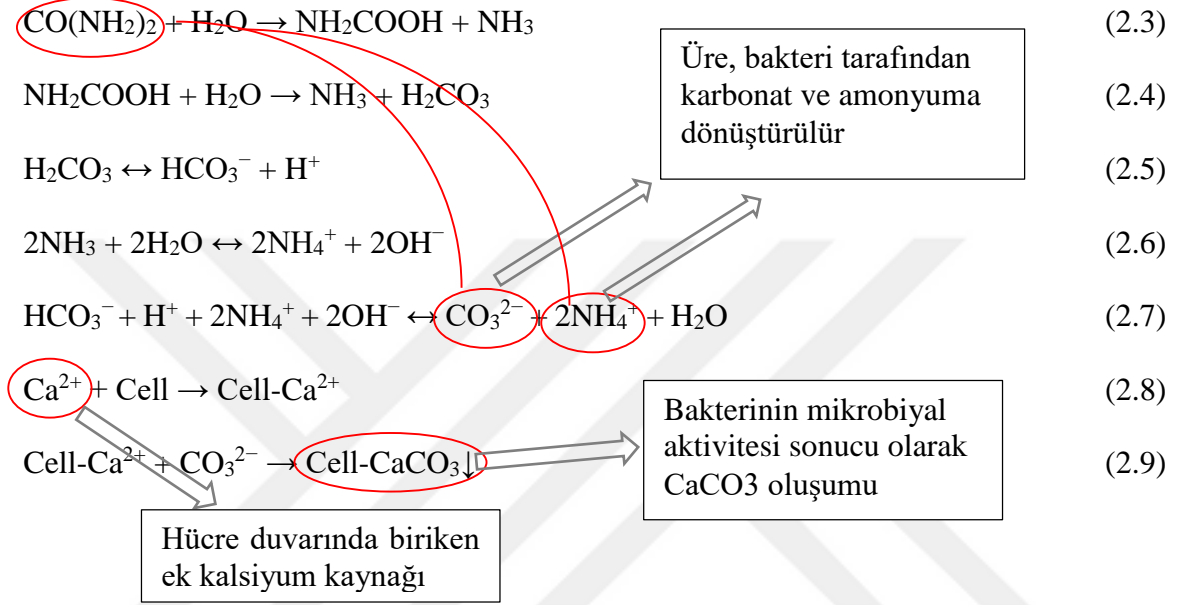
Bahsedilen bu hareketlilik, yapısal elemanlarda üreolitik bakterilerin kullanılmasıyla oluşan mikrobiyal kalsit çökeltisi ile sağlanmaktadır. Kendi kendini onaran bir yapı malzemesinin üretiminde son yıllarda bakteri kaynaklı kalsiyum karbonat çökeltme teknolojisi detaylı olarak çalışılmış ve oldukça tatmin edici bulgular elde edilmiştir (Wiktor ve Jonkers, 2011; Wang ve diğ., 2014; Bundur ve diğ., 2015; Luo ve Qian, 2016; Bundur ve diğ., 2017). Alkali ortama dayanıklı ve spor oluşturabilen bakterilerin kullanıldığı bu uygulamalar, besin ve bakterilerin malzemenin karışım esnasında eklenmesi yoluyla gerçekleştirilmektedir (Luo ve Qian, 2016).

2.7.1 Kendini onarma mekanizması

Aşağıda denklem serisinde de görüldüğü üzere (Denklem: 1-7); negatif yüklü hücre duvarına sahip bakteriler, hücre yüzeylerinde biriktirmek üzere Ca^{+2} iyonlarını çekmektedir. Hücre duvarında biriken Ca^{+2} iyonları ise daha sonra çekirdeklenme alanları olarak görev yapan hücre yüzeylerinde CO_3^{-2} ile reaksiyona girerek $CaCO_3$ oluşumu sağlamaktadır (Van Tittelboom ve diğ., 2010).

Üreolitik bakterilerin rutini olan bu denklem basamakları, yapı elemanlarında oluşabilecek çatlakların herhangi bir dış etkiye ihtiyaç duymadan kendi kendine onarılmasına imkan vererek, başta geçirgenlik olmak üzere yapı elemanlarının hemen her özelliği üzerinde birçok olumlu etki sağlamaktadır. Bu reaksiyonların gerçekleşmesi için kullanılan başlıca bakteri türleri ise; *Bacillus sphaericus* (Wang ve diğ., 2014), *Bacillus subtilis* (Khaliq ve Ehsan, 2016), *Bacillus megaterium* (Andalib ve diğ., 2016), *Sporosarcina pasteurii* (Chahal ve diğ., 2012) olarak karşımıza çıkmaktadır.

Bahsedilen bu bakteri türleri üreyi amonyum ve karbonata dönüştürerek alkalinitesi yüksek ortamda CaCO₃ çökeltmek suretiyle onarım sağlamaktadır. Bakterilerin metabolik aktivitesi sonucu kalsiyum karbonat oluşumunu gösteren denklem basamakları aşağıda verilmiştir (Vijay ve diğ, 2017):



2.7.2. Bakteri bazlı kendini onaran betonlar

Bakteriyel olarak indüklenen CaCO₃ çökeltmesi, özellikle son yıllarda, kendini onaran çimentolu malzeme sistemlerini geliştirmek amacıyla kullanılan alternatif ve çevreci bir teknik olarak tanımlanmaktadır. Bakterilerin, basınç dayanımı, reoloji, hidrasyon kinetiği üzerindeki etkilerini inceleyen bir çalışmada; iyileştirici ajan olarak kullanılan bakterilerin çimento harcının reolojik özelliklerini önemli bir şekilde geliştirdiği ve hidrasyon kinetiği üzerinde de büyük bir etkisi olduğu sonuçları elde edilmiştir. Üç farklı kalsiyum kaynağının etkisinin incelendiği bu çalışmada, kalsiyum nitrat kullanılan örneklerin priz sürelerinin arttığı gözlenirken, kalsiyum format ve kalsiyum nitrat ilavelerinin ise hidrasyonu hızlandırarak priz başlama ve bitiş sürelerinin azalmasına neden olduğu ortaya çıkmıştır. Ek olarak, kalsiyum laktat ilavesi erken yaş dayanımını azaltırken 28 günlük basınç dayanımını arttırmıştır. Kalsiyum format ilavesi basınç dayanımını olumlu yönde etkilerken, kalsiyum nitrat ilavesinin ise basınç dayanımı değerlerinde düşümlere neden olduğu belirtilmiştir (Luo ve Qian, 2016).

Sporosarcina pasteurii ve besiyeri ilavesinin çimentolu kompozitlerin kimyasal, mekanik ve mikro yapısına etkilerini inceleyen bir çalışma gerçekleştirilmiş ve *Sporosarcina pasteurii* suşunun çimento hamurunda yer alan CaCO_3 miktarını arttırmak suretiyle daha boşluksuz bir malzeme üretimine yol açtığı gözlenmiştir. Basınç dayanımı değerlerinde de artışlara neden olan bakteri bazlı kendini onaran kompozitlerde, besiyeri eklenmesinin priz süresini önemli ölçüde uzattığı ve bakterilerin de etkisiyle bu sürenin daha da artış gösterdiği belirtilmiştir (Bundur ve diğ, 2015).

Betonun yüksek pH değerinden, döküm ve sertleşme aşamalarında meydana gelen kesme kuvvetlerinden korunması amacıyla bakterilerin demir oksit nanopartikülleri (ION) içerisine immobilize edilmesi yönteminin önerildiği bir başka çalışmada ise bakteriyel kendini onarma mekanizmasının basınç dayanımı ve büzülme özellikleri üzerine etkileri araştırılmıştır. Deneysel bulgular, bu şekilde betona eklenen *Bacillus* türlerinin basınç dayanımını arttırdığını göstermiştir. Ayrıca, *Bacillus cohnii* ve kalsiyum laktat içeren örneklerde daha yüksek büzülme değerleri gözlenmiştir. Ek olarak, yapılan mikro yapısal karakterizasyonlar (SEM, XRD ve EDS) biyo-beton numunelerinde çöken kristallerin CaCO_3 olduğunu ve kontrol numunelerinde ise herhangi bir çökeltme gözlemlenmediğini ortaya çıkarmıştır (Sefian ve diğ, 2018).

Sülfat ortamına maruz bırakılan geleneksel betonlarda bakteri ilavesinin durabiliteye etkisinin incelendiği bir çalışmada, bakteri ilavesinin sülfat etkisi sonucu oluşan ağırlık, hacim ve su emme değerlerindeki değişiklikleri azalttığı ve basınç dayanımını arttırdığı gözlenmiştir. Bunun yanı sıra, bakteri ilave edilen geleneksel betonlarda klorür penetrasyonu değerlerinin kontrol örneklere göre daha düşük olduğu belirlenmiştir. 90 güne kadar gerçekleşen sülfat maruziyetinin basınç dayanımını arttırdığı ancak ilerleyen günlerde gerçekleşen sülfat atağı nedeniyle tüm örnek gruplarında basınç dayanımı değerlerinin azaldığı belirlenmiştir. Ayrıca, sülfat çözeltilisine maruz bırakılan örneklerin su emme değerlerinin de zamanla azaldığı gözlenmiştir. Bu durumun, beton numunelerin yüzeyinde su emmeyi sınırlayan bir miktar MgSO_4 birikmesi şeklinde olduğu tahmin edilmiştir (Nosouhian ve diğ, 2016).

Bakteri dozajının, örneklerin yoğunluk, basınç dayanımı, yarmada çekme dayanımı ve su emme özelliklerine etkisinin incelendiği bir çalışma gerçekleştirilmiştir. 0,45 su/çimento oranında üretilen örneklerde, karışım suyunun %1'inden %6'sına varan değişen oranlarda bakteri ilavesi sağlanmıştır. Deneysel bulgular optimum bakteri dozajının (bakteri/su) basınç dayanımı, yarmada çekme dayanımı ve su emme özelliği açısından %3,5 olarak elde edildiğini göstermiştir (Buller ve diğ, 2021).

Kendiliğinden yerleşen beton üretiminde pirinç kabuğu külü ve bakteri konsantrasyonu oranlarının optimize edildiği bir başka çalışmada ise; çimento, ağırlıkça %0, 5, 10, 15, 20, 25 ve 30 oranında pirinç kabuğu külü ile ikame edilmiştir. Ayrıca, tüm karışım gruplarına bağlayıcı ağırlığının %10'u oranında mikro silis ilavesi yapılmıştır. Daha sonra, optimum pirinç kabuğu külü içeriğine (%15) sahip numuneye de 10^3 , 10^5 ve 10^7 hücre/ml bakteri eklenmiştir. Deneysel sonuçlar, en üstün mekanik özelliklerin 10^5 hücre/ml değerinde elde edilirken, dayanıklılık özellikleri açısından ise optimum sonuçların 10^7 hücre/ml konsantrasyonundan elde edildiğini göstermiştir (Ameri ve diğ, 2019).

Sporosarcina pasteurii suşu kullanılarak üretilen geleneksel harç örneklerinin basınç dayanımı, elektriksel direnci, su emme özelliği ve klorür geçirimsizliği özelliklerinin incelendiği bir çalışma gerçekleştirilmiştir. *Sporosarcina. pasteurii* kullanılarak üretilen örnekler iki farklı çökeltme ortamında (üre-kalsiyum klorür ve üre-kalsiyum laktat) muhafaza edilmiştir. Deneysel bulgular, geleneksel harca yapılan bakteri ilavesinin ve uygun bir ortamda gerçekleştirilen kürün, basınç dayanımı ve elektriksel direnç özelliklerini arttırdığını göstermiştir. En yüksek basınç dayanımı (%60 artış) bakteri içeren ve üre-kalsiyum klorür çözeltilisi içerisinde kür edilen örneklerden elde edilirken, su emme değerlerinde ise kontrol numunelerine göre %32-55 oranında azalmalar gözlenmiştir. Öte yandan, bakteri ilavesinin klorür penetrasyonunu da azalttığı ortaya çıkmıştır (Tayebani ve Mostofinejad, 2019).

Beş farklı konsantrasyonda (min 10×10^5 – max 50×10^5 CFU/mL) hazırlanan *Bacillus megaterium* tip bakterinin beton özelliklerine etkisinin incelendiği bir çalışmada en yüksek basınç dayanımı değerlerinin 30×10^5 CFU/mL konsantrasyonunda elde edildiği ortaya çıkmıştır. Ayrıca gerçekleştirilen mikro yapısal gözlemler de (SEM - XRD ve EDS) 30×10^5

CFU/mL konsantrasyonunun beton özelliklerini geliştirmek için ideal bir değer olduğunu doğrulamıştır (Andalib ve diğ, 2016).

Betonda kullanılan *Bacillus subtilis* suşunun optimum değerinin belirlenmesi için gerçekleştirilen bir diğer çalışmada ise, bakteriler 10^3 , 10^5 ve 10^7 hücre/mL olmak üzere üç farklı konsantrasyonda karışıma dahil edilmiştir. Deneysel sonuçlar, 10^7 hücre/mL konsantrasyonuna sahip bakterilerin çatlak iyileşmesi açısından daha verimli olduğunu ancak basınç dayanımı gelişimi açısından en iyi sonuçların 10^5 hücre/mL bakteri konsantrasyonu ile elde edildiğini gözler önüne sermiştir (Mondal ve Ghosh, 2018).

Sporasarcina pasteurii tip bakterilerin çimento hamurunun reolojik özelliklerine etkisinin incelendiği bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Bakteri hücrelerinin doğrudan karışım suyuna dahil edildiği bu çalışmada; bakteri dozajı, su/çimento oranı, süper akışkanlaştırıcı kullanımı ve uçucu külün reolojik özelliklere etkisi detaylı bir biçimde incelenmiştir. Deneysel bulgular, mikroorganizmaların eklenmesiyle birlikte çimento hamurunun görünür viskozite ve akma gerilmesi değerlerinin arttığını göstermiştir (Azima ve Bundur, 2019).

Benzer şekilde, *Sporasarcina pasteurii* tip bakterilerin uçucu kül katkılı betonun basınç dayanımı ve hızlı klorür geçirimsizliği üzerindeki etkisinin incelendiği bir çalışmada; çimento ağırlıkça % 10, 20 ve 30 oranında uçucu kül ile ikame edilmiştir. Beton karışımına 0 , 10^3 , 10^5 ve 10^7 hücre/mL konsantrasyonuna sahip bakteriler ilave edilmiştir. Elde edilen deney sonuçları, bakteri ilavesinin betonun basınç dayanımını arttırdığını, gözeneklilik ve geçirgenlik değerlerini ise azalttığını göstermiştir. Ayrıca, 10^5 hücre/mL bakteri ilavesinin basınç dayanımında %22'lik artış sağladığı ve su emme değerlerinde dört kat azalmaya neden olduğu belirlenmiştir (Chahal ve diğ, 2012b).

Bacillus subtilis'in iyileştirici ajan olarak kullanıldığı bir başka çalışmada ise bakteriyel betonun özelliklerine bakteri etkisini incelemek amacıyla basınç dayanımı, su emme, gözeneklilik ve SEM analizi testleri yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar, bakteriyel betonun basınç dayanımında önemli artışların gözlemlendiğini ve kompakt bir mikro yapı oluşumundan

kaynaklanan geçirgenlik özelliklerinde belirgin azalmalar olduğunu ortaya koymuştur (George ve diğ, 2016).

Düşük sıcaklıklardaki deniz ortamında uygulanacak bakteri bazlı kendi kendini iyileştiren çimentolu kompozitin performansını inceleyen bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Çimentolu kompozitin performansı, su geçirgenlik ve basınç dayanımı gelişimi açısından test edilmiştir. 56 gün boyunca 8 °C sıcaklıkta yapay deniz suyuna daldırılan örneklerde geçirgenlik değerleri; 0,4 mm genişliğindeki çatlaklarda % 95, 0,6 mm genişliğindeki çatlaklarda ise % 93 oranında azalmıştır (Palin ve diğ, 2017).

Geleneksel Portland çimentosuna % 0, 10, 20 ve 30 oranında ikame edilen çimento torbası filtre tozu kullanılarak üretilen bakterili betonların 28. ve 56. günlerdeki basınç dayanımı, su emme, gözeneklilik ve klorür geçirimsizliği özelliklerinin araştırıldığı bir çalışma gerçekleştirilmiştir. %100 çimento kullanılarak üretilen bakterisiz ve bakterili örneklerin basınç dayanımı sırasıyla 32.89 ve 34.66 MPa olarak elde edilmiştir. Çimento torbalı filtre tozu kullanımı ile birlikte basınç dayanımı değerlerinde ise düşüşler gözlenmiştir. Ek olarak, bakteriyel betonun su emme değerleri ise kontrol numunelerine kıyasla önemli ölçüde düşüş göstermiştir (Siddique ve diğ, 2016).

Bakterilerin çimentolu kompozitlerin reolojik, hidrasyon mekanizması, gözenek yapısı, mukavemet gelişimi ve mineralizasyon ürünü gibi performans değerleri üzerindeki etkilerinin incelendiği bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Bakteri ilavesinin, kendini iyileştiren çimento harcının kıvamını iyileştirdiği, ancak bu yukarı yönlü trendin doğrusal olmadığı gözlenmiştir. 10^{13} hücre/m³ konsantrasyonda üretilen numunelerin basınç dayanımı değerleri, kontrol numunelerine kıyasla birinci günde daha düşük iken, 7 ve 28. günlerde ise daha yüksek olarak elde edilmiştir. Öte yandan, 10^{13} hücre/m³ bakteri içeren örnekler en düşük gözenek hacmine sahipken, 10^{14} hücre/m³ bakteri içeren örnekler ise kontrol numunelere göre daha yüksek kümülatif gözenek hacmi göstermiştir. Kısaca, uygun konsantrasyonlarda bakteri kullanımının gözenek yapısını azaltmada faydalı olacağı belirlenmiştir (Su ve diğ, 2019).

Bacillus subtilis suşunun geleneksel betonun mukavemeti üzerine etkisinin incelendiği çalışmada 10^5 hücre/mL bakteri içeren örneklerin çekme dayanımında % 63'e varan

oranlarda artış gözlenirken, basınç dayanımı değerlerinin ise % 42 oranında artış gösterdiği belirlenmiştir. Deneysel bulgular, ayrıca, asit saldırısına maruz kalan örneklerden bakteriyel betonun daha yüksek asit saldırı faktörüne sahip olduğunu ve bakteri kullanımının asit maruziyesi sonrasında yaşanan ağırlık kaybını belirli bir sınıra kadar önlediğini ortaya çıkarmıştır. Gerçekleştirilen su emme deneyi sonuçları da CaCO₃ oluşumundan kaynaklanan gözenekliliğin azalması sonucunda, bakteriyel betonların su emme değerlerinin kontrol numunelere kıyasla daha düşük olduğunu ortaya çıkarmıştır (Meera ve Subha, 2016).

Bacillus pasteurii bakteri tipinin üç farklı konsantrasyonda (10⁷, 10⁸ ve 10⁹ hücre/ml) kullanılarak çimento harcının kendini onarması üzerindeki etkisinin nicel olarak araştırıldığı bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Bahsedilen iyileştirme etkisi ise, kendini iyileştirme yüzdesi ve geçirimsizlik oranı ile karakterize edilmiştir. Deneysel sonuçlar, küçük genişlikteki çatlaklarda (0,2-0,3 mm) meydana gelen 10⁸ ve 10⁹ hücre/ml bakteri içeren örneklerin iyileşme etkinliğinin 10⁷ hücre/ml bakteri içeren örneklerden çok daha yüksek olduğunu göstermiştir. Geniş çatlaklarda (0,6 - 0,7 mm) ise gerçekleşen iyileşme etkinliğinin küçük çatlaklara göre çok daha düşük olduğu ve bakteri konsantrasyonunun artmasıyla birlikte iyileştirme yüzdesi ile geçirimsizlik oranının arttığı belirlenmiştir (Rong ve diğ, 2020).

Gözenekli keramsit parçacıklarında hareketsiz hale getirilmiş üreolitik *Sporosarcina pasteurii* suşunun betonarme elemanlarda çatlak iyileştirme potansiyelinin araştırıldığı bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Deneysel bulgular, bakteriler tarafından tamamiyle iyileştirilebilen maksimum çatlak genişliğinin 120 günde 450 µm'ye çıktığı gözlenmiştir. Ayrıca, tafel polarizasyon sonuçları, mikrobiyal çökeltmeden kaynaklanan çatlak kapanması olayının hiçbir yan etki olmadan donatı korozyonunu engellediği ortaya çıkmıştır (Xu ve diğ, 2020).

Bacillus pseudofirmus suşunun çimento hamurunda iyileştirici ajan olarak kullanıldığı çalışmada, bakteri ilavesinin çimento hamuruna etkisi üç ay boyunca incelenmiştir. Optik mikroskop gözlemleri besin ortamında kür edilmiş bakterisiz örneklerde de çatlağın kısmen doldurulduğunu göstermiştir. Ek olarak deneysel bulgular, ilave Ca⁺² kaynağının kalsit kristal oluşumuna olumlu bir etkisinin olduğunu göstermiştir (Prošek ve diğ, 2020).

Bakterilerin çimentolu kompozitlerde kendini iyileştirme özelliği üzerindeki etkilerini belirlemek üzere bakteriyel kaynaklı kalsit çökmesinin ayrıntılı karakterizasyonunu inceleyen bir çalışma tamamlanmıştır. Üç farklı bakteri suşunun (*Sporosarcina pasteurii*, *Bacillus cohnii* ve *Bacillus pseudofirmus*) kullanıldığı bu çalışmada bakterilerin uygun ve uygun olmayan koşullardaki canlılıkları ve metabolik aktiviteleri araştırılmıştır. XRF, TGA, TCD ve FTIR gibi farklı yöntemlerin kullanıldığı bu çalışmada *Bacillus pseudofirmus* suşunun en uygun bakteri türü olduğu saptanmıştır. Sonuçlar, *Bacillus pseudofirmus* suşunun optimum koşulların altında bile (10 °C) mükemmel canlılık ve yeterli kalsit üretim yeteneğine sahip olduğunu göstermiştir (Ryparová ve diğ, 2021).

İyileştirici etken olarak *Bacillus subtilis* suşunun kullanıldığı kendini onaran beton kırıların performansının incelendiği bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Bakteriler için ekolojik nişler oluşturmak amacıyla hava sürükleyici katkı maddesinin de kullanıldığı çalışmada, kırı numunelerinde 3 noktalı eğilme testi uygulanarak 0,3 mm genişliğe varan çatlaklar oluşturulmuştur. XRD sonuçlarının biyomimetik mineralizasyonun kalsiyum karbonattan oluştuğunu göstermesinin yanısıra, kimyasal olarak üretilen kalsiyum karbonata nazaran, mikrobiyal indüklenen kaba kristallerin daha yoğun olduğu belirlenmiştir. Benzer şekilde, çökelti minerallerinin SEM gözlemleri de çökelmiş kalsiyum karbonatın en baskın mineral fazının kalsit olduğunu göstermiştir (Feng ve diğ, 2021).

Batık deniz ve gel-git bölgelerindeki agresif koşullara maruz kalan beton numunelerinde bakteri kaynaklı otonom çatlak iyileşmesinin araştırıldığı bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Çalışmada iyileştirici ajan olarak *Halobacillus halophilus* tip bakteri kullanılmıştır. Biyo-beton üretimi için optimum besin maddesini belirlemek amacıyla ön deneyler yapılmış ve besin olarak kalsiyum laktat (yüksek aragonit/brüsit oranına sahip olması nedeniyle) kullanımına karar verilmiştir (Khan ve diğ, 2021).

Pepton, maya özü ve *Bacillus subtilis* suşunun mikrobiyal adjuvan olarak beton karışımına eklendiği bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Deneysel bulgular, bakteri ilavesinin beton gözenekliliğinde azalmalara neden olmasının yanında, mukavemet ve dinamik modül gibi mekanik özelliklerde önemli artışlara yol açtığını göstermiştir. Ek olarak, su geçirgenliği, gaz geçirgenliği ve klorür geçirgenliği değerlerinde ise azalmalar meydana gelmiştir.

Çalışma, bu çıktıları yönüyle, betonun mekanik özelliklerini ve durabilitesini artırmak amacıyla pepton, maya özü ve *Bacillus subtilis* suşunun efektif olarak kullanılabilceğini göstermiştir. Ayrıca, bakteriyel betonun özelliklerinin tahmin edilmesi yönünden de Eurocode 2'nin güvenle uygulanabileceği sonucuna varılmıştır (Nguyen ve diğ, 2019).

Bakteriyel kaynaklı mikrobiyal kalsit çökeltisi ile kendini onarma potansiyeline sahip çimento hamuru özelliklerinin incelendiği bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Çimento hamuru numunelerin çatlak yüzeylerinde oluşan çökelmeler üzerinde SEM, EDS ve XRD analizleri gerçekleştirilmiştir. Çatlakların onarımı üzerinde; çatlak genişliği, uygulanan kür koşulları ve çatlak yaşının etkileri araştırılmıştır. Yapılan incelemeler sonucunda çatlak yüzeylerinde oluşan çökeltilerin kalsit olduğu belirlenirken, ortalama çatlak genişliğinin artmasıyla birlikte çatlakta gerçekleşen onarımın giderek zorlaştığı hatta 0,8 mm değerinde onarım yeteneğinin sınırlı kaldığı gözlenmiştir. En uygun kür yönteminin su kürü olarak belirlenmesinin yanında, çatlama yaşının 60 günü geçmesi durumunda çatlak iyileşme oranının çok düşük seviyelere geldiği belirlenmiştir (Luo ve diğ, 2015).

Hindistan cevizi, keten ve jüt liflerinin farklı tip bakterileri taşıyıcı olarak kullanıldığı çalışmada organik besin olarak kalsiyum laktat pentahidrat ve üre kullanılmıştır. *Bacillus subtilis*, *Bacillus cohnii* ve *Bacillus sphaericus* tip bakterilerin kullanıldığı bu çalışmada kendini onaran betonların görsel, mikro-yapısal ve mekanik özelliklerinde meydana gelen değişiklikler incelenmiştir. Deneysel bulgular, yukarıda bahsedilen doğal liflerin bakteri sporlarını immobilize etmek için önemli bir potansiyeli olduğunu ortaya çıkarmıştır. Ayrıca, keten liflerinin bakteriler için daha iyi koruma kapasitesine sahip olup, daha iyi basınç dayanımını geri kazanma özelliğine sahip olduğu belirlenmiş iken, hindistan cevizi liflerinin ise daha yüksek basınç dayanımına yol açtığı gözlenmiştir. Sonuçlar, ayrıca, *Bacillus sphaericus* tip bakterilerin diğer bakteri türlerine göre daha verimli sonuçlar verdiğini göstermiştir (Rauf ve diğ, 2020).

Mikroorganizma ve liflerin birlikte kullanımının kendini onarma sürecini karakterize edildiği bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Deneysel bulgular, bakteri ve lifin birleşik etkisinin yüksek onarım verimliliği, daha yüksek mekanik özellikler ve su emme direnci bakımından

olumlu etkileri olduğunu ortaya çıkarmıştır. EDS analizleri ise, polipropilen lifler üzerindeki çökeltilerin C, O, Ca ve Mg elementlerinden oluştuğunu göstermiştir (Su ve diğ, 2021).

Benzer olarak, Wiktor ve Jonkers, (2011) tarafından gerçekleştirilen bir çalışmada enerji dağıtıcı spektroskopi (EDS) kullanılarak yapılan element bileşimi analiz sonuçları, bakteri kullanılarak üretilen kendi onaran örneklerin çatlak yüzeylerinde biriken çökeltilerin CaCO_3 oluşumuna işaret eden esasen kalsiyum (Ca), oksijen (O) ve karbon (C) atomlarının bir birleşimi olduğunu ortaya çıkarmıştır. Bununla birlikte, oluşan ürünlerin SEM gözlemlerinden elde edilen kristal morfolojilerinin, kalsitin tipik eşkenar dörtgen yapısından farklı olduğu saptanmıştır.

Tziviloglou ve diğ, (2016) tarafından harç matrisine eklenen *Bacillus* tip bakterinin iki farklı kür rejimine (suya daldırma ve ıslak-kuru döngü) maruz bırakılması sonucunda gerçekleştireceği kendini onarma mekanizmasını su geçirgenlik testleri yardımıyla araştırılmasına odaklanan bir çalışma gerçekleştirilmiştir. SEM analizi sonuçları, üretilmiş üç farklı harç numunesinin çatlaklarında bulunan ana kristal şekillerin hemen hemen tüm durumlarda kübik ya da kümelenmiş asimetric eşkenar dörtgen yapısına sahip muhtemel CaCO_3 'lar olduğunu ortaya çıkarmıştır. Bahsedilen bu kristal oluşumları üzerinde yapılan EDS analizi sonuçları da; başlıca Ca, C ve O elementlerinin pik değerlerini vermiş bu sonuç da CaCO_3 'ın mevcudiyetini doğrulamıştır.

Bacillus subtilis'in spor tozu ve kültür formunda betona eklendiği bir çalışmada kalsiyum kaynağı olarak kalsiyum laktat ilavesinin betonun basınç dayanımı ve kendini onarma kapasitesine etkisi incelenmiştir. Spor tozu olarak 2×10^6 CFU/g, bakteri kültürü olarak ise 1×10^5 hücre/mL konsantrasyonlarının tercih edildiği çalışmada çimentonun %0,5, %1, %1,5, %2 ve %2,5 oranlarında kalsiyum laktat ilavesi sağlanmıştır. %0,5 kalsiyum laktat ilavesi ile basınç dayanımı değerlerinde maksimum %12 artış elde edilmiştir. Ayrıca, bakteri ilaveli betonun kontrol numunelere göre daha yüksek dayanıklılık özelliklerine sahip olduğu gözlenmiştir (Vijay ve Murmu, 2019).

Bakteri ilavesinin betonun dayanıklılığını artırma noktasında çevre dostu bir teknik olduğundan bahsedilen çalışmada, 10^7 hücre/mL konsantrasyona sahip *Sporosarcina*

pasteurii tip bakteri süspansiyonu kullanılmıştır. 28 gün boyunca üç farklı ortamda kür edilen bakterili örnekler üzerinde 90 ve 120. günlerde elektriksel öz direnç ve 90. günde hızlı klorür geçirimsizlik testleri yapılmıştır. Elde edilen deneysel bulgular, bakteri ilavesi ile sağlanan yüzey kapanma işleminin beton numunelerin elektriksel direncini arttırdığını ve betonun klorür geçirgenliğini azalttığını göstermiştir (Parastegari ve diğ, 2019).

Farklı iki tip bakterinin beton numunelerin elektrik direnci, klorür geçirgenliği ve çelik donatının korozyonu üzerindeki etkilerinin araştırıldığı bir çalışmada iyileştirici ajan olarak *Sporosarcina pasteurii* ve *Bacillus Subtilis* (10^7 ve 10^5 hücre/mL) kullanılmıştır. İki farklı kür ortamında (üre-kalsiyum klorür ve üre-kalsiyum laktat) bekletilen numuneler 28 ve 91 gün süreyle kür işlemine tabi tutulmuştur. Deneysel bulgular, özellikle *Sporosarcina pasteurii* kullanımının beton numunelerin su emme ve klorür geçirgenliğini azalttığını, basınç dayanımı ve elektriksel direnci ise arttırdığını gözler önüne sermiştir. Ayrıca, *Sporosarcina pasteurii* içeren ve üre-kalsiyum laktat çözeltisinde kür edilen beton numunelerin korozyona karşı üstün dayanıklılık gösterdiği gözlenmiştir (Tayebani ve Mostofinejad, 2019b).

3. MATERYAL ve METOD

3.1 Çalışmada Kullanılan Malzemeler

3.1.1. Geopolimer hamur ve harç üretiminde kullanılan malzemeler

3.1.1.1. Öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu (YFC)

Amorf özelliğe sahip olan YFC, daha sonra 400 ila 600 m²/kg arasında değişen bir yüzey alanına sahip bir şekilde (< 45 µm) öğütülmektedir. Artık çimento inceliğine ulaşan bu malzeme, sertleşebilen bir kompozit üretiminde kullanılabilen ve su varlığında hidrasyonu gerçekleştiren bir hidrolik bağlayıcı özelliğini kazanmış olur. ASTM C989 (2018)'de, kimyasal bileşimine göre çeşitli reaktivite indeks sınıflarına (Derece 80, 100, 120) ayrılan YFC, literatürde sıklıkla kullanılan bir puzolan özelliğini taşımaktadır. Çalışmada kullanılan öğütülmüş yüksek fırın cürufunun (Şekil 3.1) kimyasal kompozisyonu Çizelge 3.1.'de verilmiştir. Çalışmada kullanılan yüksek fırın cürufunun özgül yüzey alanı 3996 cm²/g ve özgül ağırlığı ise 2.86 g/cm³'tür.

Çizelge 3. 1 Öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufunun kimyasal kompozisyonu

Element	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O
%	32.47	9.94	1.25	32.45	9.31	0.31
Element	K ₂ O	TiO ₂	SO ₃	Mn ₂ O ₃	Cl	
%	0.85	1.16	0.82	3.51	0.015	



Şekil 3. 1 Öğütülmüş yüksek fırın cürufu

3.1.1.2. Agregası

Çalışmada kendini onaran geopolimer harç numunelerinin üretiminde 0-4 mm tane boyutuna sahip ince dere agregası (Şekil 3.2) kullanılmıştır.



Şekil 3. 2 İnce agregası

3.1.1.3. Sodyum silikat

Çalışmada geopolimer örneklerinin aktivasyonu için sodyum silikat (Na_2SiO_3) kullanılmıştır. Su camı veya sıvı cam olarak da adlandırılan bu malzeme, sulu çözelti içerisinde veya bir katı içerisinde kullanılabilir. Çimento endüstrisinde, yangın korumada, otomobil endüstrisinde, tekstil ve kereste işlemlerinde kullanım alanı bulan sodyum silikatlı saf bileşimler renksiz veya beyaz renktedir. Sodyum silikat üretim mekanizması aşağıda denklemde verilmiştir;



Çalışmada kullanılan sodyum silikat Şekil 3.3'te, bazı fiziksel ve kimyasal özellikleri ise Çizelge 3.2'de verilmiştir.



Şekil 3. 3 Sodyum silikat

Çizelge 3. 2 Sodyum silikatın bazı fiziksel ve kimyasal özellikleri.

Özellik	Sodyum Silikat
Molekül formülü	Na_2SiO_3
Molekül kütlesi, (g/mol)	242.23
Renk	Jel
pH	12
Yoğunluk, (g/cm^3)	1.39
Na_2O , (%)	8.90
SiO_2 , (%)	27.50
H_2O , (%)	63.60

3.1.2. Bakteri üretiminde kullanılan malzemeler

3.1.2.1. *Bacillus subtilis*

Çalışmada uygulanan bakteri seçim kriterlerinde esas olarak, kullanılacak bakterilerin alkali bir ortamda hayatta kalmasına ve mikrobiyal kaynaklı kalsit çökeltmesinin (MICP) işlevine bağlı kalınmıştır. Olumsuz koşullar altında endospor oluşturabilen ve gram pozitif bir bakteri cinsi olan *Bacillus* türünün çeşitli türleri 200 yıldan fazla uykuda kalabilme yeteneğine sahiptir (Schlegel ve Zaborosch, 1993; Khaliq ve Ehsan, 2016). İyileştirici ajan olarak *Bacillus subtilis* ATCC 6633, zorlu çevre koşullarına dayanma kabiliyeti nedeniyle seçilmiştir. Tez çalışmasında iyileştirici etken olarak kullanılan *Bacillus Subtilis* sıvı kültürü Şekil 3.4'te verilmiştir.



Şekil 3. 4 *Bacillus Subtilis* sıvı kültürü

3.1.2.2. Üre

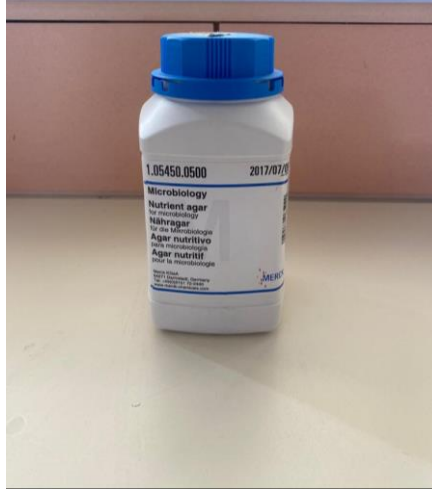
Üre, kimyasal formülü CH_4N_2O olan organik bir bileşiktir. Renksiz ve kokusuz bir özelliğe sahip olan üre suda yüksek oranda çözülmekte olup, hemen hemen hiç toksit bir özelliğe sahip değildir. Karbonik asidin diamidi olan üre, aynı zamanda karbamik asidin de amididir. Bu nedenle karbamid adı ile bilinmektedir. Bu çalışmada, METULAB firmasından temin edilen ürenin, *Bacillus subtilis* tarafından hidrolizi sağlanarak $CaCO_3$ oluşumuna katkı sağlaması amaçlanmıştır. Molekül formülü 60,06 gr/mol olan üre çalışmada 20 gr/L miktarında kullanılmıştır. Tez çalışmasında kullanılan üre Şekil 3.5'te görülmektedir.



Şekil 3. 5 Bakteri üretiminde ve kür ortamında kullanılan üre

3.1.2.3. Nutrient agar

Nutrient agar çeşitli bakteriyel mikroorganizmaların kültivasyon işlemi için kullanılan genel amaçlı bir besiyerdir. Bu tez çalışmasında Merck marka nutrient agar kullanılmıştır. Tez çalışmasında kullanılan nutrient agar Şekil 3.6'da görülmektedir.



Şekil 3. 6 Bakteri üretiminde kullanılan nutrient agar

3.1.2.4. Nutrient broth

Nutrient broth laboratuvarlarda çok çeşitli bakteri türü yetiştirmek amacıyla hazırlanmış sıvı bir besiyerdir. Bu çalışmada Merck marka nutrient broth kullanılmıştır. Tez çalışmasında kullanılan nutrient broth Şekil 3.7’de görülmektedir.



Şekil 3. 7 Bakteri üretiminde kullanılan nutrient broth

3.1.2.5. Kalsiyum nitrat tetrahidrat

Bu çalışmada $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ kimyasal formülüne sahip inorganik bir bileşik olan kalsiyum nitrat tetrahidrat kullanılmıştır. Molekül kütlesi 236.15 gr/mol olan kalsiyum nitrat tetrahidrat ince taneli, renksiz ve çabuk nem alabilen bir yapıya sahiptir. Bakterilerin ürenin

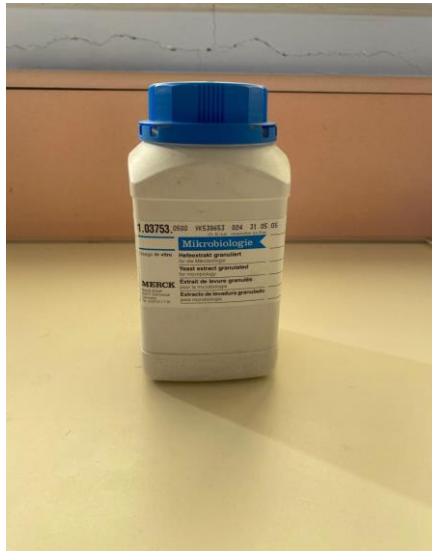
hidrolizi sonucu oluşturacağı CaCO_3 çökeltmesi işleminde kullanılacak olan serbest Ca^{+2} iyonlarını sağlamak amacıyla % 99 saflıkta $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ kullanılmıştır. Örneklerin kür ortamı olarak bekleyeceği çökeltme ortamına 30 gr/lt miktarında ilave edilmiştir. Tez çalışmasında kullanılan kalsiyum nitrat tetrahidrat Şekil 3.8’de görülmektedir.



Şekil 3. 8 Çökeltme ortamının oluşturulmasında kullanılan kalsiyum nitrat tetrahidrat

3.1.2.6. Maya özü

Maya özü, maya hücrelerinden elde edilen ve suda çözünebilir bir özellik gösteren pepton benzeri bir üründür. Hücrelerin proteolizi ile elde edilen maya özünde otolitik aktivite ısı işlem ile sonlandırılmaktadır. Bu tez çalışmasında maya özü, çökeltme ortamının hazırlanmasında 20 g/L miktarında kullanılmıştır. Tez çalışmasında kullanılan maya özü Şekil 3.9’da görülmektedir.

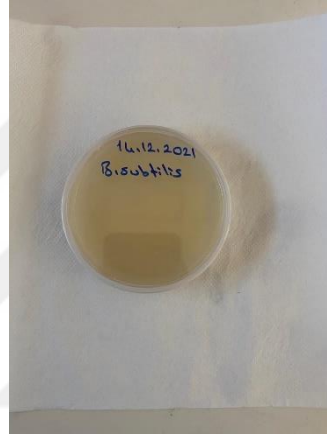


Şekil 3. 9 Çökeltme ortamının oluşturulmasında kullanılan maya özü

3.2. Deneysel Çalışma

3.2.1. Bakteri kültür üretimi

İyileştirici ajan olarak *Bacillus subtilis* ATCC 6633, zorlu çevre koşullarına dayanma kabiliyeti nedeniyle seçilmiştir. *Bacillus subtilis* stok kültürü üretmek için bakteri her ay taze steril Nutrient Agar (NA) plakalarına aktarılmış ve 30 °C'de saf katı kültür olarak üretilmiştir. Elde edilen saf bakteri kültürü İnönü Üniversitesi Fen-Edebiyat Fakültesi Biyoloji Bölümü buzdolabında 4 °C'de stokta tutulmuştur (Birhanlı ve diğ, 2020). Tez çalışmasında sıvı kültürün elde edildiği *Bacillus subtilis* katı kültürü Şekil 3.10'da verilmiştir.



Şekil 3. 10 *Bacillus subtilis* katı kültürü

Nutrient Agar üzerinde büyütülen *Bacillus subtilis* stok katı kültüründen alınan numune, aseptik koşullar altında 121°C'de 20 dakika otoklavlanan Nutrient Broth'a (NB) aktarılmış ve ardından soğutulmuştur. Daha sonra deneylerde kullanılacak sıvı bakteri kültürünü elde etmek için bakteri çalkalama koşullarında (150 rpm) 30 °C'de 24 saat inkübe edilmiştir (Birhanlı ve diğ, 2020). Bakteri üretiminde kullanılan saf suyun üretildiği saf su cihazı Şekil 3.11'de, dik tip otoklav da Şekil 3.12'de verilmiştir.



Şekil 3. 11 Besiyeri hazırlanma işlemlerinde kullanılan saf suyun üretildiği saf su cihazı



Şekil 3. 12 Alp marka dik tip otoklav

Bu işlemten sonra sıvı kültürdeki canlı bakteri sayısını belirlemek için seri dilüsyon yapılmış ve ardından steril nutrient agar plakalarına aktarılan seyreltilmiş kültürler statik inkübatörde 30 °C'de 24 saat inkübe edilmiştir. İnkübasyon sonrası yapılan koloni sayımı sonucunda sıvı kültürde koloni oluşturan birim/mililitre (CFU/mL) değerinin 1×10^9 CFU/mL olduğu tespit edilmiştir. Buna göre deneysel çalışmalarda hem 1×10^9 CFU/mL hücre yoğunluğunda sıvı kültür hem de steril nutrient broth ile 100 kez seyreltilmiş 1×10^7 CFU/mL sıvı kültür elde edilmiştir. Böylece, ana deneyler kapsamında kullanılması planlanan 1×10^9 ve 1×10^7 CFU/mL konsantrasyona sahip bakteri kültürleri hazırlanmıştır. Hazırlanan bakteri kültürleri dökümden önce 5 saat boyunca 60 °C sıcaklıkta ısıtılarak spor

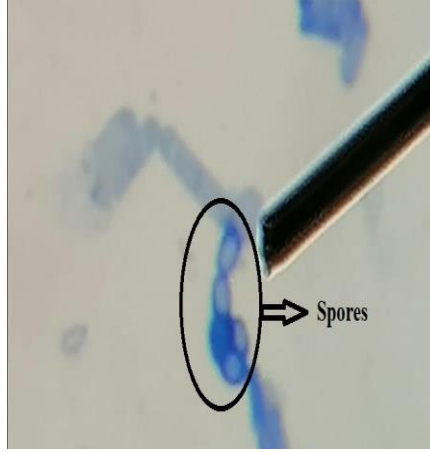
hale getirilmiştir. Bakteri üretiminde kullanılan inkübatör Şekil 3.13'te, farklı konsantrasyonlara sahip sıvı bakteri kültürleri Şekil 3.14'de ve mikroskopik incelemelerden elde edilen spor görüntüleri ise Şekil 3.15'te gösterilmiştir.



Şekil 3. 13 İnkübatör



Şekil 3. 14 10^9 CFU/mL (a) ve 10^7 CFU/mL (b) konsantrasyona sahip *Bacillus subtilis* sıvı kültürleri



Şekil 3. 15 Bakteri sporlarının mikroskopik görüntüsü (1500 kez büyütülmüş)

3.2.2. Ön deney süreci

Ön deney sürecinde öncelikle, bakteri ve besin maddeleri ile geopolimer hamur numunelerinin maruz kalacağı kür şartlarının belirlenmesi işlemleri gerçekleştirilmiştir. Belirtilen farklı parametrelerden yola çıkılarak toplam 10 adet numune grubu üretilmiştir. 0,4 sıvı/bağlayıcı oranında üretilen geopolimer hamur örnekleri, ilk olarak 5*5*5 cm boyutlarında çelik kalıplara yerleştirilmiş ve 24 saat sonra kalıptan çıkarılmıştır. Kalıptan çıkarılan örnekler, ilk 7 gün boyunca laboratuvar koşullarında bekletilmiş, geri kalan 21 günlük süre zarfında da belirlenen farklı kür ortamlarında iyileşmeye bırakılmıştır. İlk 7 günlük laboratuvar kürünün ardından tüm örnekler basınç gerilmelerine maruz bırakılarak yüzeylerinde farklı boyutlarda çatlaklar oluşturulmuştur. Daha sonra, tüm örnekler 21 gün boyunca farklı kür ortamlarında bekletilmiştir. Ana deney sürecinde üretilecek karışım içeriği, 28 günlük iyileşmiş numunelerin SEM-EDS gözlemlerinin yanısıra mikroskopik incelemelerin de yardımıyla belirlenmiştir. Ön deneylerde dikkate alınan parametreleri özetleyen Çizelge 3.3'den de görüleceği üzere; toplam 4 farklı numune içeriği dört farklı kür ortamında bekletilmiştir. 7. günün sonunda oluşturulan çatlakların başarıyla kapatılması ile ilgili birtakım öngörülerde (pozitif veya negatif) bulunmuş ve iyileşme sonunda yapılan mikroskopik gözlemler ile SEM-EDS analizleri neticesinde bu öngörülerin gerçekleşip gerçekleşmediği ile ilgili gözlemler Çizelge 3.3'te "✓" işareti ile sembolize edilmiştir. Bu sembol ise, çatlakların kapanması açısından çalışmaya başlamadan düşünülen beklentilerin karşılandığını ifade etmektedir. Ön deneyler sonucunda elde edilen bulgular ışığında, ana deneylerde kullanılacak numune içeriğinin "Referans + bakteri" örneği olmasına karar verilmiştir. Toplam 10 farklı karışım üzerinde yapılan mikro yapısal ve mikroskopik

gözlemlere “Araştırma Bulguları ve Tartışma” bölümünde yer verilmiştir. Ayrıca, ön deneylerde bakteri konsantrasyonu 10^9 CFU/mL ve bakteri/bağlayıcı oranı %1 olarak belirlenmiştir.



Çizelge 3. 3 Ön deneylerde kullanılan numune içerikleri

Grup Kodu	Numune İçeriği	Kür Ortamı	Kendini onarma yeteneği	
			Beklene n	Gerçekleşen
R - (W)	Referans	Su	Negatif	✓
R - (N)	Referans	Çökeltme Ortamı	Negatif	✓
R - (B)	Referans	Bakteri kültürü	Negatif	✓
R - (N+B)	Referans	Çökeltme Ortamı + Bakteri kültürü	Pozitif	✓
R+N - (W)	Referans + Besin	Su	Negatif	✓
R+N - (B)	Referans + Besin	Bakteri kültürü	Pozitif	✓
R+B - (W)	Referans + Bakteri	Su	Negatif	✓
R+B - (N)	Referans + Bakteri	Çökeltme Ortamı	Pozitif	✓
R+N+B - (W)	Referans + Besin + Bakteri	Su	Pozitif	✓
R+N+B - (N)	Referans + Besin + Bakteri	Çökeltme Ortamı	Pozitif	✓

3.2.3. Geopolimer hamur örneklerinin üretimi

Bu tez çalışmasında bağlayıcı malzeme olarak YFC kullanılmıştır. Na_2SiO_3 kullanılarak aktive edilen geopolimer hamur numunelerinde alkali sıvı / bağlayıcı oranı 0,40 olarak sabit tutulmuştur. İlk olarak, istenen oranlarda alınan sıvı bakteri kültürü ile Na_2SiO_3 iki dakika boyunca karıştırılmıştır. Sıvı karışımında homojenliğin sağlanmasının ardından, sıvı karışım ile YFC 5 dk boyunca karıştırılmıştır. Karışım işleminin tamamlanmasının ardından, taze geopolimer hamur örnekleri 5x5x5 cm boyutlarında çelik küp kalıplara dökülmüştür. Üretim aşaması bu şekilde tamamlanan numuneler, 7. günün sonuna kadar laboratuvar şartlarında bekletilmiş, daha sonra 21 günlük iyileşme sürecine maruz bırakılmıştır. 7. günün sonunda, tüm örnekler üç farklı kür ortamında (laboratuvar, su ve çökeltme ortamı) bekletilerek 28 günlük özelliklerinin araştırılması amaçlanmıştır. Çökeltme ortamları ise 20 g/L üre, 20 g/L maya özü ve 30 g/L $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ bileşenlerinden oluşmaktadır. 10^7 ve 10^9 CFU/mL bakteri içeren bakteri kültürleri, geopolimer hamur karışımlarına bağlayıcı ağırlığının %1, %2 ve %3'ü oranlarında ilave edilmiştir. Bakteri içeren tüm karışımlarda, bakteri kültürleri Na_2SiO_3 ile ikame edilerek karışımların sıvı/bağlayıcı oranlarının sabit bir değerde tutulması amaçlanmıştır. Çizelge 3.4 geopolimer hamur örneklerinin karışım oranlarını özetlemektedir.

Çizelge 3. 4 Geopolimer hamur numunelerin karışım oranları

Numune Grupları	YFC, (g)	Sıvı miktarları, (gr)		Bakteri Konsantrasyonu, (CFU/mL)	Bakteri / bağlayıcı oranı, (%)	Sıvı/bağlayıcı oranı	Kür Ortamı
		Na ₂ SiO ₃	Bakteri				
R	R-N	1000	400	-	-	0.4	Çökeltme O.
	R-W	1000	400	-	-		Su
	R-A	1000	400	-	-		Lab.
1	1-N	1000	390	10	10 ⁹	0.4	Çökeltme O.
	1-W	1000	390	10	10 ⁹		Su
	1-A	1000	390	10	10 ⁹		Lab.
2	2-N	1000	380	20	10 ⁹	0.4	Çökeltme O.
	2-W	1000	380	20	10 ⁹		Su
	2-A	1000	380	20	10 ⁹		Lab.
3	3-N	1000	370	30	10 ⁹	0.4	Çökeltme O.
	3-W	1000	370	30	10 ⁹		Su
	3-A	1000	370	30	10 ⁹		Lab.
4	4-N	1000	390	10	10 ⁷	0.4	Çökeltme O.
	4-W	1000	390	10	10 ⁷		Su
	4-A	1000	390	10	10 ⁷		Lab.
5	5-N	1000	380	20	10 ⁷	0.4	Çökeltme O.
	5-W	1000	380	20	10 ⁷		Su
	5-A	1000	380	20	10 ⁷		Lab.
6	6-N	1000	370	30	10 ⁷	0.4	Çökeltme O.
	6-W	1000	370	30	10 ⁷		Su
	6-A	1000	370	30	10 ⁷		Lab.

3.2.4. Geopolimer harç örneklerinin üretimi

Bu bölümde, bağlayıcı malzeme olarak YFC'nin, alkali aktivatör olarak ise Na_2SiO_3 'ün kullanıldığı bu tez çalışmasının ikinci kısmını oluşturan kendini onaran geopolimer harç üretimi hakkında bilgi verilecektir. Geopolimer hamur örneklerinin üretim metoduna benzer bir şekilde, geopolimer harç numuneleri üretilirken de 10^7 and 10^9 CFU/mL bakteri içeren bakteri kültürleri, geopolimer harç karışımlarına bağlayıcı ağırlığının %1, %2 ve %3'ü oranlarında ilave edilmiştir. Başlangıçta, ince agrega ve YFC homojen bir katı karışım elde edilmesi amacıyla karıştırılmıştır. Daha sonra, belirli oranlarda alınan sıvı bakteri kültürü ile Na_2SiO_3 2 dakika boyunca karıştırılmıştır. Sıvı karışımda homojenliğin sağlanmasının ardından, sıvı karışım ile YFC ve ince agrega ile 5 dk boyunca karıştırılmıştır. Homojen bir geopolimer harç karışımı elde edildikten sonra, taze karışımlar 5x5x5 cm boyutlarında çelik küp kalıplara dökülmüştür. Bakteri içeren ve içermeyen örnekler, kalıptan çıkarıldıktan sonra 7. günün sonuna kadar laboratuvar koşullarında bekletilmiş ve bazı özelliklerinin belirlenmesi için çeşitli testler yapılmıştır. Geri kalan örnekler ise, 7. günün sonundan 28. günün sonuna kadar üç farklı ortamda (laboratuvar, su ve çökeltme ortamı) kür edilmiştir. Agregası olarak ise 0-4 mm tane çapında dere agregasının kullanıldığı geopolimer harç örnekleri Şekil 3.16'da, geopolimer harç örneklerinin karışım oranları ise Çizelge 3.5'te verilmiştir.



Şekil 3. 16 Üretilen geopolimer harç numuneleri

Çizelge 3. 5 Geopolimer harç numunelerin karışım oranları

Numune Grupları	YFC, (gr)	Sıvı miktarları, (gr)		İnce Agreg, (gr)	Bakteri Konsantrasyonu, (CFU/mL)	Bakteri / bağlayıcı oranı, (%)	Sıvı/bağlayıcı oranı	Kür Ortamı
		Na ₂ SiO ₃	Bakteri					
R	R-N	1000	550	-	2000	-	-	Çökeltme O.
	R-W	1000	550	-	2000	-	-	Su
	R-A	1000	550	-	2000	-	-	Lab.
1	1-N	1000	540	10	2000	10 ⁹	1	Çökeltme O.
	1-W	1000	540	10	2000	10 ⁹	1	Su
	1-A	1000	540	10	2000	10 ⁹	1	Lab.
2	2-N	1000	530	20	2000	10 ⁹	2	Çökeltme O.
	2-W	1000	530	20	2000	10 ⁹	2	Su
	2-A	1000	530	20	2000	10 ⁹	2	Lab.
3	3-N	1000	520	30	2000	10 ⁹	3	Çökeltme O.
	3-W	1000	520	30	2000	10 ⁹	3	Su
	3-A	1000	520	30	2000	10 ⁹	3	Lab.
4	4-N	1000	540	10	2000	10 ⁷	1	Çökeltme O.
	4-W	1000	540	10	2000	10 ⁷	1	Su
	4-A	1000	540	10	2000	10 ⁷	1	Lab.
5	5-N	1000	530	20	2000	10 ⁷	2	Çökeltme O.
	5-W	1000	530	20	2000	10 ⁷	2	Su
	5-A	1000	530	20	2000	10 ⁷	2	Lab.
6	6-N	1000	520	30	2000	10 ⁷	3	Çökeltme O.
	6-W	1000	520	30	2000	10 ⁷	3	Su
	6-A	1000	520	30	2000	10 ⁷	3	Lab.

3.2.5. Yapılan deneyler

Üretim prosedürlerinden kısaca bahsedilen geopolimer hamur ve harç örneklerinden toplam 645 adet üretilmiş ve bu örnekler üzerinde aşağıda sıralanan deneyler gerçekleştirilmiştir.

3.2.5.1. Basınç dayanımı tayini

Kendini onaran geopolimer hamur ver harç numunelerinin 7 ve 28 günlük basınç dayanımı değerleri ASTM C109 standardına uygun bir şekilde elde edilmiştir. 5x5x5 cm boyutlarındaki küp numuneler cihaz başlıkları arasına yükün uygulama yönü, beton döküm yönüne dik olacak şekilde yerleştirilmiştir. Alt kısımda bulunan başlığın merkezine yerleştirilen numuneler 1,4 kN/s yükleme hızında kırılmıştır. Her bir numune grubu için üçer adet örnek üretilmiş ve basınç dayanımı değerleri bu üç numunenin ortalama basınç dayanımı değeri olarak alınmıştır. Basınç dayanımı test cihazı Şekil 3.17'de görülmektedir.



Şekil 3. 17 Basınç dayanımı test cihazı

3.2.5.2. Viskozite tayini

Kendini onaran geopolimer hamur numunelerinde, bakteri ilavesinin reolojik özelliklere etkisini incelemek amacıyla Brookfield DV-E Viskozimetre cihazı ile ölçümler gerçekleştirilmiştir. Oda sıcaklığında gerçekleştirilen deneyde, taze geopolimer hamur karışımının homojenliğini sağlamak amacıyla örnekler ilk olarak 100 s⁻¹ kesme hızında 60 sn boyunca karıştırılmıştır. 5, 6, 10, 12, 20, 30, 50, 60 ve 100 rpm'de gerçekleştirilen viskozite ölçümlerinde 5, 6 ve 7 numaralı spindle uçları kullanılmıştır. Viskozite ölçüm aleti Şekil 3. 18'de görülmektedir.



Şekil 3. 18 Viskozite deney aleti

3.2.5.3. Geopolimerizasyon ısısı tayini

Kendini onaran geopolimer hamur numunelerin geopolimerizasyon ısısı ölçümleri İzotermal Kalorimetre cihazı kullanılarak ASTM C186-17 (2019) standardının belirlemiş olduğu kurallara uygun bir şekilde gerçekleştirilmiştir. Hidratasyon ısısı ölçümlerinde; 10 gr YFC deney tüpüne yerleştirilmiştir. Daha sonra sıvı kısım, ağırlığı 5 gr gelecek şekilde boş enjektör içerisine çekilmiştir. Bağlayıcı malzemenin içerisine konulduğu tüp ve sıvı kısmın yer aldığı enjektör kalorimetre cihazının içerisine yerleştirilmiştir. Referans numunelerin yanısıra, 10^7 ve 10^9 CFU/mL konsantrasyona sahip %2 bakteri içeren numunelerin geopolimerizasyon ısısı değerlerinin ölçümü için 0.2 g bakteri solüsyonu ve 4.8 g Na_2SiO_3 içeren sıvı karışımı ve 10 g YFC kullanılmıştır. Kabin bölgesinin üst kapağı kapatıldıktan sonra, kabin bölgesinin termal dengeye ulaşması için (< 0.05) belirli bir süre beklenmiştir. Kabin termal dengeye ulaştıncaya, enjektör içerisinde bulunan sıvının bağlayıcının bulunduğu tüp içerisine girmesi amacıyla kapağın üzerinde bulunan döner mil çevrilmiştir. Başlangıç aşaması belirtilen şekilde gerçekleştirilen bu deneye 72 saat boyunca devam edilmiştir (Kantarcı, 2018). Geopolimerizasyon ısısının ölçüldüğü izotermal kalorimetre cihazı Şekil 3.19'da görülmektedir.



Şekil 3. 19 İzotermal kalorimetre cihazı

3.2.5.4. Görsel inceleme

Kendini onaran geopolimer hamur örnekleri üzerinde 7. günde oluşturulan farklı boyutlardaki çatlakların kapanma performansının incelenmesinde optik mikroskop gözlemlerinden yararlanılmıştır. Deneylerde kullanılan optik mikroskop Şekil 3.20’de görülmektedir.



Şekil 3. 20 Optik mikroskop

3.2.5.5. Mikro yapısal inceleme

Bakteri yoluyla kendini onaran geopolimer örneklerin mikro yapılarının incelenmesi amacıyla SEM, EDS ve XRD analizleri gerçekleştirilmiştir. Yapılan SEM analizi sonucunda, mikrobiyal kaynaklı kalsiyum karbonat çökeltilerinin görülmesi amaçlanmış, EDS analizleri ile de gözlenen yapıların element analizleri gerçekleştirilmiştir. Bu sayede, farklı parametreler kullanılarak üretilen geopolimer örneklerde bakteri yoluyla kendini onarma işleminin olup olmadığı ile ilgili güvenilir veriler toplanmıştır.

3.2.5.6. Fiziksel ölçümler

Geopolimer hamur bünyesine iyileştirici ajan olarak ilave edilen bakterilerin, örneklerin fiziksel özellikleri üzerindeki etkisini incelemek amacıyla su emme, görünür porozite, yığın yoğunluk, açık gözeneklerin hacmi ve kapiler su emme deneyleri yapılmıştır. ASTM C 642-06 standardına uygun olarak gerçekleştirilen fiziksel ölçümler için tüm numunelerin etüv kurusu (W_k), doygun (W_d) ve su içinde ağırlık (W_s) değerleri ölçülmüştür. Geopolimer örneklerin suya doygun ağırlıkları, numunelerin 24 saat boyunca su altında bekletilmesi sonucu elde edilen ağırlık değeri olarak alınmıştır. Etüv kurusu numunelerin ağırlıkları ise numuneler 54 saat boyunca 60 °C sıcaklıkta etüvde bekletildikten sonra elde edilmiştir. Deney sonuçları aşağıda verilen denklemler kullanılarak elde edilmiştir. Su altı ağırlık değerleri ise suya doygun halde bulunan numunelerin yüzey nemi temizlendikten sonra su içinde ağırlık ölçümü sonrasında elde edilmiştir. Geopolimer örneklerin çeşitli fiziksel özellikleri, bu üç farklı ağırlık değerlerinin kullanıldığı aşağıda verilen denklemler yardımıyla belirlenmiştir.

Su emme:

$$\Omega = (W_D - W_K) / W_K \times 100 \quad (3.1)$$

Yığın yoğunluk:

$$\rho_b = [W_K / (W_D - W_S)] \times \rho_s \quad (3.2)$$

Görünür porozite:

$$P = [(W_D - W_K) / (W_D - W_S)] \times 100 \quad (3.3)$$

Geçirimli boşlukların görünür hacmi:

$$G. H. = W_D - W_K \quad (3.4)$$

Denklemlerde verilen simgeler;

W_D : Suya doymun numunenin ağırlığı, (g)

W_K : Etüv kurusu numunenin ağırlığı, (g)

W_S : Su altındaki numunenin ağırlığı, (g)

ρ_s : Suyun yoğunluğu, (g/cm³)

Geopolimer harç örneklerin kılcal su emme değerlerinin ölçümünde ise etüv kurusu haline getirilmiş örneklerin (Şekil 3.21) alt kısımda su ile temas edecek yüzeyi açıkta kalacak şekilde, diğer tüm yüzeyleri parafinle kapatılmıştır. Daha sonra, suyla temas eden alt kısımdan kapiler yolla emilen su miktarı hassas terazi yardımıyla tartılmıştır. ASTM C1585-13'e uygun olarak gerçekleştirilen deneylerde, tüm örneklerden 5, 15, 30, 60, 480, 960 ve 1440. dakikalarda ölçümler alınmış ve toplam deney süresi 24 saat olarak belirlenmiştir. Numunelerin kılcal su geçirimsizlik sonuçları belirlenen 7 farklı sürede aşağıdaki denklem yardımıyla elde edilmiştir.

$$kc = \left(\frac{Q}{A}\right)^2 \times \frac{1}{t} \quad (3.5)$$

Denklemden verilen simgeler;

kc: Kılcal su emme katsayısı (cm²/sn)

A: Su ile temas eden yüzey alanı (cm²)

t: Ölçüm alınan süre (s)

Q : t zaman aralığında emilen su miktarı (cm³)



Şekil 3. 21 Geopolimer numunelerin etüv kurusu haline getirilmesi

3.2.5.7. Sülfat direnci tayini

Üretimi takip eden 7. günün sonunda üç farklı kür ortamına bırakılan numunelerin 21 günlük bekleme süresinin ardından sülfat direncinin araştırılması işlemi gerçekleştirilmiştir. % 5'lik $MgSO_4$ çözeltisi içerisinde daldırılan 28 günlük numunelerin 28 gün boyunca sülfat saldırısı sonucu gösterdikleri performans değerleri incelenmiştir.

3.2.5.8. Asit direnci tayini

Sülfat direncine benzer şekilde, kendini onaran geopolimer örneklerin asit saldırısı etkisi altında gösterdiği direncin belirlenmesi amacıyla % 5'lik HCl çözeltisi hazırlanmıştır. 28. günün sonunda farklı bekleme ortamlarından çıkarılan numuneler 28 günlük asit direnci testine tabi tutulmuştur.

3.2.5.9. Rebound testi

Geopolimer harç numunelerinin Rebound testi yardımıyla darbe dayanıklılığı değerleri 10x20 cm boyutlarındaki silindirik numuneler kullanılarak elde edilmiştir. Bu deney, belirli bir yükseklikten (h_b) numuneler üzerine düşürülen 0,5 kg ağırlığındaki bir çelik bilyenin harç numuneler üzerine çarptıktan sonra belirli bir yüksekliğe (h_a) kadar çıkması prensibine dayanmaktadır. Çelik bilyenin başlangıç durumundaki potansiyel enerjisi ($E_{p,1}$) ve

geopolimer harç yüzeyine çarptıktan sonra son yüksekliğindeki sahip olduğu potansiyel enerjisi ($E_{p,2}$) aşağıdaki gibi hesaplanır: (Abdelmonem ve diğ, 2019)

$$E_{p,1} = m \cdot g \cdot h_b \quad (3.6)$$

$$E_{p,2} = m \cdot g \cdot h_a \quad (3.7)$$

Çelik bilyenin yüksekliklerine bağlı olarak başlangıç ve son potansiyel enerjilerin belirlenmesinin ardından geopolimer harç numunelerinin enerji yutma kapasitesi aşağıdaki gibi hesaplanmıştır:

$$E_p = |E_{p,1} - E_{p,2}| \quad (3.8)$$

Rebaunt test mekanizması Şekil 3.22’de verilmiştir.



Şekil 3. 22 Rebound test mekanizması

3.2.5.10. Elektriksel özdirenç deneyi

10x20 cm boyutlarındaki geopolimer harç numuneleri üzerinde elektriksel özdirenç değerleri elde edilmiştir. Ohm kanununa bağlı kalarak, hesaplanan voltaj değerleri akım değerlerine bölünmüştür. Elde edilen değerler, numunelerin boyutları kullanılarak elektriksel özdirenç değerleri hesaplanmıştır. Bu hesaplamada kullanılan denklem aşağıda verilmiştir;

$$\rho = \frac{V}{I} \times \frac{A}{L} \quad (3.9)$$

Burada; ρ elektriksel direnç ($\Omega.m$), V voltaj (mV), I uygulanan akım değeri (mA), A elektrotlar ve geopolimer harç arasındaki en kesit alanı (m^2), L ise ölçüm mesafesini sembolize etmektedir. Şekil 3.23 elektriksel direnç değerlerinin ölçüldüğü numuneleri ve ölçümü göstermektedir.



Şekil 3. 23 Elektriksel dirençlerin ölçülmesi için hazırlanan geopolimer harç numuneleri

3.2.5.11. Mini slump deneyi

Taze geopolimer hamur numunelerinin işlenebilirlik özelliklerinin incelenmesi amacıyla mini-slump testi gerçekleştirilmiştir. Kantro, (1980) tarafından geliştirilen mini-slump deneyinde temiz ve düzgün bir yüzeyin merkezine yerleştirilen koni şeklindeki kalıp taze geopolimer hamur numunesi ile doldurulmuştur. Koninin yavaşça yukarı kaldırılması sonucunda yayılmanın tam anlamıyla tamamlanması için belirli bir süre (30 sn) beklenmiştir. Daha sonra metre kullanılarak birbirine dik iki doğrultuda yayılma çapları ölçülmüş ve bu değerlerin ortalaması alınmıştır. Bu şekilde elde edilen değerlerin viskozite sonuçları ile karşılaştırmaları yapılmış ve bakteri kullanımının işlenebilirlik üzerindeki etkileri detaylı bir şekilde yorumlanmıştır. Mini slump deneyi Şekil 3.24’de görülmektedir.



Şekil 3. 24 Mini-slump deneyi

3.2.5.12. Yarmada çekme dayanımı

Üç farklı bakteri/bağlayıcı oranı, iki farklı bakteri konsantrasyonu ve üç farklı kür rejimi dikkate alınarak üretimine geopolimer harç örneklerinin 28 günlük yarmada çekme dayanımı değerleri ASTM C496 / C496M-11 standardına uygun bir şekilde gerçekleştirilmiştir. 100x200 mm boyutlarındaki silindir numuneler üzerinde gerçekleştirilen bu deneyde, yükün tüm kesit üzerine homojen yayılmasını sağlamak üzere alt ve üst kısımlara aparat yerleştirilmiştir (Şekil 3.25).



Şekil 3. 25 Yarmada çekme dayanımı

4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

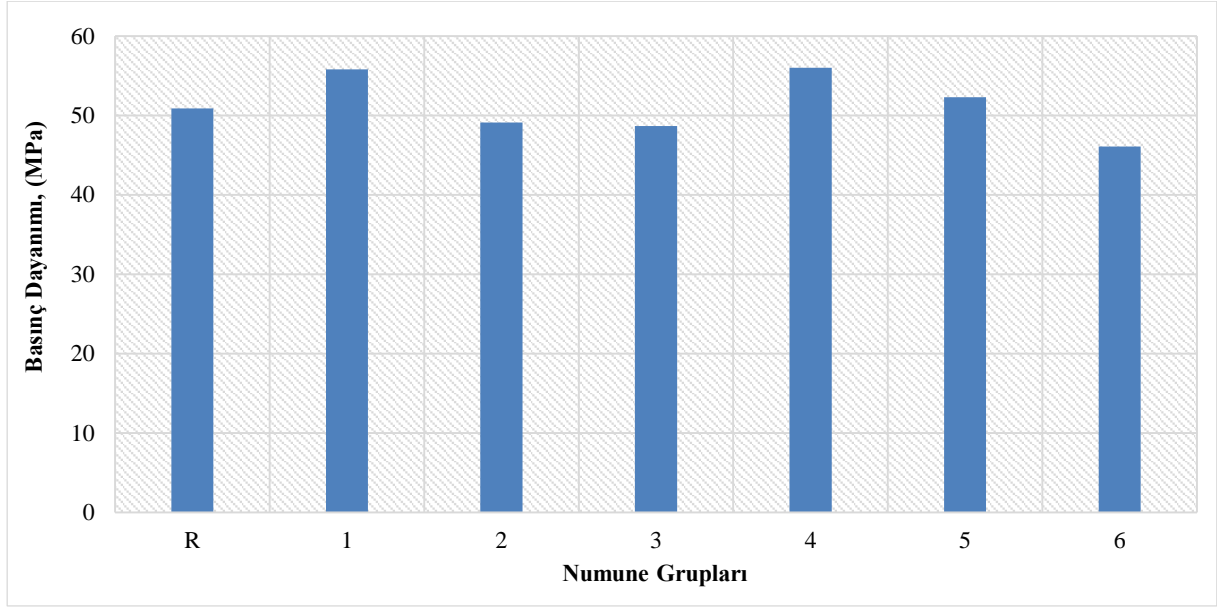
Geopolimer hamur ve harç örneklerine *Bacillus subtilis* bakterisinin iyileştirici etken olarak eklenmesi sonucunda üretilen kendini onaran geopolimer örneklerin çeşitli performansları incelenmiş ve yorumlanmıştır.

4.1. Geopolimer Hamur

4.1.1. Geopolimer hamur örneklerinin basınç dayanımı

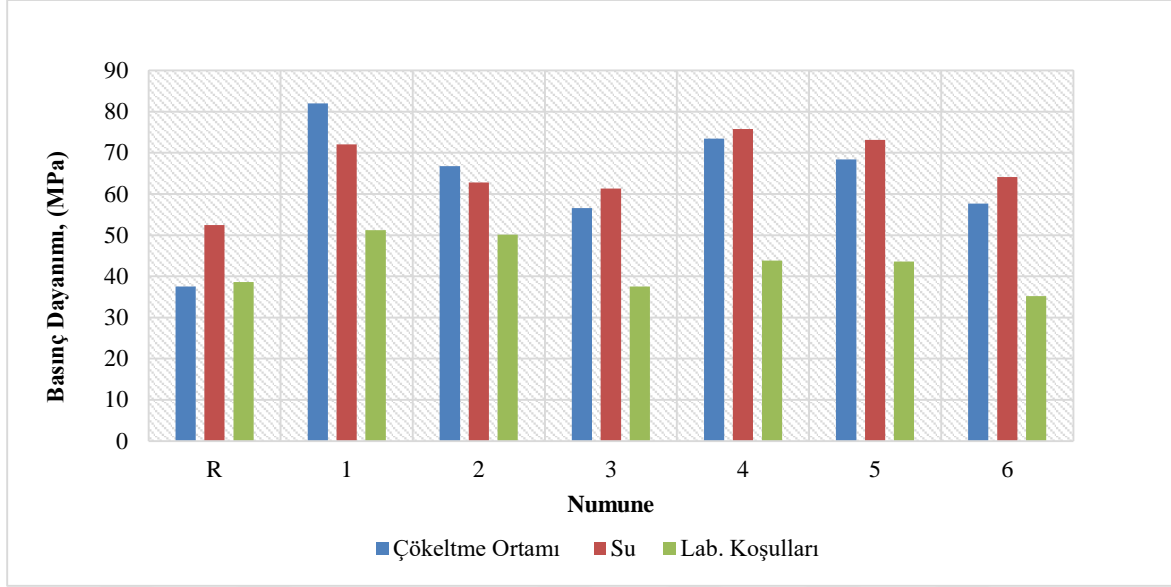
4.1.1.1. Bakteri/ bağlayıcı oranının basınç dayanımına etkisi

Farklı bakteri/bağlayıcı oranlarının (% 0, 1, 2 ve 3) geopolimer hamur numunelerinin basınç dayanımı değerlerine etkisi incelenmiştir. Şekil 4.1. ve Şekil 4.2’de görüldüğü gibi, kullanılan iki farklı bakteri konsantrasyonundan (10^7 ve 10^9 CFU/mL) bağımsız olarak, maksimum basınç dayanımı değerleri %1 bakteri/bağlayıcı oranı kullanılarak üretilen numunelerden elde edilmiştir. Şekil 4.1 üretilen geopolimer hamur örneklerin 7 günlük basınç dayanımı değerlerini göstermektedir. 7 günlük maksimum basınç dayanımı değerleri 10^7 CFU/mL konsantrasyona sahip %1 bakteri/bağlayıcı oranında üretilen 4. grup numunelerden elde edilirken (referans örneğe kıyasla % 10’luk artış), minimum basınç dayanımı değerleri ise 10^7 CFU/mL konsantrasyona sahip %3 bakteri/bağlayıcı oranında üretilen 6. grup numunelerden (referans örneğe kıyasla %9.5 düşüş) elde edilmiştir. 10^7 CFU/mL konsantrasyona sahip numune gruplarına benzer şekilde 10^9 CFU/mL konsantrasyona sahip numune gruplarının 7 günlük basınç dayanımı sonuçları da maksimum basınç dayanımının % 1 bakteri/bağlayıcı oranına sahip olarak üretilen 1. grup numunelerden (referans örneğe göre % 9.67’lik artış), minimum basınç dayanımı değerlerinin ise dayanımının % 3 bakteri/bağlayıcı oranına sahip 3. grup numunelerden (referans örneğe göre % 4.32’lik azalma) elde edildiğini göstermiştir. Deneysel bulgular ayrıca, bakteri ilavesinin 7 günlük basınç dayanımına etkisinin 28 günlük basınç dayanımlarına olan etkilerinden daha az olduğunu göstermiştir. Benzer bir çıkarım kalsiyum laktat ve bakteri spor tozlarının hamur örneklerinin kendini onarma mekanizmasına etkisinin araştırıldığı bir çalışmada yapılmıştır. Araştırmacılar, referans örneklere kıyasla bakterili örneklerin erken yaş basınç dayanımının düştüğü, ancak 28 günlük basınç dayanımı değerlerinin ise kontrol örneklere kıyasla artış gösterdiğini bildirmişlerdir (Luo ve Qian, 2016).



Şekil 4. 1 Geopolimer hamur numunelerin 7 günlük basınç dayanımı değerleri

Şekil 4.2’de görüldüğü gibi maksimum basınç dayanımı değerleri, 1. grup numunelerin 7 günlük basınç dayanımına kıyasla yaklaşık % 47’lik artış ile 10^9 CFU/mL konsantrasyonuna sahip, çökeltme ortamında kür edilmiş ve bakteri/bağlayıcı oranı %1 olan 1-N grubu numunelerden elde edilmiştir. 7 günlük basınç dayanımı değerlerinde de gözlemlendiği gibi, 28 günlük basınç dayanımı değerlerinde her iki bakteri konsantrasyonu için bakteri/bağlayıcı oranının %1’den fazla oranda kullanılması basınç dayanımı değerlerinde büyük oranlarda düşümlere neden olmuştur. Deneysel bulgular, ayrıca, 10^9 CFU/mL konsantrasyona sahip numune gruplarında bakteri/bağlayıcı oranının %1’den %3’e çıkmasıyla birlikte 28 günlük basınç dayanımı değerlerinin çökeltme ortamında, suda ve laboratuvar koşullarında kür edilen örnekler için sırasıyla yaklaşık %30, %15 ve %27 oranlarında azaldığını göstermiştir. Benzer şekilde, 10^7 CFU/mL konsantrasyona sahip numune gruplarında da bakteri/bağlayıcı oranının %1’den %3’e yükselmesi ile 28 günlük basınç dayanımı değerlerinin çökeltme ortamında, suda ve laboratuvar koşullarında kür edilen örnekler için sırasıyla yaklaşık %21, %15 ve %20 oranlarında azalmalar gözlemlenmiştir. Elde edilen test sonuçlarına paralel bir şekilde, uçucu kül kullanılarak üretilen geopolimer hamur numunelerinin performanslarına bakteri ilavesinin etkisinin araştırıldığı bir çalışmada, bakteri ilavesinin basınç dayanımı değerlerinde %43,75 oranında artışa yol açtığı gözlemlenmiştir (Wulandari ve diğ., 2021). Ayrıca, karışım suyuna % 1 ve % 6 oranında değişen bakteri ilavesinin etkisinin araştırıldığı bir başka çalışmada ise en yüksek mukavemet değerlerinin % 3.5 bakteri ilavesi ile elde edildiği belirtilmiştir (Buller ve diğ., 2021).

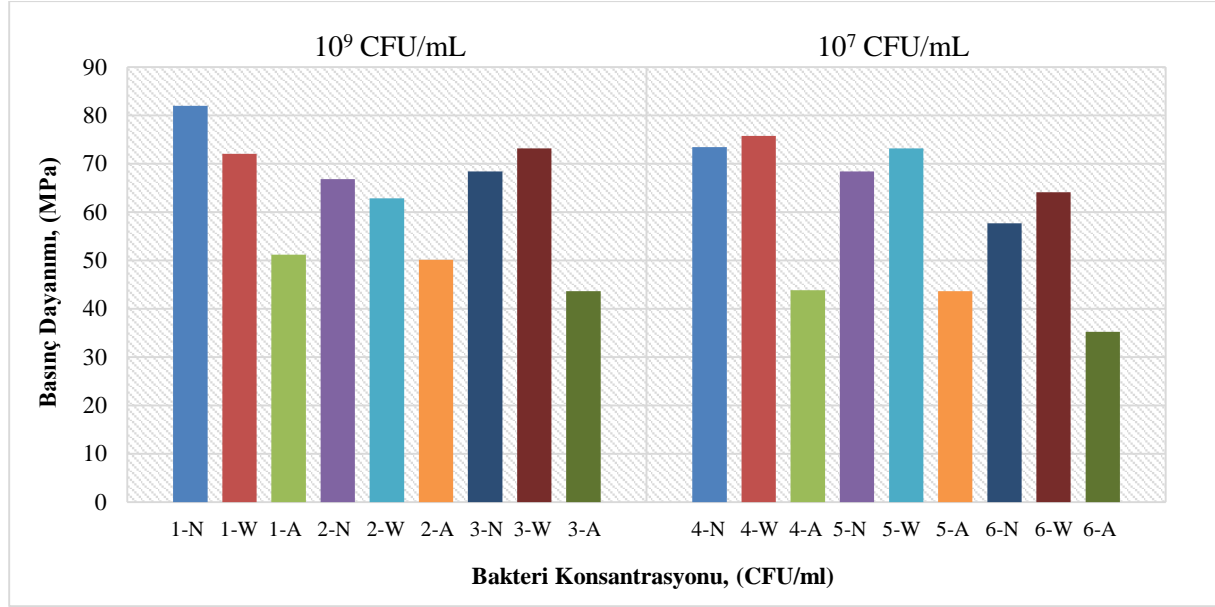


Şekil 4. 2 Geopolimer hamur numunelerin 28 günlük basınç dayanımı değerleri

4.1.1.2. Bakteri konsantrasyonunun basınç dayanımına etkisi

İki farklı bakteri konsantrasyonu (10^7 ve 10^9 CFU/mL) kullanılarak üretilen kendini onaran geopolimer hamur numunelerin basınç dayanımı değerleri Şekil 4.3'te verilmiştir. Bakteri konsantrasyonunun 7 günlük basınç dayanımı değerleri üzerindeki etkisi hakkında net bir bağlantı kurulamamasına rağmen, 28 günlük basınç dayanımı değerleri için, 10^9 CFU/mL konsantrasyonunun genel olarak daha yüksek basınç dayanımı değerlerine yol açtığı gözlemlenmiştir. Deneysel bulgular, bakteri konsantrasyonunun geopolimer hamur örneklerinde yüksek mukavemet değerleri elde etmek için çok önemli bir parametre olduğunu ortaya koymuştur. Örneğin, çökeltme ortamında kür edilen geopolimer hamur örneklerinde bakteri konsantrasyonunun 10^7 CFU/mL'den 10^9 CFU/mL değerine yükselmesi, %1 ve %3 bakteri/bağlayıcı oranı kullanımı için basınç dayanımı değerlerini sırasıyla yaklaşık %12 ve %18 oranlarında arttırırken, %2 bakteri/bağlayıcı oranı kullanılan örneklerde ise yaklaşık %2 oranında azaltmıştır. Farklı bakteri konsantrasyonlarının pirinç kabuğu külü katkı geleneksel betonun mekanik özelliklerine etkisinin araştırıldığı bir çalışmada, maksimum basınç dayanımı değerlerinin 10^5 hücre/mL bakteri kullanımı ile elde edildiği belirtilmiştir (Ameri ve diğ., 2019). Benzer şekilde *B. megaterium*'un farklı konsantrasyonlarda kullanımının üretilen kendini onaran betonların performansına etkisinin araştırıldığı bir çalışmada ise optimum *B. megaterium* oranı 30×10^5 CFU/mL olarak belirlenmiştir (Andalib ve diğ., 2016). Ayrıca, bakteri konsantrasyonunda yaşanan değişikliklerin beton

performansına etkisinin araştırıldığı bir çalışmada ise, çatlakların onarılması açısından en avantajlı numunelerin 10^7 hücre/mL konsantrasyonuna sahip numuneler olduğu gözlenirken, 10^5 hücre/mL konsantrasyonuna sahip numunelerin ise basınç dayanımı gelişimi açısından daha iyi sonuçlara yol açtığı belirtilmiştir (Mondal ve Ghosh, 2018).

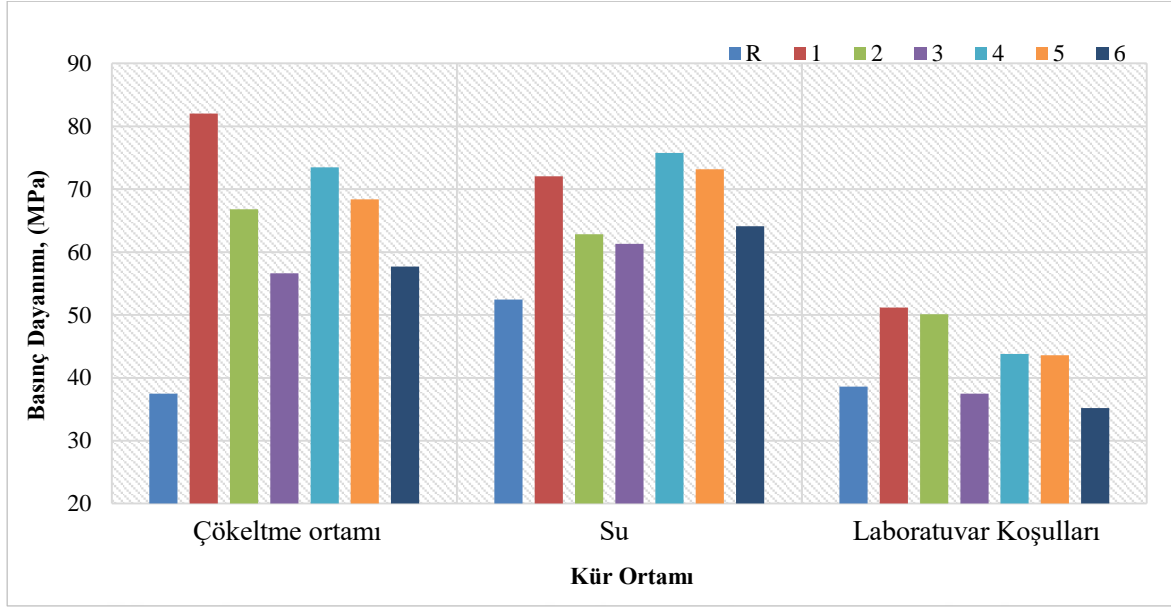


Şekil 4. 3 Bakteri konsantrasyonunun 28 günlük basınç dayanımı değerlerine etkisi

4.1.1.3. Uygulanan kür rejiminin basınç dayanımı gelişimine etkisi

Geopolimer hamur numunelerin basınç dayanımı gelişimlerine uygulanan kür rejiminin etkisi Şekil 4.4’de verilmiştir. Şekil 4.4, Na_2SiO_3 kullanılarak aktive edilen YFC kullanılarak üretilen geopolimer hamur numunelerinin laboratuvar şartlarında kür edilmesinin yüksek dayanım değerleri elde etmek için yeterli olmadığını göstermiştir. Ayrıca, çökeltme ortamında kür edilen ve maksimum basınç dayanımının görüldüğü 1-N numunelerinin 82 MPa mertebesindeki 28 günlük basınç dayanımının yine çökeltme ortamında kür edilen referans örneklerin basınç dayanımına nazaran (37.5 MPa) yaklaşık %118’lik bir artış gösterdiği gözlenmiştir. Bu durumun yanı sıra, bakteri ilave edilen tüm örneklerin çökeltme ortamında kür edilmesi sonucunda elde edilen basınç dayanımı değerlerinin referans numuneye göre çok daha yüksek olması, mikrobiyal kalsit çökeltmesi yoluyla çatlak ve boşlukları kapatmak suretiyle mekanik özellikler üzerinde olumlu bir etki sağladığı şeklinde yorumlanmıştır. Öte yandan, referans örneklerin çökeltme ortamı ve laboratuvar ortamında kür edilmesi 7 günlük basınç dayanımlarına göre sırasıyla %26 ve %24’lük azalmalara neden

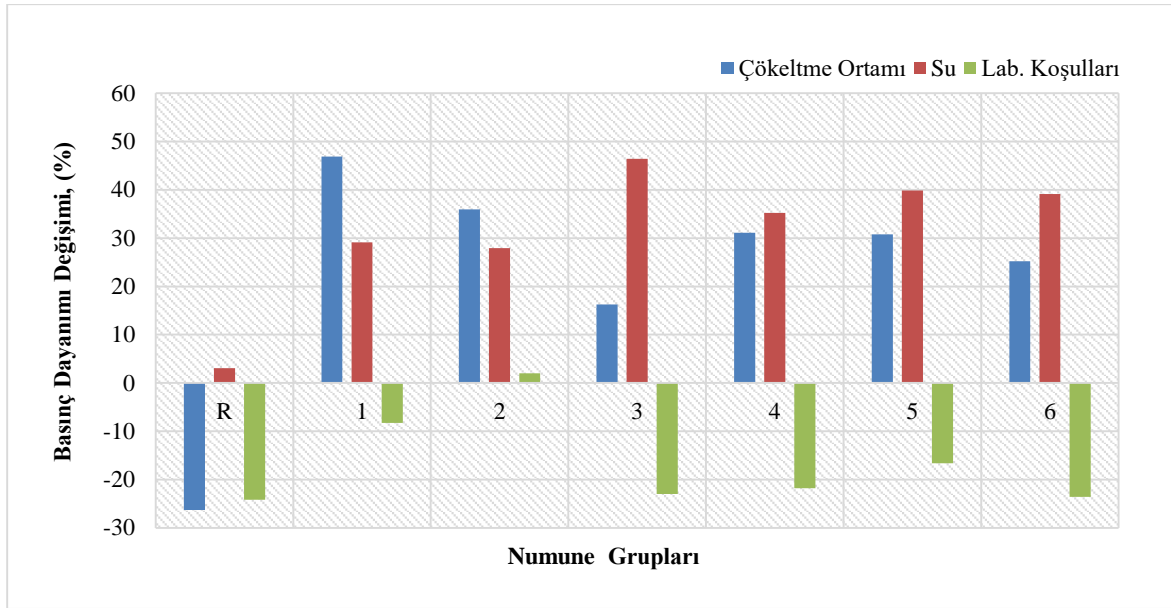
olurken, su içerisinde kür edilen referans örneklerin basınç dayanımlarının 7 günlük basınç dayanımına göre %3 oranında arttığı tespit edilmiştir. Daha önce de ifade edildiği gibi, 7 ve 28 gün arasında gözlenen en yüksek basınç dayanımı gelişimi %47'lik bir oranla çökeltme ortamında kür edilmiş, 10^9 CFU/mL konsantrasyonuna sahip, %1 bakteri/bağlayıcı oranında üretilen 1-N grubundan elde edilmiştir. Elde edilen bu çıkarımlara paralel olarak geleneksel harçların mekanik ve fiziksel performansına bakteri ilavesinin etkisinin incelendiği bir çalışmada, basınç dayanımı değerlerinde gözlenen en yüksek artışın %60 oranında üretilen kalsiyum klorür çözeltilisinde kürlenmiş numunelerden elde edildiği belirtilmiştir (Tayebani ve Mostofinejad, 2019). Basınç dayanımı sonuçları, ayrıca, geleneksel Portland çimentosu kullanılarak üretilen örneklerin aksine, YFC kullanılarak üretilen ve Na_2SiO_3 ile aktive edilen geopolimer numunelerinde zamanla mekanik özelliklerde herhangi bir iyileşme olmadığını göstermiştir. Bu durum, geopolimer numunelerinin mikro yapısının neredeyse sabit kaldığını ve bu nedenle mikrobiyal kaynaklı kendini onarma mekanizmasının hayati bir öneme sahip olduğunu göstermektedir. Referans numunelerin aksine, çökeltme ortamında kürlenme yöntemi, bakteri kullanılarak üretilen tüm numune grupları için basınç dayanımı değerlerinde önemli artışlara neden olmuştur. Ek olarak, 1. ve 2. grup numuneler dışında su kürü yöntemi ideal kür yöntemi olarak ortaya çıkarken, tüm numuneler için en elverişsiz kür yöntemi ise laboratuvar şartlarında kür olarak belirlenmiştir. Örneğin, referans numunelerin suda kür edilmesi halinde (52,45 MPa), laboratuvar koşullarında kür edilen referans örneklerine (38,6 MPa) kıyasla basınç dayanımının %36 oranında arttığı gözlenmiştir. Öte yandan, referans örnekler için en kötü kür yönteminin ise 37,5 MPa'lık basınç dayanımı değeri ile çökeltme ortamı olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 4. 4 Uygulanan kür rejiminin 28 günlük basınç dayanımı gelişimine etkisi

4.1.1.4. 7 ve 28 gün arasında meydana gelen basınç dayanımı değişimleri

Şekil 4.5 farklı parametreler kullanılarak üretilen geopolimer harç numunelerin 7 ve 28 gün arasındaki basınç dayanımı gelişimlerini göstermektedir. Laboratuvar koşullarında kür edilen geopolimer hamur numuneleri için, 10^9 CFU/mL konsantrasyonuna sahip, %2 bakteri/bağlayıcı oranında üretilen 2. grup numuneleri dışında diğer tüm örneklerin 28 günlük basınç dayanımı değerlerinin 7 günlük basınç dayanımı değerlerine göre düşüş gösterdiği belirlenmiştir. Laboratuvar koşullarında kür edilen numune grupları için, 7 günlük basınç dayanımı değerlerine göre meydana gelen en fazla düşüşler referans numunelerden elde edilirken (%24,61 azalma), minimum düşüşler ise 10^9 CFU/mL konsantrasyona sahip ve %1 bakteri/bağlayıcı oranı kullanılarak üretilen 1. grup numunelerden (%8,28 azalma) elde edilmiştir. 7 ve 28 gün arasında meydana gelen en yüksek basınç dayanımı gelişimi ise çökeltme ortamında kür edilen, 10^9 CFU/mL konsantrasyona sahip ve %1 bakteri/bağlayıcı oranı kullanılarak üretilen (1-N) numunelerden elde edilmiştir.

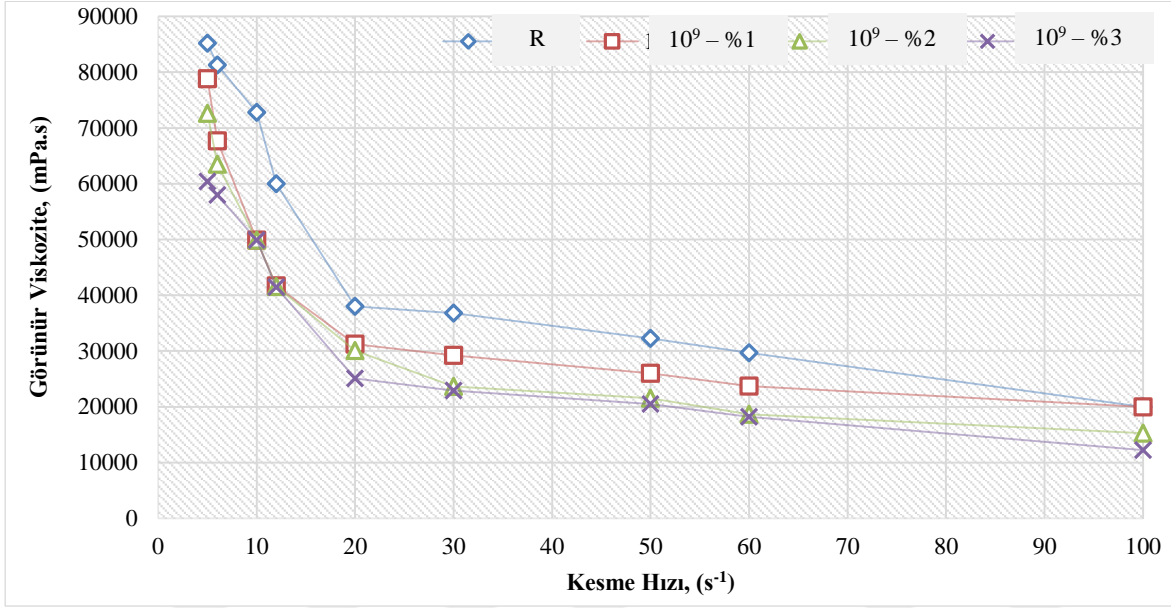


Şekil 4. 5 7 ve 28 gün arasında basınç dayanımı değerlerinde meydana gelen değişimler

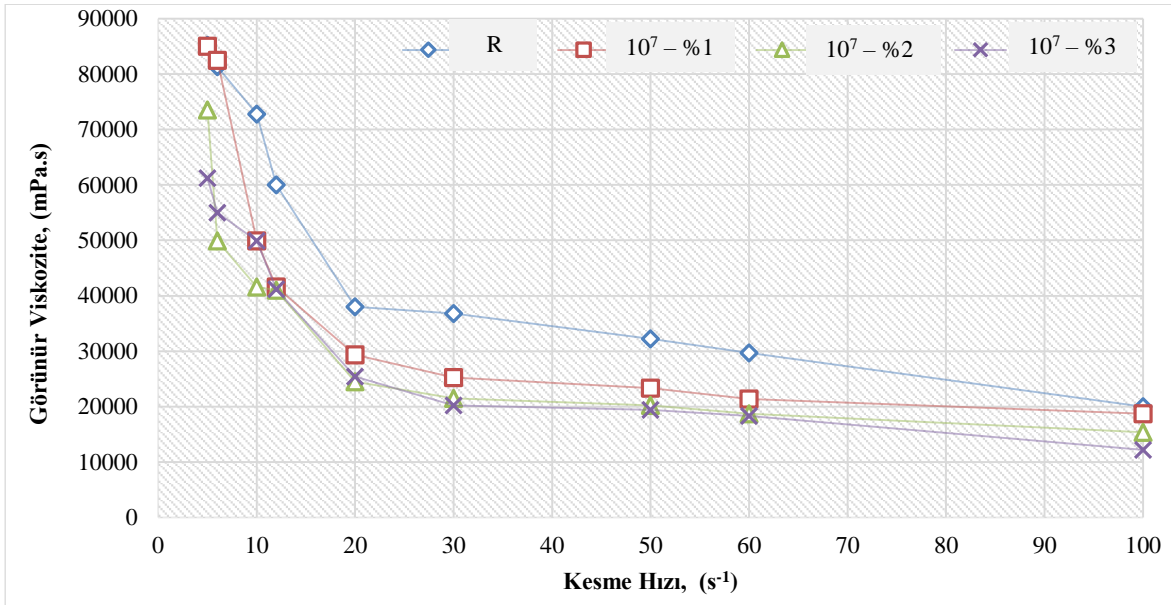
4.1.2. Geopolimer hamur örneklerin reolojik özellikleri

Şekil 4.6–4.8 geopolimer hamur örneklerin reolojik davranışları hakkında bilgi sunmaktadır. Geopolimer örneklerin viskozite değerlerinin sunulduğu Şekil 4.6 ve Şekil 4.7’den görüleceği gibi, tüm örneklerde kesme hızları arttıkça görünür viskozite değerlerinde azalmalar meydana gelmiştir. Ayrıca, sonuçlar, bakteri ilavesinin Na_2SiO_3 kullanılarak aktive edilen YFC esaslı geopolimer hamur örneklerinin viskozite değerlerinde azalmalara sebep olduğunu göstermiştir. Bakteri/bağlayıcı oranının artmasıyla birlikte, görünür viskozite değerlerinde ciddi azalmalar olduğu açıkça görülmektedir. Bu çıkarıma benzer bir şekilde, düşük w/c oranı (0,36) kullanılarak üretilen çimento hamuru örneklerinde bakteri hücre ilavesi ile viskozite değerlerinde düşüşler gözlenmiş ve bu durumun çimento hamurundaki ince parçacıkların yüksek paketlenme hızından kaynaklı olabileceği belirtilmiştir (Azima ve Bundur, 2019). Benzer şekilde, Luo ve Qian, (2016) tarafından yapılan bir çalışmada, bakteri ilavesinin çimento harcının reolojisini önemli ölçüde iyileştirdiği gözlenmiştir. Ek olarak, Şekil 4.8’de görüleceği üzere, mini-slump testi değerleri 165 mm ile 217.5 mm arasında değişiklik göstermiştir. Şekil 4.8, minimum yayılma çapı değerinin referans örneklerden (R), maksimum yayılma çapı değerinin ise 10^7 CFU/mL konsantrasyona sahip, %3 bakteri/bağlayıcı kullanılarak üretilen 6. grup numunelerden elde edildiğini gözler önüne sermiştir. Deneysel bulgular, bakteri konsantrasyonunda yaşanan artışın kendini onaran geopolimer örneklerin yayılma çaplarında azalmalara neden olduğunu ortaya çıkarmıştır.

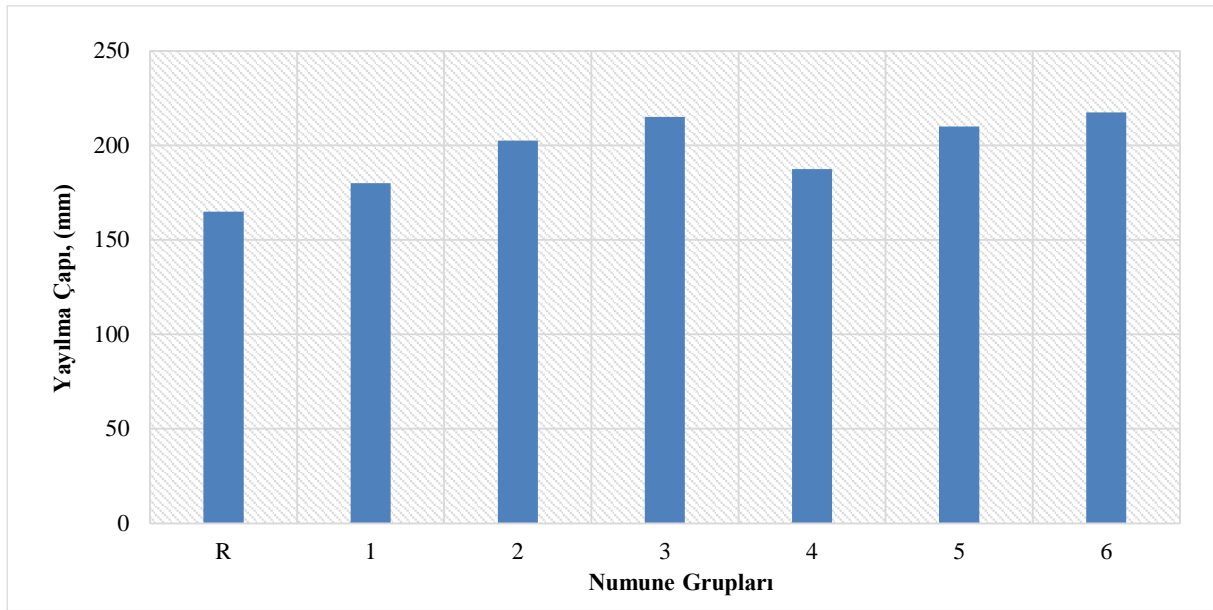
Beklendiği gibi, geopolimer örneklerin viskozite değerlerinin artmasıyla birlikte, mini slump testinden elde edilen yayılma çaplarının azaldığı belirlenmiştir. Elde edilen bu çıkarıma paralel olarak, kendiliğinden yerleşen harçların viskozite, V-hunisi ve mini slump test değerleri arasındaki ilişkinin araştırıldığı bir çalışmada elde edilen bulgular, numunelerin viskozite değerlerinin artmasıyla mini slump değerlerinde azalmalar gözlemlendiğini ortaya koymuştur (Bouziani ve Benmounah, 2013).



Şekil 4. 6 Referans ve 10^9 CFU/mL konsantrasyona sahip örneklerin görünür viskozite değerleri



Şekil 4. 7 Referans ve 10^7 CFU/mL konsantrasyona sahip örneklerin görünür viskozite değerleri



Şekil 4. 8 Geopolimer hamur örneklerin mini-slump test sonuçları

4.1.3. Geopolimer hamur örneklerin geopolimerizasyon kinetiği

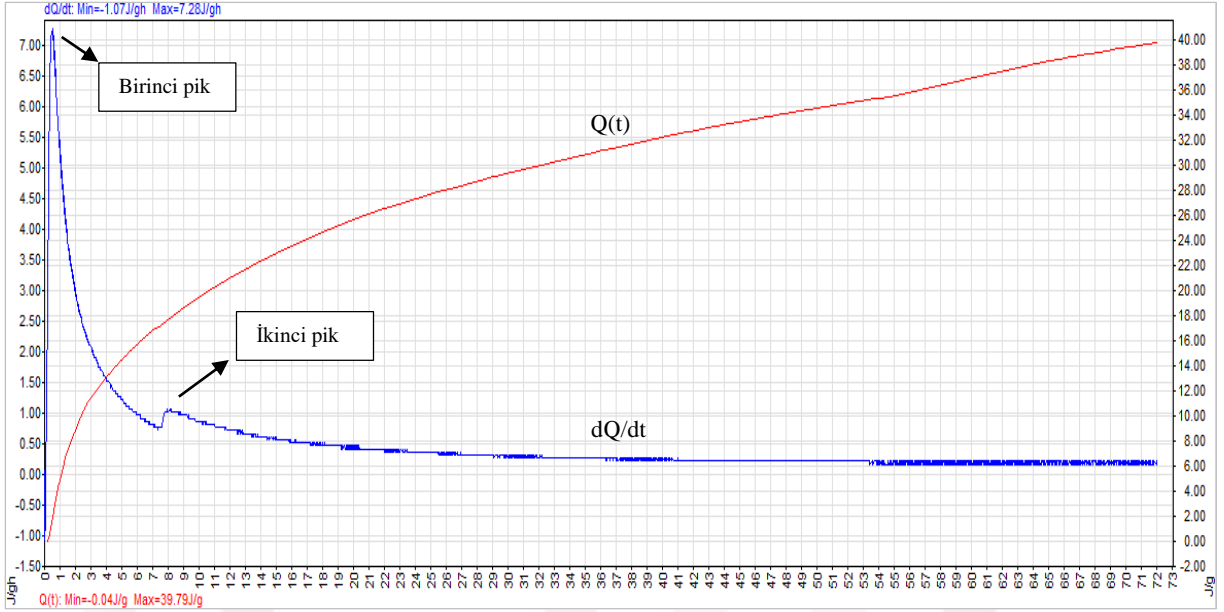
Bakteri ilavesinin geopolimerizasyon ısısı üzerindeki etkisini incelemek amacıyla 3 grup numune üzerinde her bir grup için 72 saat süren incelemeler yapılmıştır. Şekil 4.9 - 4.11 bakterili ve bakterisiz geopolimer hamur örneklerin geopolimerizasyon reaksiyonları sonucunda açığa çıkan ısı miktarlarını göstermektedir. Bu şekillerden görüleceği gibi, 72 saatlik geopolimerizasyon reaksiyonu sonucunda açığa çıkan en yüksek ısı miktarı bakteri kullanılmadan üretilen referans örneklerden elde edilmiştir. Ayrıca, tüm numune gruplarının geopolimerizasyon ısı grafiklerinde iki ana pik değeri gözlenmiştir. Tüm numune gruplarında, ilk pik değerinin, YFC ile bakterili veya bakterisiz sıvı karışımın karıştırılmasını takip eden ilk bir saat içinde ortaya çıktığı gözlenmiştir. İlk pik noktası oluşumunun, literatürde ham maddenin silikat ve alüminat monomerlerinin çözünmesi sonrası ortaya çıktığı ve bu pik noktaya çözünme piki adı verildiği belirtilmiştir (Ling ve diğ, 2019; Arjunan ve diğ, 2001).

Çözünme pikinden sonra oluşan ve polimerizasyon piki olarak adlandırılan ikinci pik oluşumu ise, her numune grubu için farklı zamanlarda meydana gelmiştir. Çözünme periyodu sırasında oluşan silikat ve alüminat monomerlerinin polimerleşmeye başlayarak alüminosilikat oligomerlerine dönüştüğü bu pik dönemi, geopolimer örneklerde mukavemet

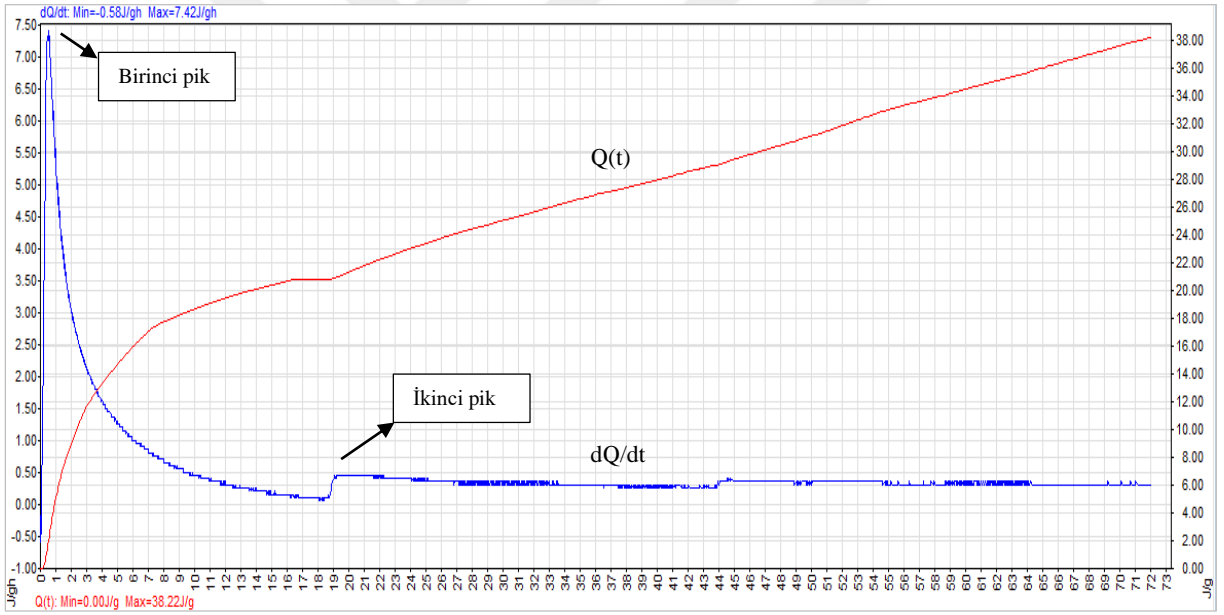
gelişimi açısından önemli bir yere sahip olan partiküllerin oluşumunun gerçekleştiği bir evre olarak tanımlanmaktadır (Eduok, 2016; Duxson ve diğ, 2005).

Şekil 4.9 - 4.11’de görüldüğü gibi, referans örneklerde ikinci pik oluşum süresi 8 saat civarında ortaya çıkarken, bakterili örneklerde ise bu sürenin 19 saat civarında meydana geldiğini göstermektedir. Bu durum, bakteri ilavesinin birinci pik noktası oluşum süresini çok fazla etkilemediğini ancak ikinci pikin oluşum süresini önemli ölçüde geciktirdiğini ortaya çıkarmaktadır. Deney sonuçları, ayrıca, bakteri konsantrasyonunda yaşanan artışın açığa çıkan toplam ısı değerlerinde azalmaya neden olduğunu göstermektedir. Elde edilen bu sonuç, üç farklı bakteri konsantrasyonunun (4×10^5 , 2×10^6 ve 3×10^7 CFU/mL) geleneksel çimento hamurunun hidrasyon ısısı üzerindeki etkisini araştıran önceki çalışma tarafından desteklenmektedir (Bundur ve diğ, 2015).

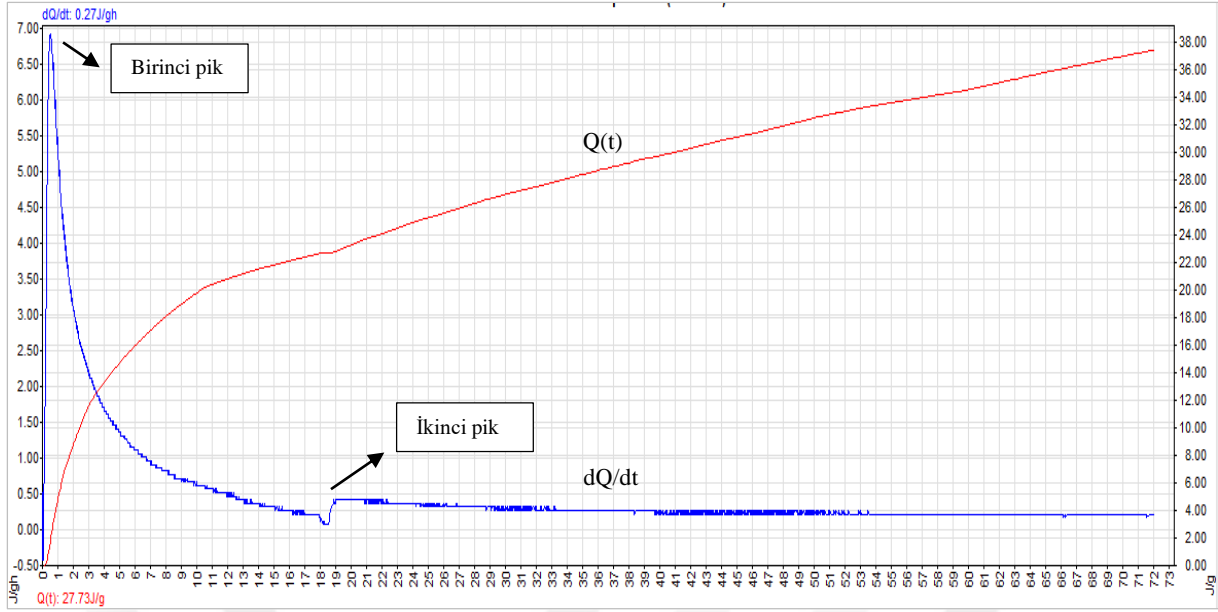
Öte yandan, elde edilen basınç dayanımı değerleri ile geopolimerizasyon ısıları arasındaki ilişki göz önüne alındığında, daha önce Ling ve diğ, (2019) tarafından gerçekleştirilmiş bir çalışmadan elde edilen bulgular ile bir tezatlık göze çarpmaktadır. Geopolimerizasyon reaksiyonu sonucu ortaya çıkan daha yüksek toplam ısı değerlerinin, üstün basınç dayanımı değerlerine yol açtığı belirtilen bu çalışmanın aksine, bakteri kullanılarak üretilen geopolimer numunelerin basınç dayanımı değerlerinin, toplam ısı değerleri daha yüksek olan referans numunelere göre daha yüksek olduğu gözlenmiştir. İlk bakışta bu iki çıkarım arasında bir zıtlık var gibi görünse de, geopolimerizasyon ısısı nispeten daha düşük olan bakterili örneklerin basınç dayanımı değerlerinin referans örneklere göre daha yüksek olması *Bacillus Subtilis*’in metabolik aktivitesi sonucu oluşan CaCO_3 çökeltmesi suretiyle çatlakların kapanmasının mekanik özellikleri iyileştirmesi şeklinde yorumlanabilir. Başka bir çalışmada ise mikrobiyal kültür ortamı içeren solüsyonlar kullanılarak üretilen numunelerin hidrasyon ısısının, herhangi bir mikrobiyal ajan içermeyen referans numunelerin hidrasyon ısısının sadece %62,5’i oranında gerçekleştiği gözlemlenmiştir (Kim ve diğ, 2020). Sonuçlar, bakteri kullanımının geopolimerizasyon ısısı üzerinde genel olarak azaltıcı bir etkiye sahip olduğunu gösterse de, çok da büyük bir etkisinin olmadığını ortaya çıkarmıştır. Bu çıkarıma paralel olarak, üç farklı kalsiyum kaynağının ve tek bir bakteri spor tozunun hidrasyon üzerindeki etkilerini inceleyen başka bir çalışmada ise, açığa çıkan ısıyı etkileyen ana faktörün bakteri değil, kullanılan ek kalsiyum kaynakları olduğu belirtilmiştir (Luo ve Qian, 2016).



Şekil 4. 9 Referans örneğin geopolimerizasyon ısısı eğrisi



Şekil 4. 10 10^7 CFU/mL konsantrasyona sahip, bakteri/bağlayıcı oranı %2 olan örneğin geopolimerizasyon ısısı eğrisi



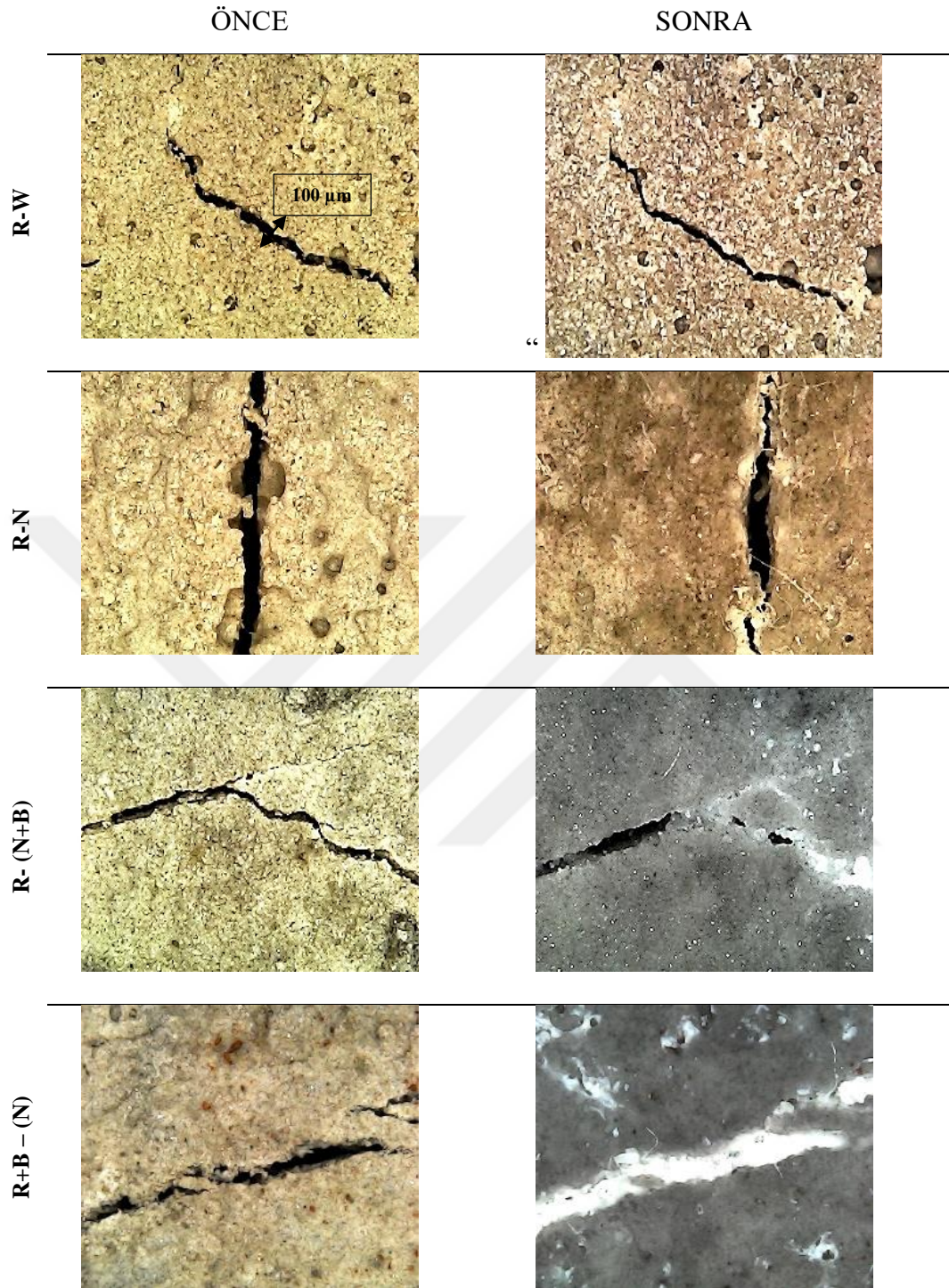
Şekil 4. $11 \cdot 10^9$ CFU/mL konsantrasyona sahip, bakteri/bağlayıcı oranı %2 olan örneğin geopolimerizasyon ısısı eğrisi

4.1.4. Çatlak onarım performansının mikroskop yardımıyla gözlemlenmesi

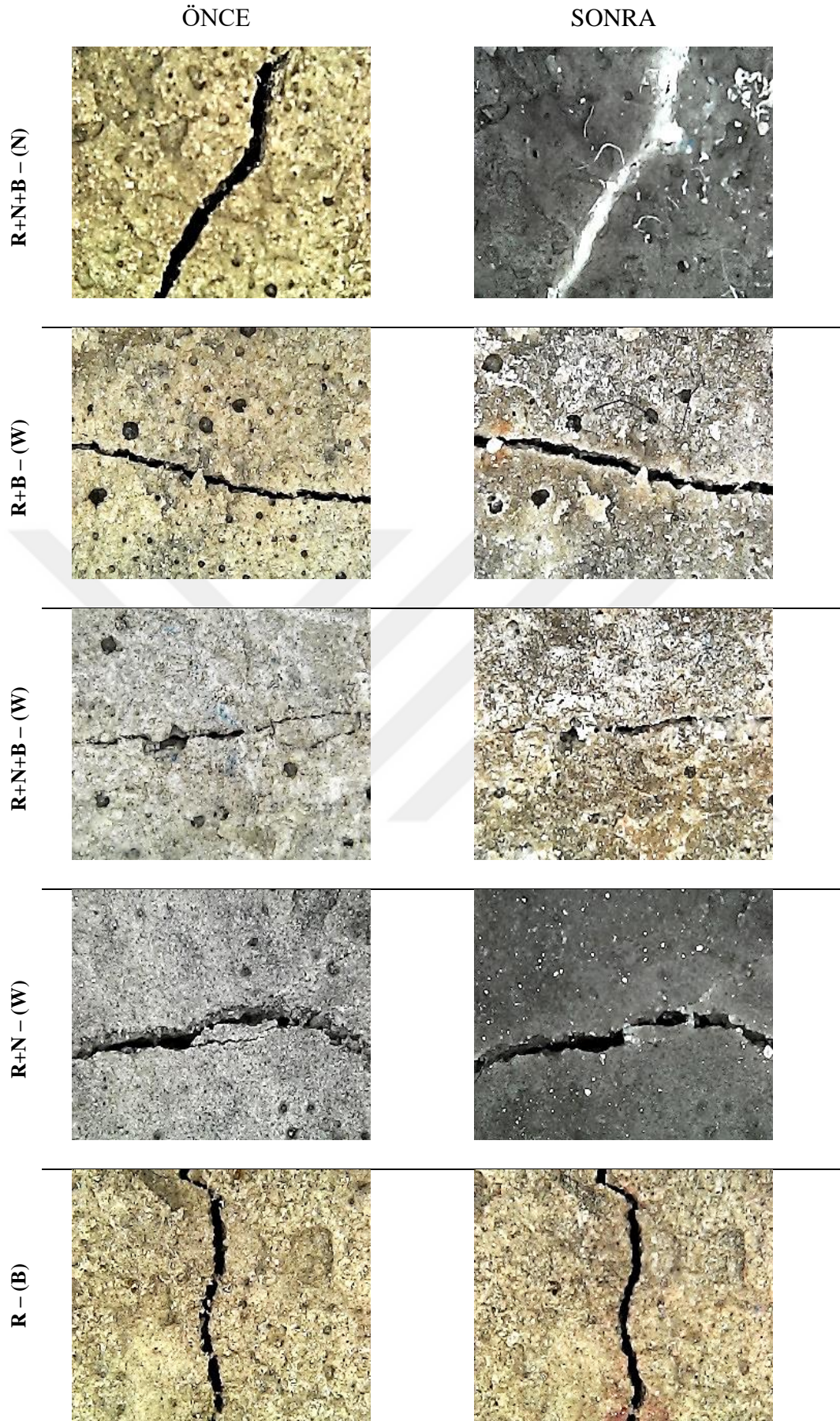
Geopolimer hamur örneklerinde kendi kendini iyileştirme mekanizmasını değerlendirmek için mikroskopik gözlemler gerçekleştirilmiştir. Ön deneyler kapsamında çatlak onarım kapasitesi hakkında birtakım beklentiler yapılan numune gruplarının farklı kür ortamlarında bekletilmesi sonucunda çatlakların ilk ve son hali incelenmiş ve gözlem sonuçları Şekil 4.12’de verilmiştir. Yapılan gözlemler, su ve çökeltme ortamında (R-W ve R-N) kürlenmiş referans numunelerde iyileşme gözlemlenmediğini göstermektedir. Benzer şekilde karıştırma sırasında bakteri ilave edilen ve suda kürlenmiş örneklerde de [R+B – (W)] herhangi bir iyileşme gözlenmemiştir. [R+B – (W)] örneklerinin yanı sıra, suda kür edilen diğer bir örnek grubu olan sadece besin ilaveli grupta da [R+N – (W)] herhangi bir onarım oluşumu gözlenmemiştir. [R+B – (N)] ve [R+B+N – (N)] örneklerinin iyileşme süreci öncesi ve sonrası görüntüleri ise oluşan çatlakları kapatan yeni ürünlerin oluştuğunu göstermektedir. En yüksek iyileşme oranının (%100) görüldüğü [R+B – (N)] ve [R+B+N – (N)] örneklerinin yanında, suda kür edilmiş bakteri ve besin ilaveli örneklerde de [R+B+N – (W)] nispeten daha düşük oranlarda iyileşmeler gözlenmiştir. Bu sonuçlar, herhangi bir immobilize ve kapsülleme tekniği olmadan karışıma direkt bakteri ilavesinin olduğu karışımlarda en etkin iyileşme yönteminin çökeltme ortamında kür ile sağlanabileceğini göstermektedir. Önceki bir çalışmada da, benzer şekilde, doğrudan karışıma eklenen bakteri

içeren geopolimer kompozitlerin çökeltme ortamında kür edildikten sonra çatlakların CaCO_3 ile kapatıldığı ve bu durumun bakterilerin daha sonraki yaşlarda da yaşayabildiğini gösterdiği belirtilmiştir (Jadhav ve diğ, 2018).





Şekil 4.12. Mikroskop görüntüleri



Şekil 4. 12 Mikroskop görüntüleri (devam)

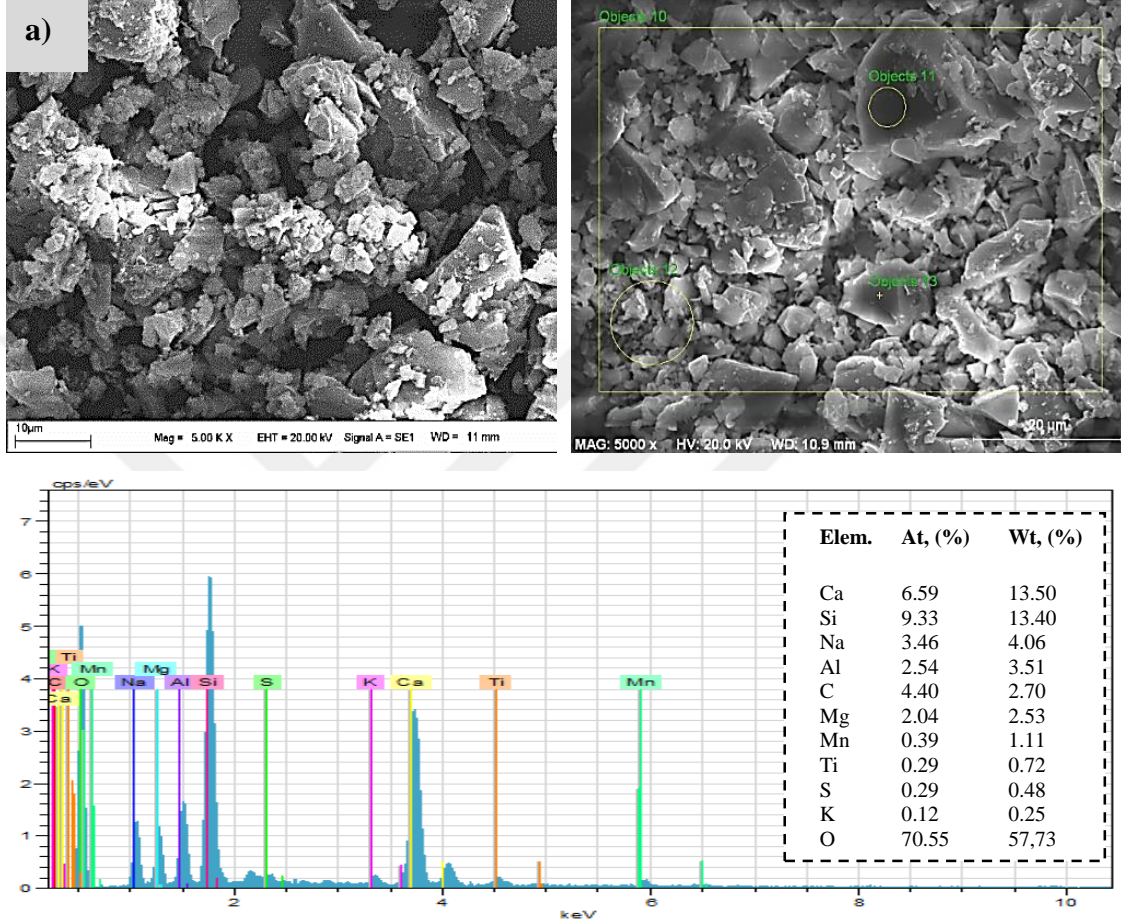
4.1.5. Geopolimer hamur örneklerin mikroyapı analizleri

Kendini onaran geopolimer hamur örneklerin çatlak onarım performanslarının incelenmesi amacıyla Enerji Dağılım Spektrometresi (EDS) ile birleştirilmiş Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) kullanılmıştır. Mikro yapısal gözlem sonuçları Şekil 4.13'te sergilenmiştir. Çatlaklar üzerinde oluşan beyaz renkli ürünlerin karakterizasyon işlemleri mikroyapısal analizler ile tamamlanmış ve bulgular literatürdeki bilgiler ile karşılaştırılmıştır. Farklı numune içeriklerine sahip ve farklı kür koşullarında iyileşmeye maruz bırakılan numunelerin hem mikroskobik hem de SEM-EDS gözlemleri, büyük farklılıkların ortaya çıktığını göstermiştir. Deneysel çalışmanın başında yapılan ve Çizelge 3.3.'de gösterilen ön deneylerde yapılan birtakım pozitif ve negatif beklentilerin gerçekleşip gerçekleşmediği mikroskop yardımıyla yapılan gözlemlerin yanı sıra SEM-EDS analizleri ile belirlenmiştir. Çatlak onarım performansı açısından pozitif beklentilerin yapıldığı ön deney numune grupları üzerinde gerçekleştirilen EDS analizleri, CaCO_3 oluşumuna işaret eden üç ana elementin (Ca, C ve O) diğer numunelere kıyasla çok daha yüksek atomik oranlarda yer aldığını göstermiştir. Mikrobiyal kaynaklı kalsit çökeltimesi yoluyla kendini onaran kompozitlerde gerçekleştirilen karakterizasyon çalışmalarında da bu şekilde benzer çıkarımlar yapılmıştır (Wiktor ve Jonkers, 2011; Tziviloglou ve diğ, 2016; Nguyen ve diğ, 2019; Li ve diğ, 2017).

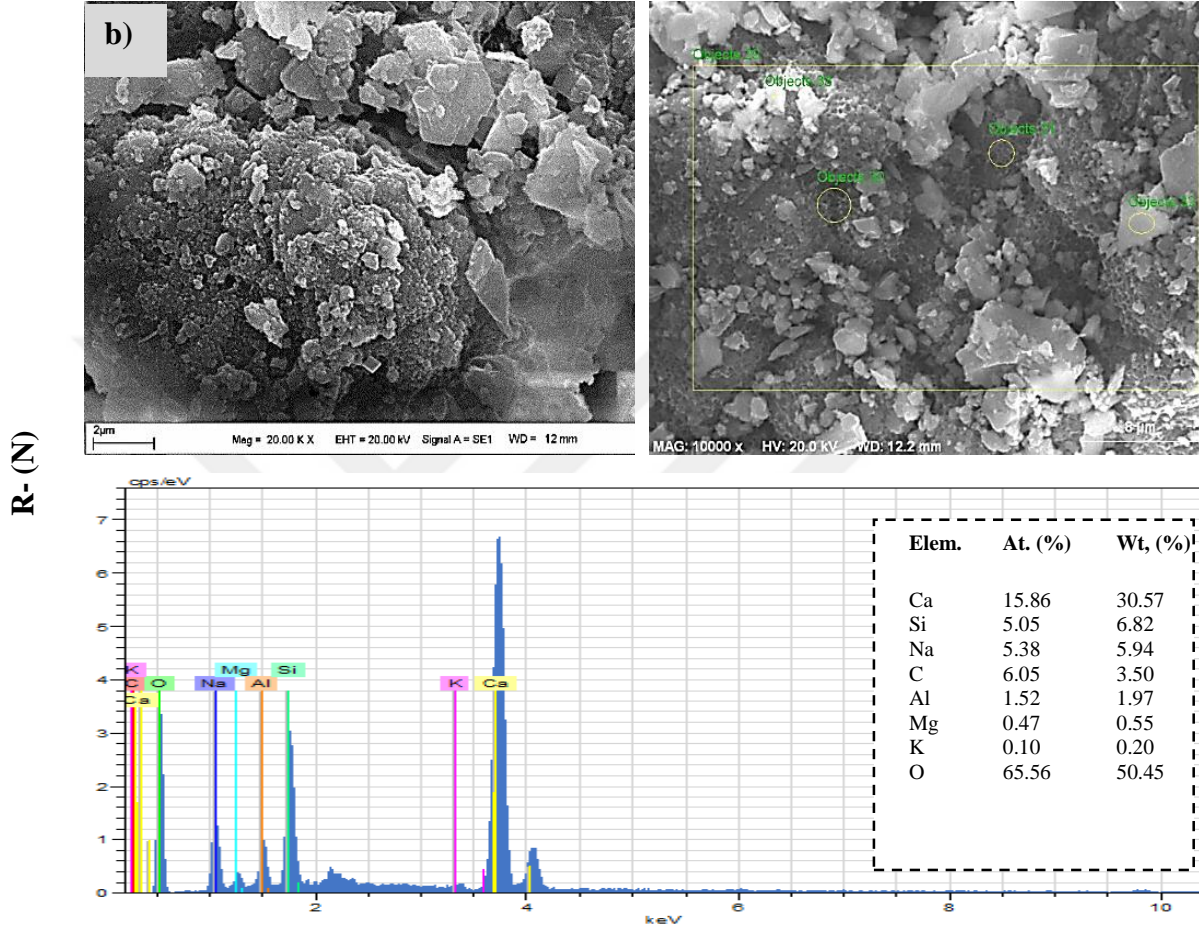
SEM gözlemleri çatlak onarım performansı bakımından pozitif beklentiler yapılan bu örnek gruplarında önemli CaCO_3 oluşumunu ortaya çıkarırken, EDS analiz sonuçları da CaCO_3 oluşumu gösteren üç ana elementin (Ca, C ve O) atomik yüzdelerinde diğer örnek gruplarına göre önemli artışlar olduğunu göstermektedir. Özetle, mikroyapısal gözlemler, bakteri esaslı kendi kendini iyileştirme mekanizmasının başarılı bir şekilde gerçekleşmesi için ortamda bakteri, üre ve ek kalsiyum kaynağının bir arada bulunması gerektiğini göstermektedir.

Şekil 4. 13(a)' da görüleceği gibi, suda kür edilen referans geopolimer hamur örneğinin SEM görüntülerinde belirgin çatlakların olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca, gerçekleştirilen EDS analizi sonuçları CaCO_3 oluşumuna işaret eden Ca ve C elementlerinin düşük atomik yüzdelerde olduklarını göstermektedir.

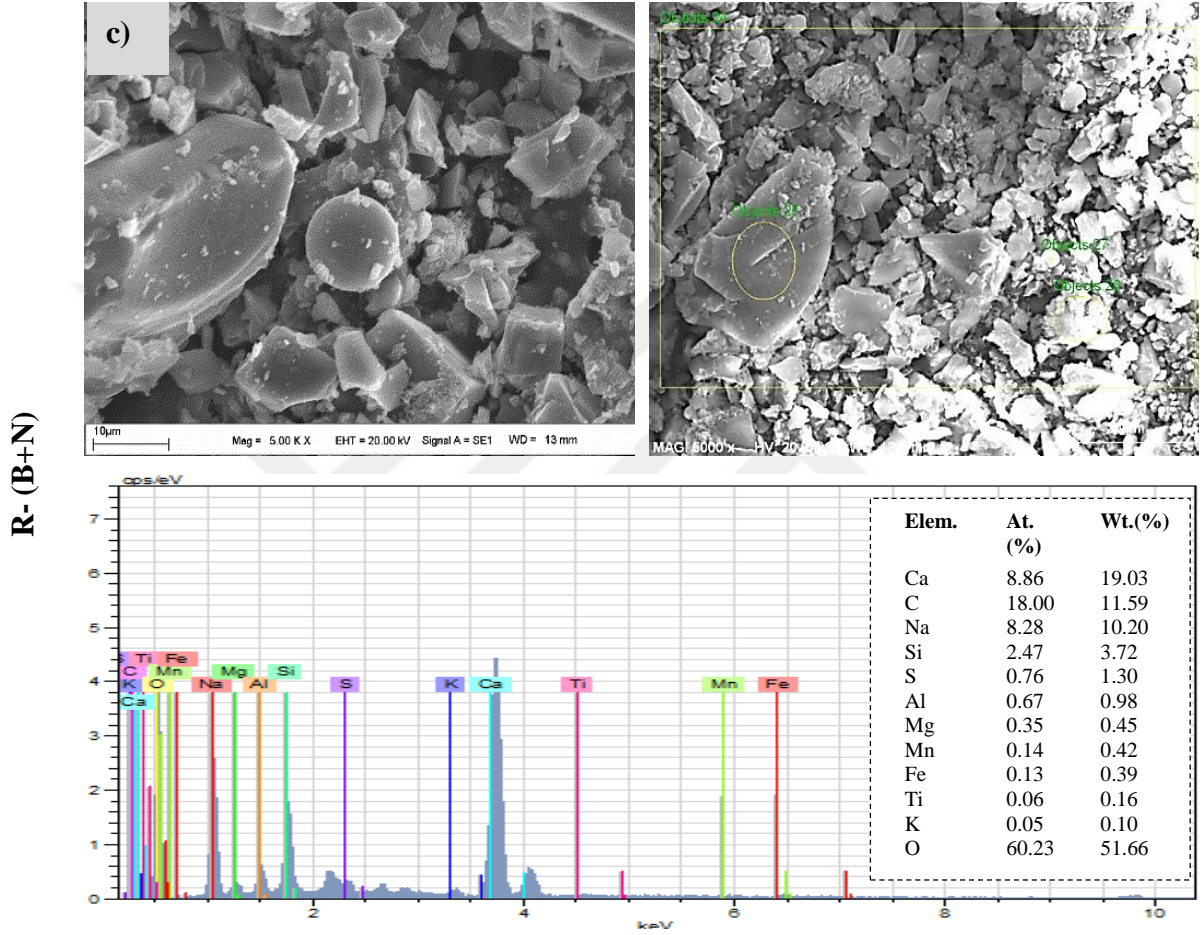
R- (W)



Şekil 4. 13(b)' de görüleceği gibi, çökeltme ortamında kür edilen referans geopolimer hamur örneğinin SEM-EDS analizleri gerçekleştirilmiş ve elde edilen bulgular suda kür edilen geopolimer hamur örneklerine benzer şekilde Ca ve C elementlerinin düşük atomik yüzdelerde olduklarını ortaya çıkarmıştır.

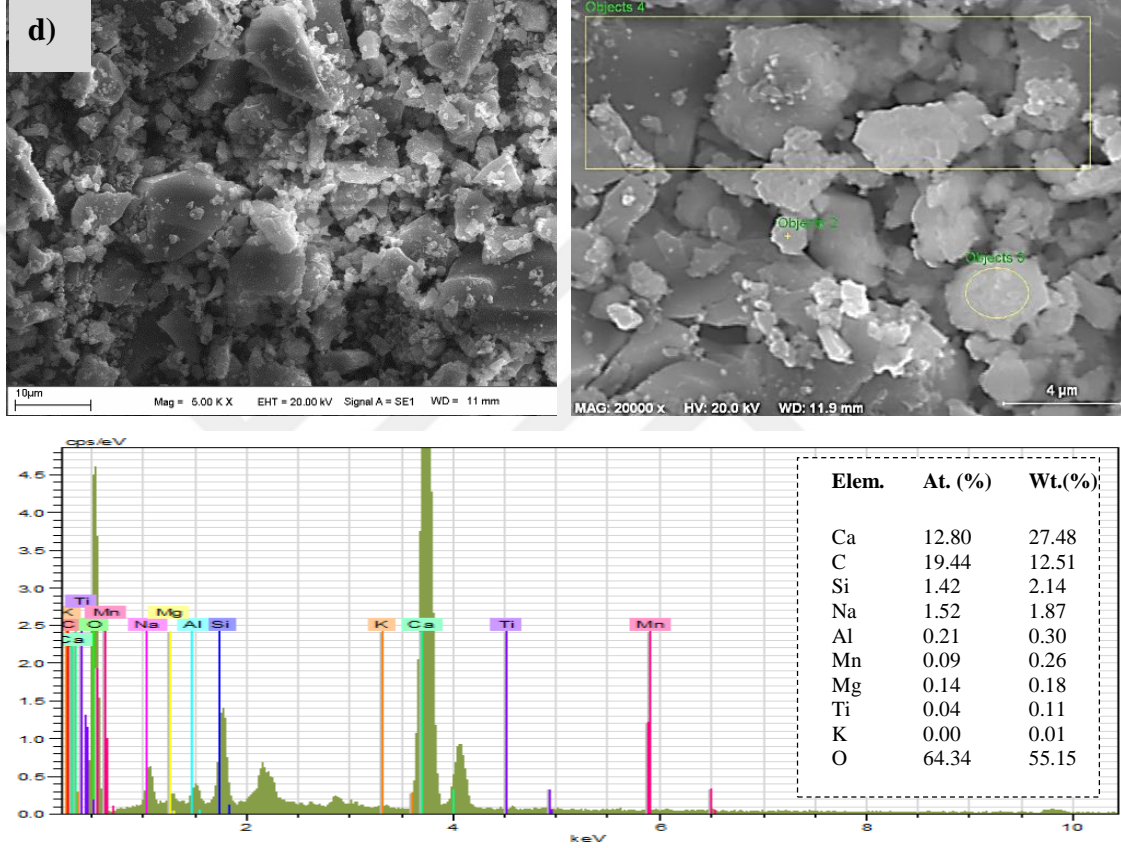


Şekil 4. 13(c)' de görüleceği gibi, bakteri kültürü + çökeltme ortamında kür edilen referans geopolimer hamur örneğinin SEM-EDS analizleri gerçekleştirilmiştir. Analiz sonuçları, ön deneylerde onarım performansı açısından pozitif beklentilerin yapılmış olduğu bu deney grubunda Ca ve C elementlerinin atomik yüzdelerinin yüksek oranlarda olduğunu açığa çıkarmıştır.



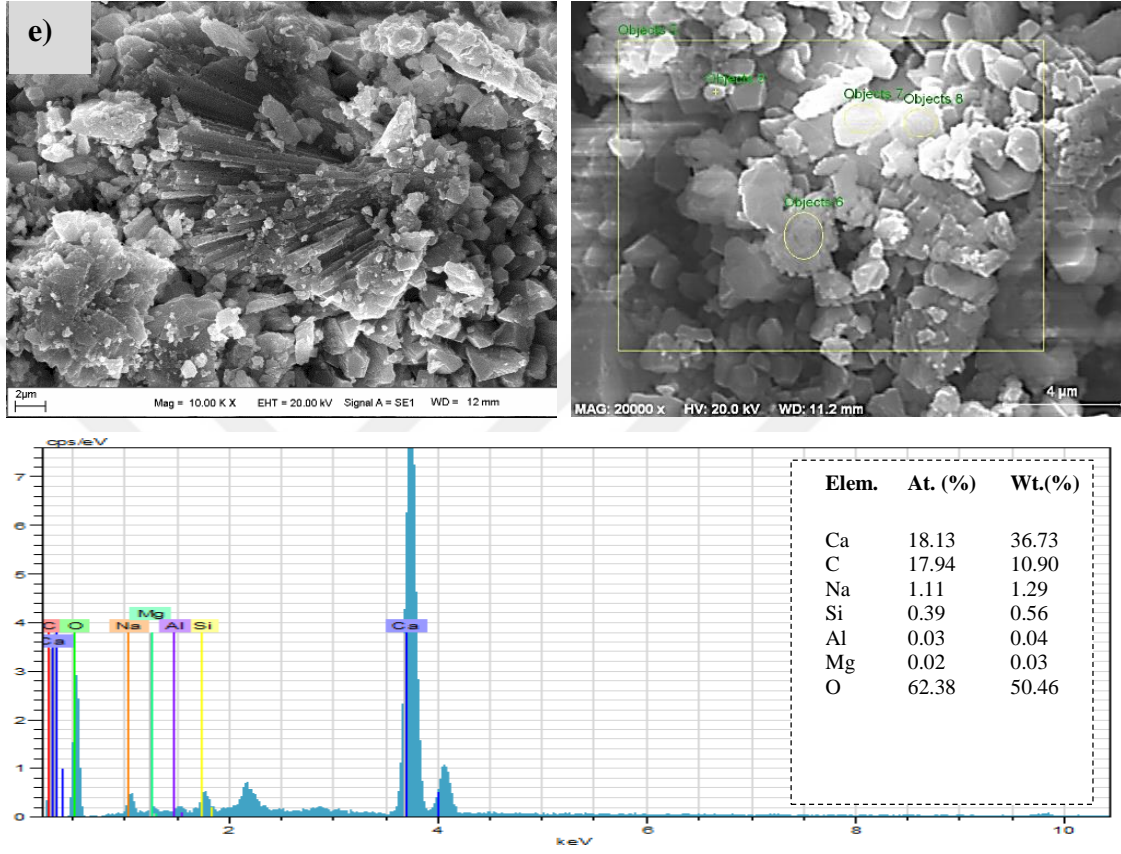
Şekil 4. 13(d) çökeltme ortamında kür edilmiş referans + bakteri örneğine ait mikro yapısal analizleri göstermektedir. Analiz sonuçları, bakteri kültürü + çökeltme ortamında kür edilen referans grubu numunelere benzer şekilde, ön deneylerde onarım performansı açısından pozitif beklentilerin yapılmış olduğu bu deney grubunda Ca ve C elementlerinin atomik yüzdelерinin yüksek oranlarda olduğunu açığa çıkarmıştır.

R+B - (N)



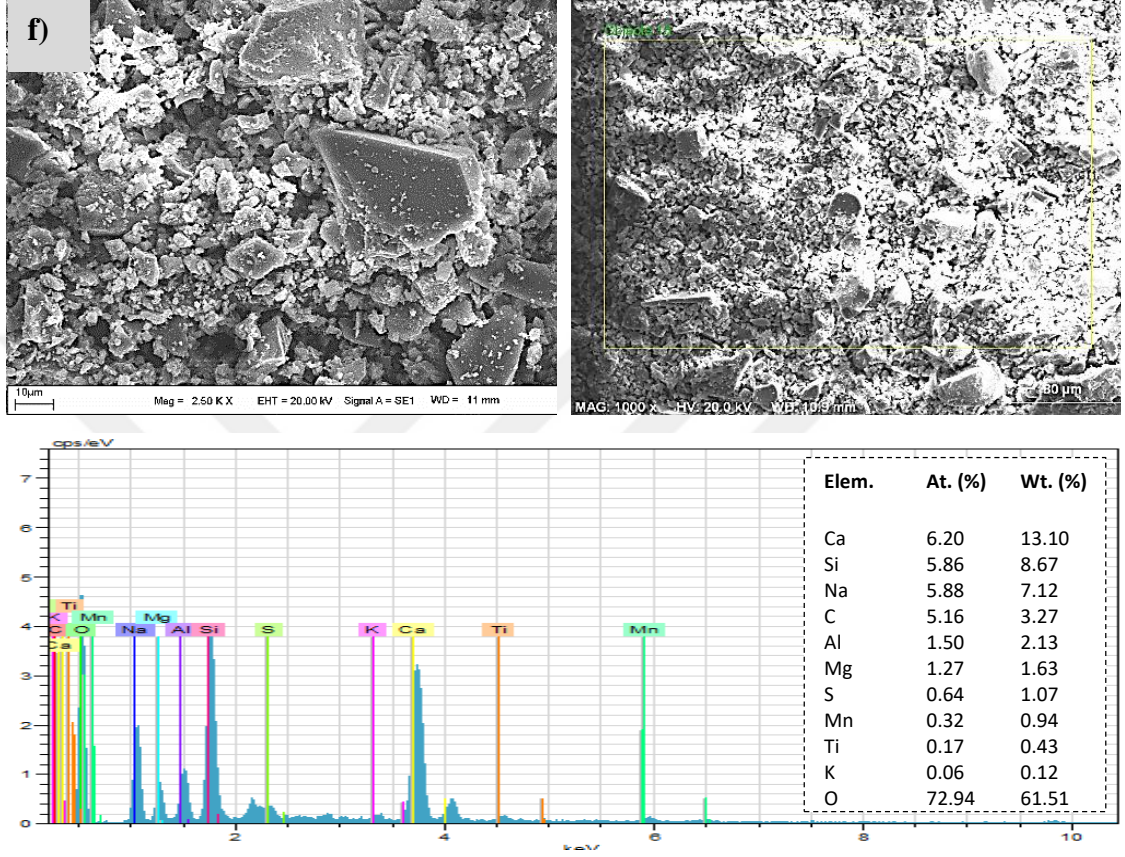
Şekil 4.13(e) çökeltme ortamında kür edilen, bakteri ve besin ilave edilmiş örnek grubunun mikro yapısal analiz sonuçlarını göstermektedir. Kendini onarma kapasitesi hakkında pozitif beklentilerin yapıldığı bu dene grubu numunelerde de yüksek atomik oranlarda Ca ve C elementlerinin olduğu tespit edilmiştir.

R+B+N - (N)

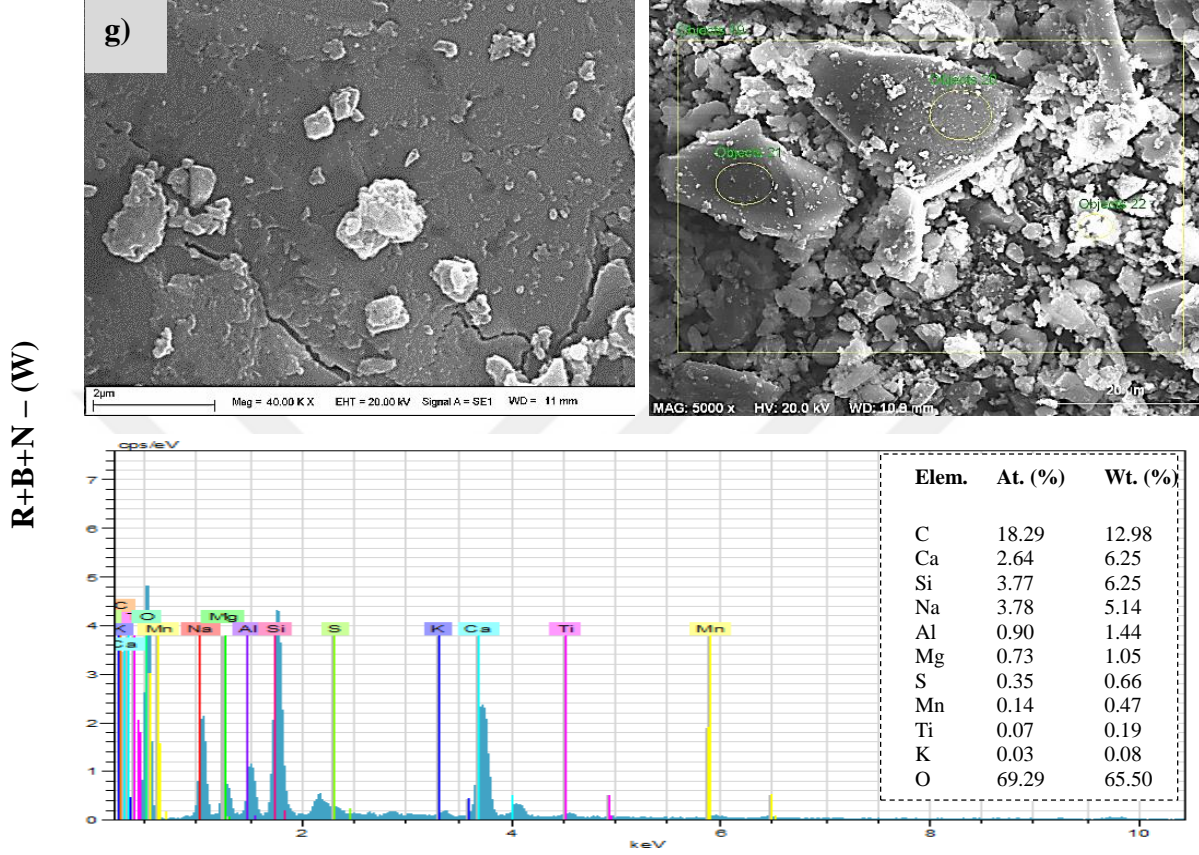


Şekil 4.13(f) suda kür edilmiş referan + bakteri örneğinin mikro yapısal analizini göstermektedir. Şekil 4.13(f)'de görüleceği üzere, CaCO_3 oluşumuna işaret eden Ca ve C elementleri düşük atomik oranlarda bulunmaktadır. Bu durum, ön deneylerde çatlak onarımı açısından yapılan negatif beklentileri doğrulamıştır.

R+B - (W)



Şekil 4.13(g) suda kür edilen bakteri ve besin ilave edilmiş örneklerin mikro yapısal analizlerini göstermektedir. Analiz sonuçları, ön deneyler kapsamında pozitif beklentilerin yapıldığı bu örnek grubunda özellikle C oranının yüksek oranlarda bulunduğunu göstermiştir.



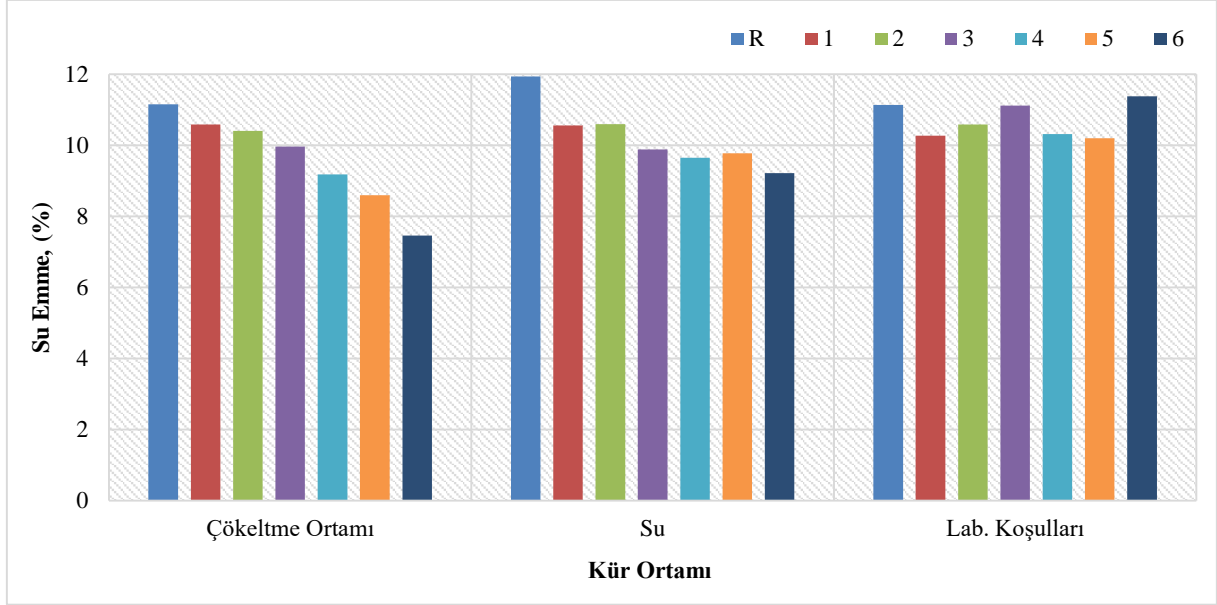
Şekil 4. 13 Kendini onaran geopolimer hamur numunelerin mikroskobik gözlemleri
a) suda kür edilen referans numune, b) çökeltme ortamında kür edilen referans numune, c) çökeltme ortamı + bakteri kültüründe kür edilen referans numune, d) Çökeltme ortamında kür edilen bakteri içeren numune, e) Çökeltme ortamında kür edilen bakteri ve besin içeren numune, f) Suda kür edilen bakteri içeren numune, g) Suda kür edilen bakteri ve besin içeren numune

4.1.6. Geopolimer hamur örneklerinin fiziksel özellikleri

Üretilen her geopolimer hamur numunesinin suya doygun ağırlığı, su içinde asılı ağırlığı ve etüv kurusu ağırlığı değerleri kullanılarak su emme, görünür porozite ve geçirimli boşlukların görünür hacim değerleri elde edilmiştir. Şekil 4.14 su emme değerlerindeki maksimum ve minimum oranların sırasıyla suda kür edilmiş referans örneklerden (R-W) % 12, ve 10^7 CFU/mL konsantrasyona sahip, % 3 bakteri/bağlayıcı oranı ile üretilen ve çökeltme ortamında kür edilen gruptan (6-N) %6.45 olarak elde edildiğini göstermektedir. Şekil 4.14 ayrıca, çökeltme ortamında kür edilen bakterili örnekler için, bakteri / bağlayıcı oranının artmasıyla su emme değerlerinde önemli ölçüde azalmalar meydana geldiğini göstermektedir. Örneğin, 10^9 CFU/mL konsantrasyona sahip 1, 2 ve 3. grup numunelerinde bakteri / bağlayıcı oranının %1'den %3'e yükselmesiyle birlikte su emme değerlerinde %6'lık bir azalma gözlenirken, 10^7 CFU/mL konsantrasyona sahip numune gruplarında (4, 5 ve 6) ise su emme miktarında gözlenen azalma yaklaşık %19 oranında vuku bulmuştur. Bu durum bakterinin metabolik aktivitesi için uygun ortamın oluşturulması halinde fiziksel özelliklerin bakteri miktarı ile orantılı olarak geliştiğini ortaya koymaktadır. Özetle, ürenin hidrolizini sağlayacak daha fazla bakterinin bulunması, hücre yüzeylerinde biriken Ca iyonları ile birlikte yüzeyde oluşan çatlaklar üzerine CaCO_3 çökeltmek daha geçirimsiz bir malzeme üretilmesini mümkün kılacaktır. Ancak, çökeltme ortamında kür edilen örnekler dışında, bakteri /bağlayıcı oranında yaşanan artışın geçirgenlik özellikleri açısından olumlu bir sonuç doğurmadığı gözlenmiştir.

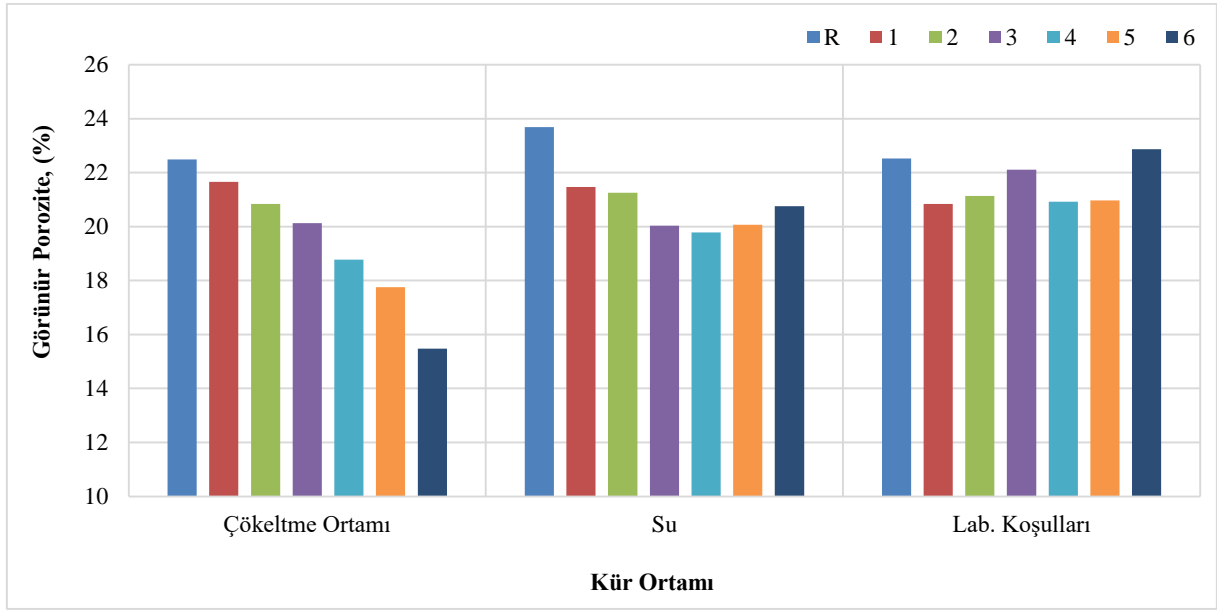
Öte yandan, çökeltme ortamında ve suda kür edilen örneklerde en yüksek su emme değerlerine sahip örnekler referans örnekler olarak karşımıza çıkarken, laboratuvar koşullarında kür edilen örnekler arasında en yüksek su emme değerine sahip olan grubun ise 10^7 CFU/mL konsantrasyona sahip, % 3 bakteri/bağlayıcı oranı ile üretilen 6-A grubu olduğu belirlenmiştir. Bahsedilen bu 6. grup numunelerin çökeltme ortamında kür edilmesi sonucunda en düşük su emme değerlerinin elde edilmesi, bakteriyel örnekler için kür ortamının ne kadar hayati bir öneme sahip olduğunu gözler önüne sermektedir. Şöyle ki, 6. grup numunelerin çökeltme ortamında kür edilmesi halinde sahip olduğu su emmesi, laboratuvar koşullarında kür edilen benzerlerine göre yaklaşık %35 daha düşük bir seviyede çıkmıştır. Ancak, R-N ve R-A grup numuneleri arasında 6-N ve 6-A grup numuneleri arasında gözlenen bu ilişkiye benzer bir duruma rastlanılmamıştır. Referans örneklerin çökeltme ortamında ve laboratuvar koşullarında kür edilmesi halinde sahip oldukları su emme değerleri arasındaki fark ancak % 0.11 düzeyinde olmuştur. Bu yüzdelik fark, 6. grup numuneleri arasında gözlenen %35'lik farka kıyasla ihmal

edilebilir bir düzeyde kalmıştır. Ayrıca, bakteri ilave edilen örneklerin en yüksek su emme değerleri genel olarak laboratuvar koşullarında kür edilmesi sonucu elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlara paralel olarak, *Sporosarcina pasteurii* türü bakterilerin uçucu kül-beton üzerindeki etkisinin incelendiği çalışmada, 10^5 hücre/mL bakteri kullanımı ile basınç dayanımında %22 artış ve su emme değerlerinde dört kat azalma olduğu görülmüştür (Chahal ve diğ, 2012).



Şekil 4. 14 Geopolimer hamur örneklerin su emme değerleri

Şekil 4.15. geopolimer hamur örneklerinin görünür porozite değerlerinin %15.5 ile %23.7 oranında değişiklik gösterdiğini ortaya koymaktadır. Şekil 4.15’de görüldüğü gibi, maksimum görünür porozite değeri R-W numunesinden elde edilirken, minimum görünür porozite değeri ise 6-N numunesinden elde edilmiştir. Görünür porozite sonuçları, su emme değerleri ile örtüşmekte olup, bu değerler de çökeltme ortamında kür edilen bakteri ilave edilmiş geopolimer örneklerde etkin bir kendini onarma mekanizması oluştuğunu gözler önüne sermiştir. Benzer şekilde, *Bacillus subtilis* kullanılarak üretilen geleneksel kendi kendini onaran betonun özelliklerinin incelendiği bir çalışmada, bakteri ilavesinin su emme, görünür gözeneklilik ve geçirgen boşlukların hacmi gibi değerleri azalttığı tespit edilmiştir (George ve diğ, 2016).

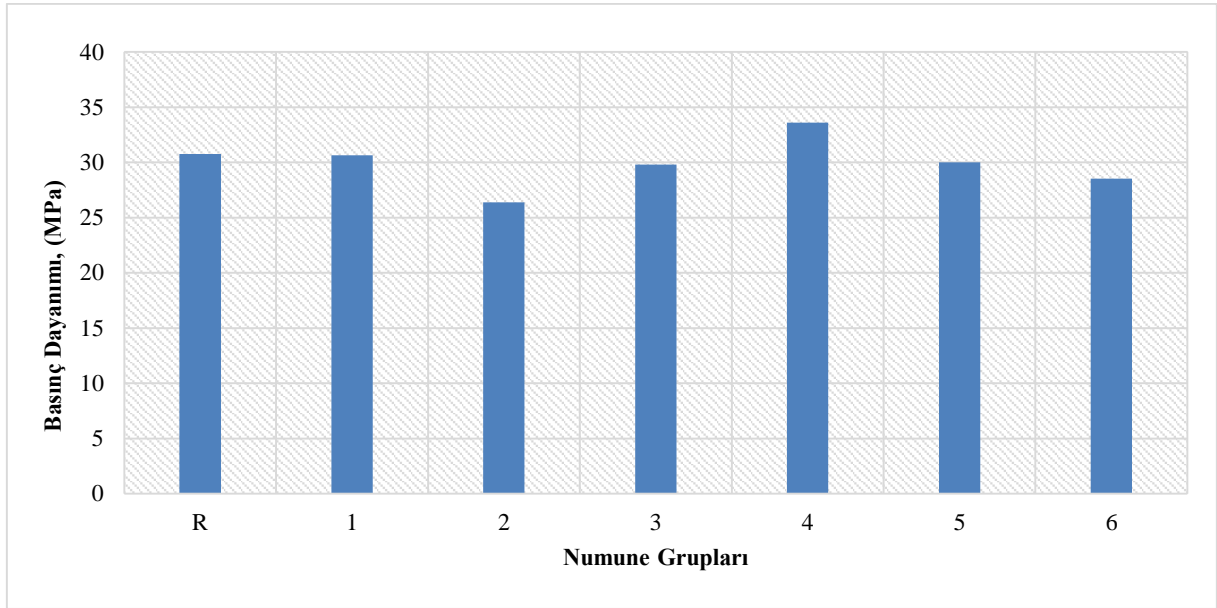


Şekil 4. 15 Geopolimer hamur örneklerin görünür gözeneklilik değerleri

4.2. Geopolimer Harç

4.2.1. Geopolimer harç örneklerin basınç dayanımı

Şekil 4.16 geopolimer harç örneklerin 7 günlük basınç dayanımı sonuçlarını göstermektedir. Şekil 4.16'da görüleceği gibi, geopolimer harç örneklerinin 7 günlük basınç dayanımı değerleri 26.4 MPa (2. Grup) ile 33.6 MPa (4. Grup) arasında değişmektedir. 7 gün boyunca laboratuvar şartlarında bekletilen örneklerin basınç dayanımı değerleri incelendiğinde, en yüksek basınç dayanımına sahip örneklerin 10^7 CFU/mL konsantrasyona sahip, %1 bakteri/bağlayıcı oranı kullanılarak üretilen örnekler olarak karşımıza çıktığı görülmektedir. Şöyle ki, %1 bakteri (10^7 CFU/mL) ilavesi referans örneklere kıyasla basınç dayanımı değerlerini yaklaşık %9,26 oranında arttırmıştır. Genel olarak, bakteri/bağlayıcı oranında gözlenen artış 7 günlük basınç dayanımı değerlerinin azalmasına neden olmuştur. Örneğin, 10^7 CFU/mL konsantrasyona sahip bakteri kullanılarak üretilen örneklerde bakteri/bağlayıcı oranının %1'den %3'e yükselmesiyle 7 günlük basınç dayanımı değerleri yaklaşık %15 oranında azalmıştır. En düşük basınç dayanımı değerleri ise 10^9 CFU/mL konsantrasyona sahip %2 bakteri/bağlayıcı oranı kullanılarak üretilen 2. grup numunelerden (referans örneklere kıyasla yaklaşık %15'lik bir azalma) elde edilmiştir. Farklı bakteri konsantrasyonları ve dozajlarının 7 günlük basınç dayanımı değerlerine etkilerinin incelendiği bu bölüm, bakteri varlığının basınç dayanımı üzerindeki çok önemli etkilerinin ancak uygun kür koşulları sağlanması koşuluyla belirlenebileceğini göstermiştir. Benzer şekilde, kalsiyum laktat ve bakteri spor tozlarının hamur örneklerinin kendini onarma mekanizmasına etkisinin araştırıldığı çalışmada, bakteri ilavesinin numunelerin ilk günlerdeki basınç dayanımını düşürdüğü ancak 28 günlük değerlerde ise yükselmelere neden olduğu vurgulanmıştır (Luo ve Qian, 2016).

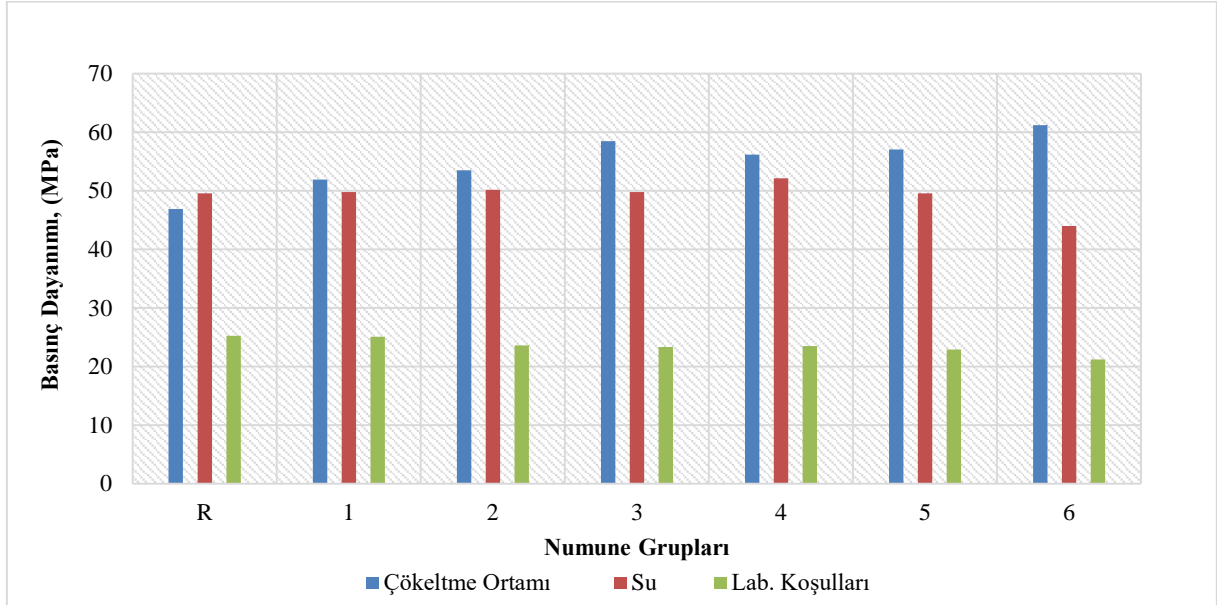


Şekil 4. 16 Geopolimer harç örneklerin 7 günlük basınç dayanımı değerleri

4.2.1.1. Bakteri/bağlayıcı oranının basınç dayanımına etkisi

Şekil 4.17 farklı kür ortamlarında bekletilen geopolimer harç örneklerinin 28 günlük basınç dayanımı değerlerine bakteri/bağlayıcı oranının etkilerini göstermektedir. Şekil 4.17’de görüldüğü gibi, çökeltme ortamında kür edilen örneklerde bakteri/bağlayıcı oranının artması basınç dayanımı değerlerinde önemli artışlara yol açmıştır. Çökeltme ortamında kür edilen ve 10^9 CFU/mL bakteri konsantrasyonuna sahip örneklerde, bakteri/bağlayıcı oranının %1’den %3’e artması basınç dayanımı değerlerini yaklaşık %13 oranında arttırmıştır. Çökeltme ortamında kür edilen ve 10^7 CFU/mL bakteri konsantrasyonuna sahip örneklerde ise benzer artışlar yaklaşık %9 oranında olmuştur. Yine çökeltme ortamında kür edilen örneklerde en yüksek basınç dayanımı değerleri 61,2 MPa ile 6. grup (10^7 CFU/mL ve bakteri/bağlayıcı oranı %3) numunelerden elde edilirken, en düşük basınç dayanımı değerleri ise referans (R) örneklerden elde edilmiştir. Suda kür edilen geopolimer harç örneklerinde bakteri/bağlayıcı oranının %1’den %3’e artması basınç dayanımı değerlerinde 10^9 CFU/mL konsantrasyona sahip numuneler için %0,06 oranında artışa yol açarken ve 10^7 CFU/mL konsantrasyona sahip numunelerde ise yaklaşık %16 azalmaya neden olmuştur. Ek olarak, laboratuvar koşullarında kür edilen örneklerde bakteri/bağlayıcı oranının %1’den %3’e yükselmesi basınç dayanımı değerlerini 10^9 ve 10^7 CFU/mL konsantrasyona sahip numuneler için sırasıyla yaklaşık %7 ve %10 oranında azaltmıştır. Çökeltme ortamında kür edilen bakterili örneklerin referans örneklere kıyasla daha yüksek basınç dayanımına sahip olması, bakterilerin metabolik

aktiviteleri sonucu CaCO_3 çökeltmesi sayesinde boşlukların kapanması ile açıklanabilir. Bakteri ilavesinin basınç dayanımına olan bu olumlu etkisinin yalnızca çökeltme ortamında kür edilen numunelerde gözlenmesi ise mekanik özelliklerde iyileşmeye yol açan CaCO_3 çökeltmesi mekanizmasının meydana gelebilmesi için uygun şartların oluşturulması gerektiğini göstermektedir. Benzer şekilde, bakteri kültürü ilave edilmiş ve besiyer içerisinde kür edilmiş geopolimer harç örneklerinin ileri yaş dayanımlarının daha yüksek bulunduğu belirtilmiştir (Polat, 2019).

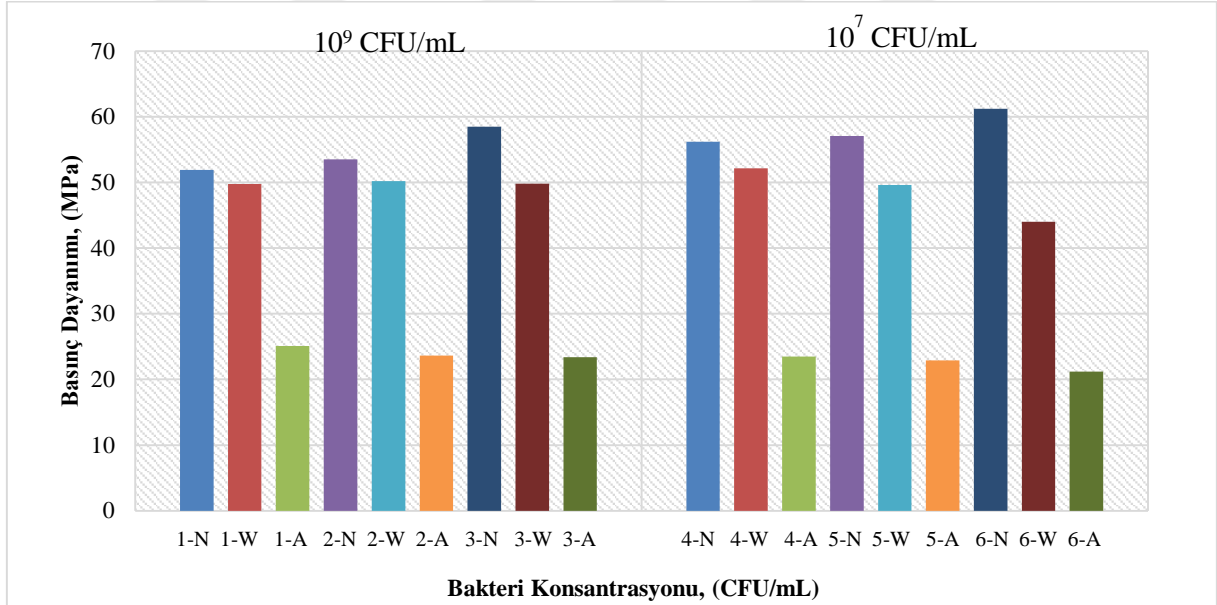


Şekil 4. 17 Bakteri/bağlayıcı oranının geopolimer harç numunelerin 28 günlük basınç dayanımına etkisi

4.2.1.2. Bakteri konsantrasyonunun basınç dayanımına etkisi

Şekil 4.18 farklı ortamlarda kür edilen ve farklı bakteri/bağlayıcı oranına sahip olan geopolimer harç örneklerinin 28 günlük basınç dayanımı değerlerine bakteri konsantrasyonunun etkilerini göstermektedir. Elde edilen bulgular, farklı içeriklere sahip örneklerde yüksek mekanik özelliklerin ancak optimum bakteri konsantrasyonu kullanılarak elde edilebileceğini gözler önüne sermiştir. Örneğin, çökeltme ortamında kür edilen tüm örneklerde, en yüksek basınç dayanımı değerleri 10^7 CFU/mL konsantrasyona sahip numunelerde gözlenmiştir. Şöyle ki, çökeltme ortamında kür edilen ve %1, 2 ve 3 bakteri/bağlayıcı oranı kullanılarak üretilen örnekler için, bakteri konsantrasyonunun 10^9 'dan 10^7 CFU/mL konsantrasyona düşmesi basınç dayanımı değerlerini sırasıyla %8,3, %6,6 ve %4,6 oranlarında arttırmıştır. Kısaca, çökeltme ortamında kür edilen örnekler için optimum bakteri konsantrasyonu bakteri/bağlayıcı oranından

bağımsız olarak 10^7 CFU/mL olarak elde edilmiştir. Ancak su ve laboratuvar koşullarında bekletilen ve herhangi bir iyileşme gösteremeyen geopolimer harç örneklerinde benzer çıkarımlar yapılamamıştır. Örneğin, suda kür edilen örneklerde bakteri konsantrasyonunun 10^9 'dan 10^7 CFU/mL konsantrasyona düşmesi %1 bakteri/bağlayıcı oranı ile üretilen numunelerin basınç dayanımı değerlerini %4,74 oranında artırırken, %2 ve %3 bakteri/bağlayıcı oranı ile üretilen numunelerin basınç dayanımı değerlerini ise sırasıyla yaklaşık %1,21 ve %11,6 oranında azaltmıştır. Benzer azalmalar laboratuvar şartlarında kür edilen geopolimer harç örneklerde de gözlenmiştir. Örneğin, laboratuvar şartlarında kür edilen geopolimer harç numunelerinde bakteri konsantrasyonunun 10^9 'dan 10^7 CFU/mL konsantrasyona düşmesi %1 ve %3 bakteri/bağlayıcı oranı için basınç dayanımı değerlerini sırasıyla %6,4 ve %9,3 oranında düşürürken, %2 bakteri/bağlayıcı oranı kullanılarak üretilen geopolimer harç numunelerinin basınç dayanımını ise yaklaşık %1,2 oranında arttırmıştır.



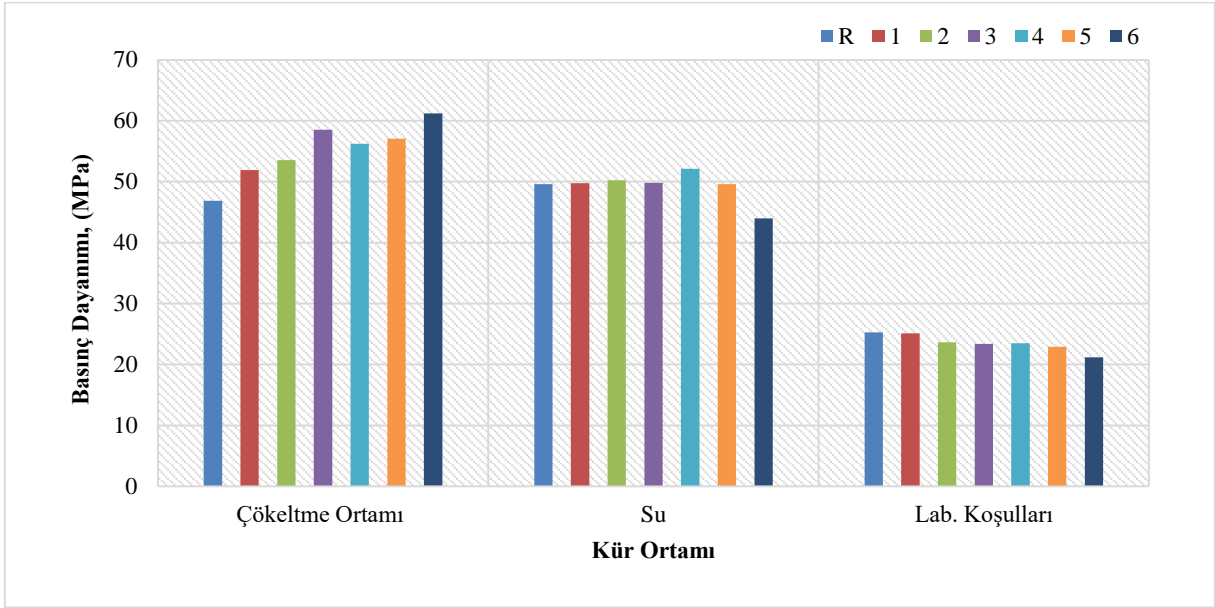
Şekil 4. 18 Bakteri konsantrasyonunun geopolimer harç numunelerin basınç dayanımına etkisi

4.2.1.3. Uygulanan kür rejiminin basınç dayanımına etkisi

Şekil 4.19 referans örneklerin yanı sıra farklı bakteri konsantrasyonları ve bakteri/bağlayıcı oranları dikkate alınarak üretilen geopolimer harç örneklerin 28 günlük basınç dayanımı değerleri üzerinde uygulanan kür rejiminin etkilerini göstermektedir. Şekil 4.19'dan görüleceği gibi, Na_2SiO_3 kullanılarak üretilen, YFC bazlı bakterili veya referans geopolimer harçların basınç dayanımları üzerinde uygulanan kür rejiminin hayati bir etkisi olduğu belirlenmiştir. Bakteri kullanılmadan üretilen ve laboratuvar koşullarında kür edilen referans örneklerin 28

günlük basınç dayanımı değerleri 25,25 MPa düzeyinde iken, suda kür edilen referans örneklerin basınç dayanımı değerlerinin ise 49,60 MPa mertebesine (yaklaşık %96 artış) çıktığı görülmüştür. Ayrıca, çökeltme ortamında kür edilen referans örneklerin basınç dayanımı değerleri de laboratuvar koşullarında kür edilen benzerlerine göre yaklaşık %86 oranında artarak 46,88 MPa düzeyinde olmuştur. Deneysel bulgular, YFC kullanılarak üretilen ve yalnızca Na₂SiO₃ ile aktive edilen geopolimer harç numunelerinde en yüksek basınç dayanımı değerlerinin suda kür yöntemi (çökeltme ortamına göre yaklaşık %6 artış) ile sağlandığını göstermektedir. Çökeltme ortamı ve suda kür edilen geopolimer harç numunelerin basınç dayanımlarında laboratuvar koşullarında kür edilen benzerlerine göre sırasıyla yaklaşık %86 ve %96 oranlarında artış gözlenmesi, herhangi bir kendini onarma mekanizması gözlenmese bile YFC kullanılarak üretilen ve yalnızca Na₂SiO₃ ile aktive edilen numunelerin kür şartlarında mutlaka suyun bulunması gerektiğini gözler önüne sermektedir. Referans örneklerin aksine, bakteri kullanılarak üretilen geopolimer harç numunelerinde bakteri/bağlayıcı oranı ve bakteri konsantrasyonundan bağımsız olarak en yüksek basınç dayanımı değerleri çökeltme ortamında kür yöntemi ile sağlanmıştır. Bu durum, uygun kür koşullarının mevcut olması durumunda bakteriyel aktivite sonucu harç örneklerin bünyesinde oluşan çatlak ve boşlukların CaCO₃ çökeltmesi yoluyla kapatıldığı ve bunun mekanik özelliklerde önemli artışlar ile sonuçlandığı şeklinde yorumlanmıştır. Örneğin, 10⁹ CFU/mL konsantrasyona sahip ve %1 bakteri/bağlayıcı oranı kullanılarak üretilen örneklerin laboratuvar koşullarında kür edilmesi sonucunda 28 günlük basınç dayanımı değerleri 25,1 MPa olurken, çökeltme ortamında kür edilen benzerlerinin basınç dayanımı değerleri ise 51,9 MPa (yaklaşık %107 artış) mertebesinde olmuştur. Bu dramatik artışlar, 10⁹ CFU/mL konsantrasyona sahip ve %2 ile %3 bakteri/bağlayıcı oranı kullanılarak üretilen örneklerin basınç dayanımı değerlerinde ise sırasıyla yaklaşık %126 ve %150 oranlarında gerçekleşmiştir. 10⁹ CFU/mL konsantrasyona sahip 1., 2., ve 3. grup numunelerine benzer şekilde, 10⁷ CFU/mL konsantrasyona sahip 4, 5 ve 6. grup numunelerin kür ortamlarının laboratuvar koşullarından çökeltme ortamı olarak değiştirilmesi halinde 28 günlük basınç dayanımı değerlerinde sırasıyla yaklaşık %139, %149 ve %188 oranlarında artış gözlenmiştir. Deneysel bulgular, kür ortamında yapılan değişikliklerin neden olduğu basınç dayanımı gelişimlerinin bakteri/bağlayıcı oranının artmasıyla birlikte önemli ölçüde arttığını göstermiştir. Yukarıda bahsedildiği gibi, bakteri kullanılarak üretilen tüm örneklerde en yüksek basınç dayanımı değerleri çökeltme ortamında kür ile elde edilmiştir. Suda kür yöntemi ile kıyaslandığında çökeltme ortamında kür metodu ile sağlanan en belirgin basınç dayanımı artışları ise 10⁷ CFU/mL konsantrasyona sahip ve %3

bakteri/bağlayıcı oranı kullanılarak üretilen 6. grup numunelerde yaklaşık %39 oranında olmuştur.



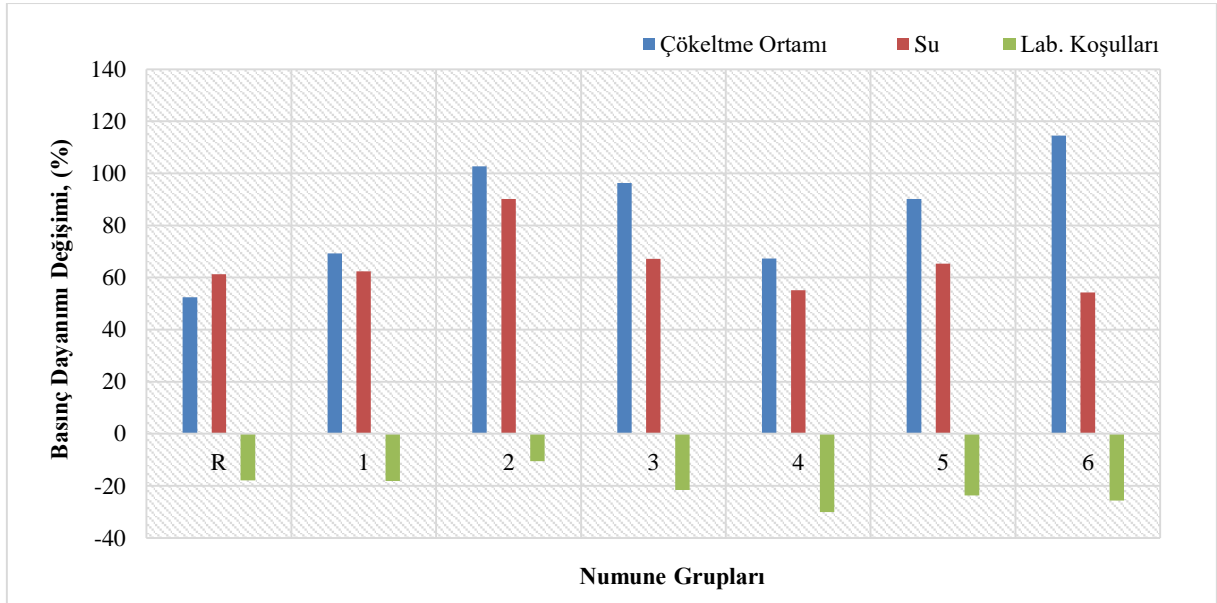
Şekil 4. 19 Uygulanan kür rejiminin geopolimer harç numunelerin basınç dayanımına etkisi

4.2.1.4. 7 ve 28 gün arasında meydana gelen basınç dayanımı değişimleri

Şekil 4.20 farklı parametreler kullanılarak üretilen geopolimer harç örneklerinin 28 günlük basınç dayanımı değerlerinin 7. gündeki basınç dayanımı değerlerine göre değişikliklerini göstermektedir. Deneysel bulgular, laboratuvar koşullarında kür edilen tüm örneklerin 28 günlük basınç dayanımı değerlerinin 7 günlük basınç dayanımı değerlerine göre düşüş gösterdiğini gözler önüne sermektedir. Laboratuvar koşullarında kür edilen örnekler için, 7 günlük basınç dayanımı değerlerine göre yaşanan en fazla düşüşler 10^7 CFU/mL konsantrasyona sahip ve %1 bakteri/bağlayıcı oranı kullanılarak üretilen 4. grup numunelerden elde edilirken (yaklaşık %30 azalma), minimum düşüşler ise 10^9 CFU/mL konsantrasyona sahip ve %2 bakteri/bağlayıcı oranı kullanılarak üretilen 2. grup numunelerden (yaklaşık %10 azalma) elde edilmiştir. Laboratuvar koşullarında kür yönteminin aksine, geopolimer harç numunelerinin çökeltme ortamında kür edilmesi 7. gün ile kıyaslandığında 28 günlük basınç dayanımı değerlerinde çok önemli artışlara neden olmuştur. Çökeltme ortamında kür edilen geopolimer harç numunelerinde, 7 ve 28 gün arasında gözlenen en yüksek basınç dayanımı artışı %114 artış ile 6. grup numunelerden elde edilirken, en düşük basınç dayanımı artışı ise %52'lik oranla referans (R) örneklerden elde edilmiştir. Ayrıca, 2. grup numuneleri dışında, bakteri/bağlayıcı oranında yaşanan artış, basınç dayanımı gelişiminin artmasına neden

olmuştur. Şöyle ki, 10^9 CFU/mL konsantrasyona ve %1 bakteri/bağlayıcı oranı kullanılarak üretilen örneklerin (1. grup) basınç dayanımı 7. güne göre % 69 oranında artarken, 10^9 CFU/mL konsantrasyona ve % 3 bakteri/bağlayıcı oranı kullanılarak üretilen 3. grup örneklerin basınç dayanımı değerleri ise %96 oranında artış göstermiştir. Benzer çıkarımlar 10^7 CFU/mL konsantrasyona sahip numune gruplarında da yapılmıştır. Örneğin, 10^7 CFU/mL konsantrasyona sahip %1 bakteri/bağlayıcı oranı kullanılarak üretilen 4. grup örneklerin 28 günlük basınç dayanımları 7. güne kıyasla %67 oranında artarken, 10^7 CFU/mL konsantrasyona sahip, %3 bakteri/bağlayıcı oranı kullanılarak üretilen 6. grup örneklerin 28 günlük basınç dayanımları ise 7. güne göre %114 oranında artış göstermiştir.

Diğer bir yandan, suda kür edilen geopolimer harç örneklerinde en yüksek basınç dayanımı gelişimleri %2 bakteri/bağlayıcı oranı kullanılarak üretilen geopolimer numunelerden elde edilirken, en düşük basınç dayanımı gelişimleri ise 10^7 CFU/mL konsantrasyona sahip %3 bakteri/bağlayıcı oranı kullanılarak üretilen 6. grup numunelerden (%54 artış) elde edilmiştir. Çökeltme ortamında kür edilen numunelerin aksine, suda kür edilen geopolimer harç örneklerde bakteri/bağlayıcı oranında yaşanan artışın basınç dayanımı gelişimi üzerinde belirgin bir olumlu etkisi olmadığı saptanmıştır. Laboratuvar koşullarında kür edilen örnekler için de benzer bir çıkarımın yapılmış olması, geopolimer harç örneklerinin basınç dayanımı gelişimi açısından üst düzey performans gösterebilmesinin ancak bakteri ilavesi ve uygun kür ortamınının (çökeltme ortamı) birlikte sağlanmış olması ile mümkün olacağını göstermiştir.

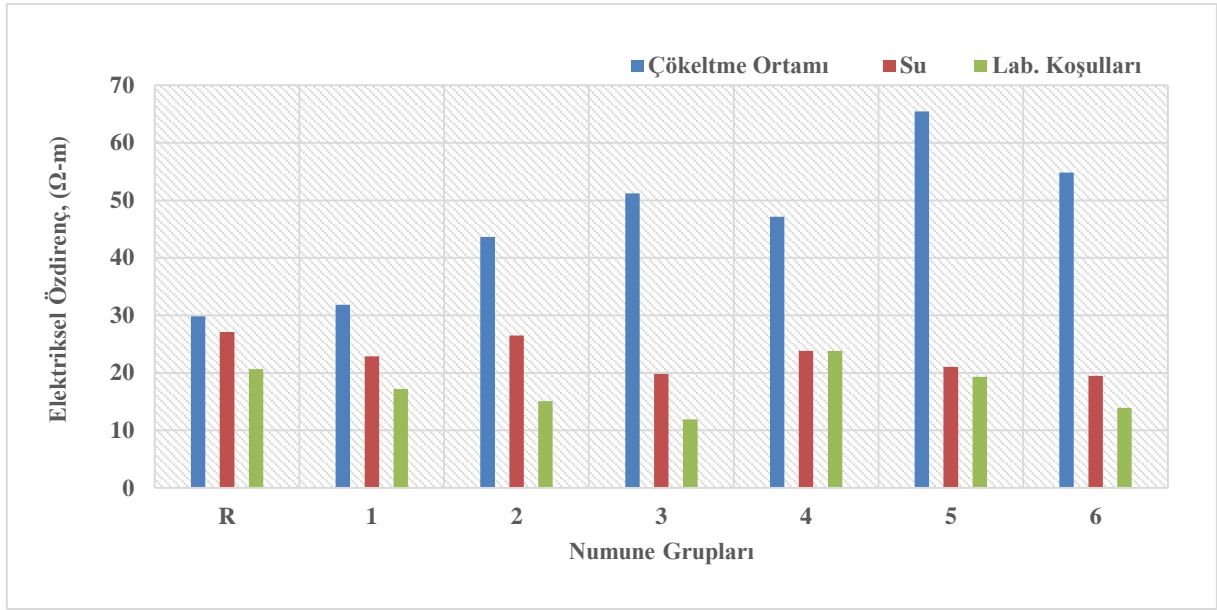


Şekil 4. 20 7 ve 28 gün arasında meydana gelen basınç dayanımı değişimleri

4.2.2. Geopolimer harç örneklerinin elektriksel özdirenci

4.2.2.1. Bakteri/bağlayıcı oranının elektriksel özdirenç üzerine etkisi

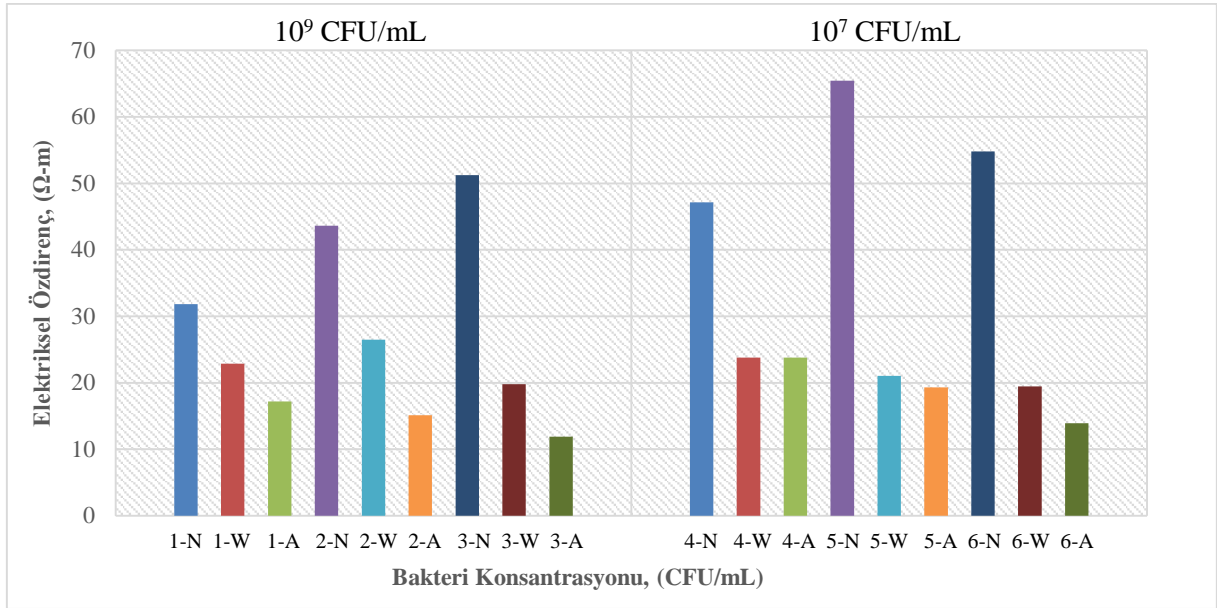
Şekil 4.21 geopolimer harç numunelerin elektriksel özdirenç değerleri üzerine bakteri/bağlayıcı oranının etkisini göstermektedir. Farklı kür ortamları, bakteri konsantrasyonları ve dozajları kullanılarak üretilen geopolimer harç örneklerin elektriksel özdirenç değerleri 11,89 Ω -m ile 65,45 Ω -m arasında değişiklik göstermiştir. Öte yandan, şekil 4.22'den görüleceği gibi, bakteri/bağlayıcı oranında yaşanan artışlar çökeltme ortamında kür edilen geopolimer harç örneklerinin elektriksel özdirenç değerlerini önemli ölçüde yükseltmiştir. Örneğin, 10^9 CFU/mL konsantrasyona sahip geopolimer harç numuneleri için, bakteri/bağlayıcı oranının %1'den %3'e çıkması elektriksel özdirenç değerini yaklaşık %60 oranında arttırmıştır. Elektriksel özdirenç değerlerinde gözlenen benzer artışlar 10^7 CFU/mL konsantrasyona sahip geopolimer harç numuneleri için de geçerli olmuştur. Şöyle ki, 10^7 CFU/mL konsantrasyona sahip geopolimer harç numuneleri için bakteri/bağlayıcı oranının %1'den %2'ye ve %1'den %3'e çıkması sonucunda elektriksel özdirenç değerlerinde sırasıyla yaklaşık %39 ve %16 oranında artışlar gözlenmiştir. Ayrıca, uygun ortamda kür işlemi gerçekleştirilen örnekler üzerinde bakterilerin metabolik aktivitesinden dolayı meydana gelen kalsiyum karbonat çökelmelerinin gözenekleri doldurmak suretiyle gerçekleştirdiği onarımın bir sonucu olarak elektriksel özdirenç değerlerinde çok önemli artışlar gözlemlendiği şeklinde bir çıkarım yapılmıştır. Bu çıkarım, çökeltme ortamında kür edilen örnek grupları içerisinde en düşük elektriksel özdirenç değerlerinin referans grubu örneklerden elde edilmesi ile de desteklenmektedir. Örneğin, 10^7 CFU/mL konsantrasyona sahip ve %2 bakteri/bağlayıcı oranı kullanılarak üretilen ve çökeltme ortamında kür edilen 5.grup numunelerin elektriksel özdirenç değerleri aynı ortamda kür edilen referans örneklere kıyasla yaklaşık %119 oranında artmıştır. Hava sürüklenmiş betonda bakteri ilavesinin elektriksel özdirenç özelliklerine etkilerinin incelendiği bir çalışmada, karışım suyuna bakteri ilave edilen örneklerin elektriksel özdirenç değerlerinin, referans örneklere göre yaklaşık %25 oranında arttığı belirtilmiştir (Parastegari ve diğ, 2019). Benzer şekilde, Vijay ve Murmu, (2019) tarafından yapılan çalışmada bakteri ve kalsiyum kaynağı ilavesi ile küp numuneler üzerinde ölçülen elektriksel özdirenç değerlerinin önemli ölçüde arttığı belirtilmiştir.



Şekil 4. 21 Bakteri/bağlayıcı oranının elektriksel özdirenç üzerine etkisi

4.2.2.2. Bakteri konsantrasyonunun elektriksel özdirenç üzerine etkisi

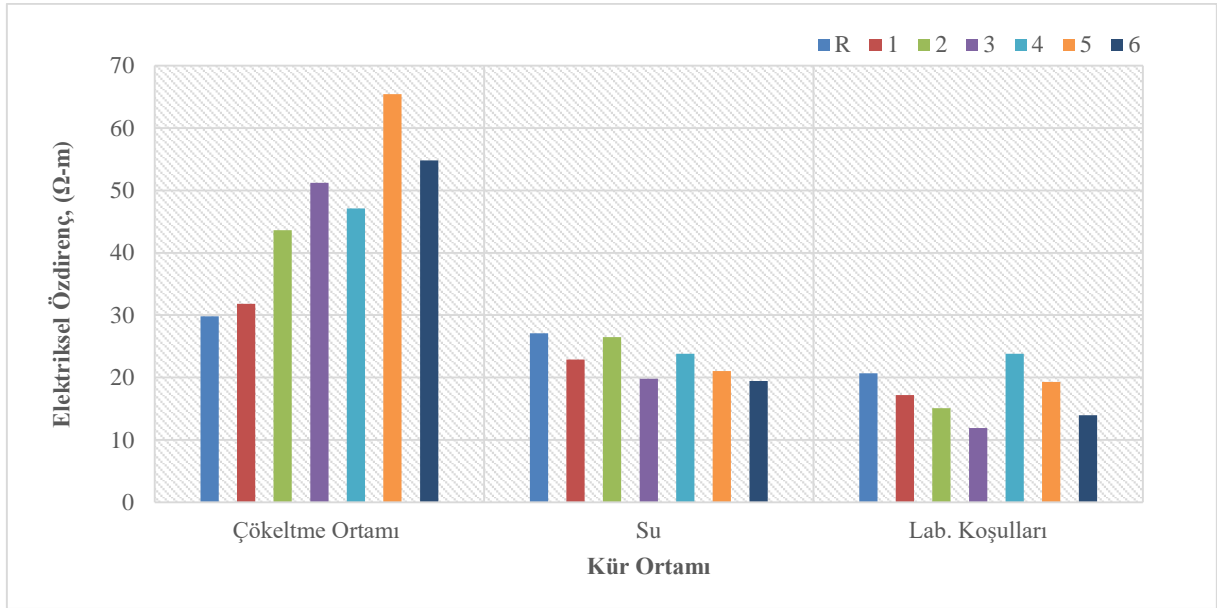
Şekil 4.22 kendini onaran geopolimer harç numunelerin elektriksel özdirenç değerleri üzerine bakteri konsantrasyonunun etkisini göstermektedir. Deneysel bulgular, farklı kür ortamları ve bakteri/bağlayıcı oranı kullanılarak üretilen geopolimer harç örneklerinin elektriksel özdirençleri üzerinde bakteri konsantrasyonunun çok önemli bir etkisi olduğunu gözler önüne sermektedir. Şekil 4.22'den görüleceği gibi, tercih edilen kür ortamı ve bakteri/bağlayıcı oranlarından bağımsız olarak, bakteri konsantrasyonunun 10^9 'dan 10^7 CFU/mL değerine düşmesi elektriksel özdirençleri önemli ölçüde arttırmıştır. Örneğin, çökeltme ortamında kür edilen örnekler için, bakteri konsantrasyonunun 10^9 'dan 10^7 CFU/mL değerine düşmesi bakteri/bağlayıcı oranı %1, %2 ve %3 olan numune gruplarının elektriksel özdirenç değerlerinde sırasıyla yaklaşık % 48, %50 ve %7 oranlarında artışlara yol açmıştır. Laboratuvar koşullarında kür edilen örnekler için de bakteri konsantrasyonunda meydana gelen düşüşler elektriksel özdirenç değerlerinde benzer artışlara neden olmuştur.



Şekil 4. 22 Bakteri konsantrasyonunun elektriksel özdirenç üzerine etkisi

4.2.2.3. Uygulanan kür rejiminin elektriksel özdirenç üzerine etkisi

Şekil 4.23 farklı bakteri konsantrasyonları ve bakteri/bağlayıcı oranları kullanılarak üretilen geopolimer harç örneklerinin elektriksel direnç değerlerine uygulanan kür rejiminin etkisini göstermektedir. Elde edilen sonuçlar, tüm geopolimer harç örneklerinde en yüksek elektriksel özdirenç değerlerinin çökeltme ortamında kür edilen örneklerden, en düşük elektriksel özdirenç değerlerinin ise laboratuvar koşullarında kür edilen örneklerden elde edildiğini göstermiştir. Örneğin, 10^9 CFU/mL konsantrasyona sahip, %1 bakteri/bağlayıcı oranı kullanılarak üretilen örneklerin elektriksel özdirenç değerleri çökeltme ortamında kür edilmesi halinde laboratuvar koşullarında kür edilen benzerlerine göre yaklaşık %85 artış göstermiştir. Laboratuvar koşullarında ve çökeltme ortamında gerçekleşen kür yönteminin elektriksel özdirenç özellikleri üzerine etkisini daha iyi ifade edecek şekilde, bir üst cümlede vurgulanan artış oranının 10^7 CFU/mL konsantrasyona sahip, %2 bakteri/bağlayıcı oranı kullanılarak üretilen 5. grup numunelerde ise yaklaşık %239 oranında gerçekleştiği belirtilmelidir.



Şekil 4. 23 Uygulanan kür rejiminin elektriksel özdirenç üzerine etkisi

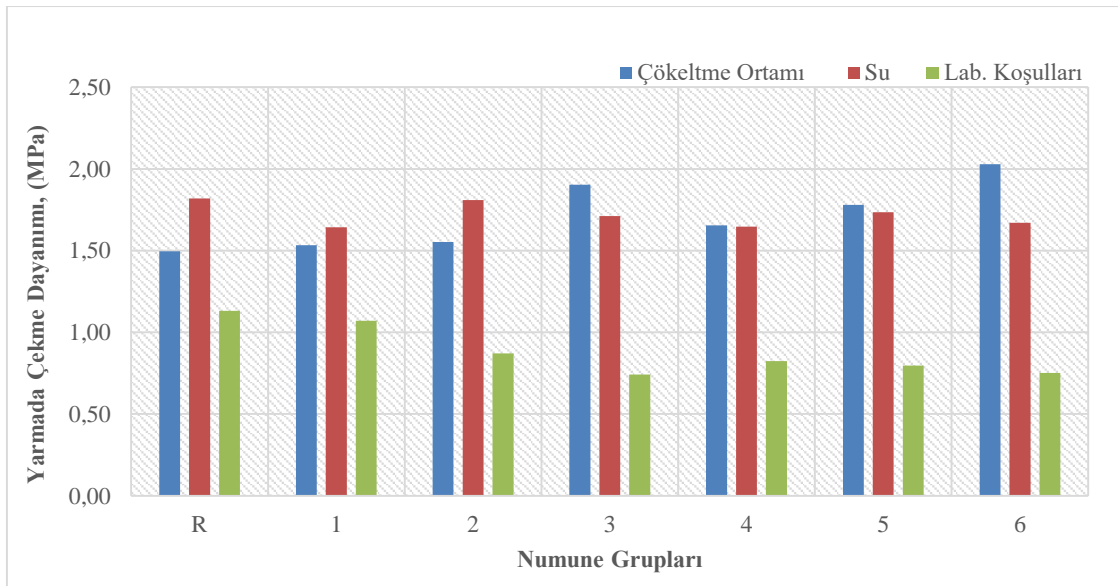
4.2.3. Geopolimer harç örneklerin yarmada çekme dayanımı

4.2.3.1. Bakteri/bağlayıcı oranının yarmada çekme dayanımına etkisi

Geopolimer harç örneklerin yarmada çekme dayanımı değerleri Şekil 4.24'de verilmiştir. Basınç dayanımı sonuçlarına benzer şekilde, çökeltme ortamında kür edilen geopolimer harç örneklerinde bakteri/bağlayıcı oranının artmasıyla birlikte yarmada çekme dayanımlarında önemli artışlar gözlenmiştir. Örneğin, 10^9 CFU/mL bakteri konsantrasyonuna sahip numune grupları için, bakteri/bağlayıcı oranının %1'den %3 değerine çıkması yarmada çekme dayanımlarını yaklaşık %24 oranında arttırırken, bu artış oranı 10^7 CFU/mL bakteri konsantrasyonu kullanılarak üretilen geopolimer harç örneklerinde ise %23 mertebesinde olmuştur. Ayrıca, yine çökeltme ortamında kür edilen referans örneklere kıyasla bakteri/bağlayıcı oranının %1, 2 ve 3 oranında kullanılması 10^9 CFU/mL bakteri konsantrasyonuna sahip numune grupları için yarmada çekme dayanımı değerlerini sırasıyla %2, %3 ve %26 oranında arttırmıştır. Çökeltme ortamında kür edilen ve 10^7 CFU/mL bakteri konsantrasyonu kullanılarak üretilen geopolimer harç örneklerinde ise bakteri/bağlayıcı oranının %1, 2 ve 3 oranında kullanılması referans örneklere göre yarmada çekme dayanımı değerlerini yaklaşık %10, %18 ve %35 oranında arttırmıştır. Çökeltme ortamında kür edilen geopolimer harç örneklerinin aksine, laboratuvar koşullarında kür edilen geopolimer harç örneklerinde bakteri/bağlayıcı oranında yaşanan artış örneklerin yarmada çekme dayanımlarını önemli ölçüde azaltmıştır. Örneğin, laboratuvar koşullarında kür edilen ve 10^9 CFU/mL bakteri

konsantrasyonuna sahip numune grupları için bakteri/bağlayıcı oranının %1'den %3'e yükselmesi yarmada çekme dayanımlarını yaklaşık %35 oranında azaltırken, 10^7 CFU/mL bakteri konsantrasyonuna sahip numune grupları için bakteri/bağlayıcı oranının %1'den %3'e yükselmesi ise yarmada çekme dayanımı değerlerini yaklaşık %8,5 oranında azaltmıştır. Öte yandan, laboratuvar koşullarında kür edilen referans örneklerle kıyasla, 10^9 CFU/mL bakteri konsantrasyonuna sahip numune grupları için bakteri/bağlayıcı oranının %1, 2 ve 3 oranında kullanılması yarmada çekme dayanımı değerlerini sırasıyla yaklaşık %5, %23 ve %34 oranında azaltırken, 10^7 CFU/mL bakteri konsantrasyonuna sahip numune grupları için bu azalma değerleri sırasıyla yaklaşık %27, %29 ve %33 oranında olmuştur.

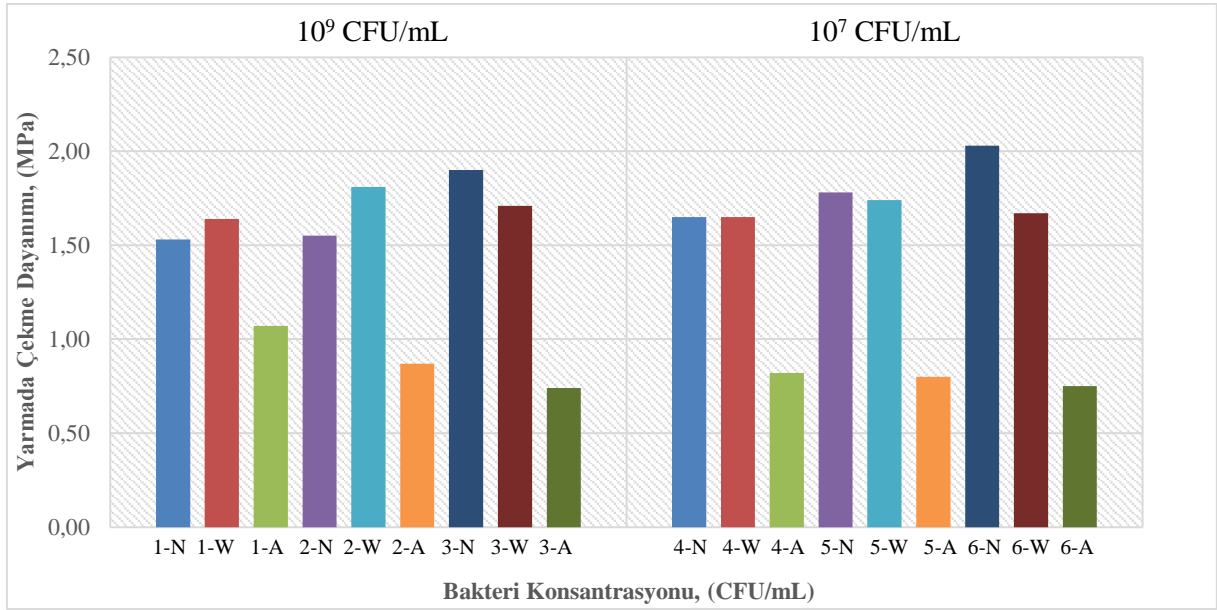
Bakteri ilavesinin betonun özelliklerine etkisinin incelendiği bir çalışmada, referans beton örneklerinin 7, 14 ve 28. günlerdeki yarmada çekme dayanımı değerleri sırasıyla 1,36 MPa, 2,05 MPa ve 2,53 MPa olarak elde edilirken, *B.Subtilis* and *B.Sphaericus* tip bakterilerin eklenerek üretildiği kendini onaran beton numunelerin 7, 14 ve 28 günlük yarmada çekme dayanımı değerleri ise sırasıyla % 4,29, % 11,22 ve %7,51'lik artışlarla 1,7 MPa, 2,28 MPa ve 2,72 MPa olarak elde edilmiştir (Chithambar Ganesh ve diğ, 2019). Benzer şekilde, *B.Subtilis* tip bakterilerin betonun durabilite özellikleri üzerindeki etkilerinin araştırıldığı başka bir çalışmada, besin ve bakteri ilavesinin yarmada çekme dayanımı değerlerini arttırdığı gözlenmiştir. Maksimum yarmada çekme dayanımı değerlerine ise 90 günlük numunelerde ulaşıldığı belirlenmiştir (Nguyen, 2019).



Şekil 4. 24 Bakteri/bağlayıcı oranının yarmada çekme dayanımına etkisi

4.2.3.2. Bakteri konsantrasyonunun yarmada çekme dayanımına etkisi

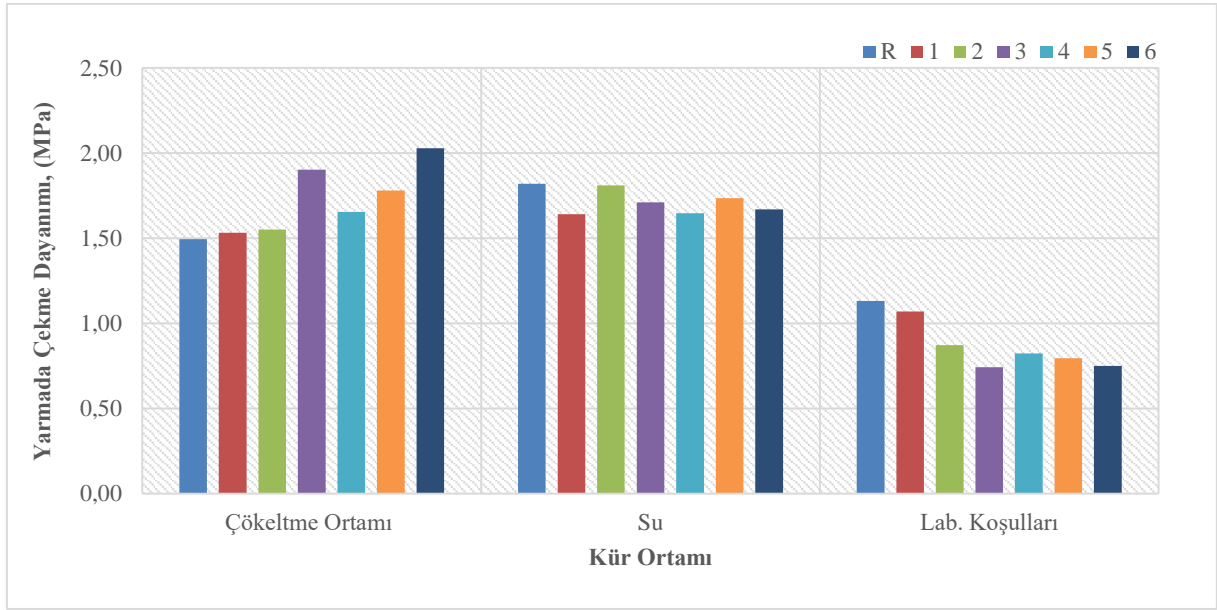
Şekil 4.25, farklı bakteri/bağlayıcı oranı ve kür şartları dikkate alınarak üretilen geopolimer harç örneklerin yarmada çekme dayanımı değerlerine iki farklı bakteri konsantrasyonunun (10^9 ve 10^7 CFU/mL) etkisini göstermektedir. Şekil 4.25'den görüleceği gibi, maksimum yarmada çekme dayanımı değerleri 10^7 CFU/mL konsantrasyona sahip %3 bakteri/bağlayıcı oranı ile üretilen ve çökeltme ortamında kür edilen 6-N grubu örneklerden elde edilirken, en düşük yarmada çekme dayanımı değerleri ise 10^9 CFU/mL konsantrasyona sahip %3 bakteri/bağlayıcı oranı ile üretilen ve laboratuvar koşullarında kür edilen 3-A grubu örneklerden elde edilmiştir. Öte yandan, çökeltme ortamında kür edilen geopolimer harç örnekleri için bakteri konsantrasyonunun 10^9 CFU/mL değerinden 10^7 CFU/mL değerine düşmesi yarmada çekme dayanımı değerlerini önemli ölçüde arttırmıştır. Şöyle ki, bakteri konsantrasyonunun 10^9 CFU/mL değerinden 10^7 CFU/mL düşmesi çökeltme ortamında kür edilen 1, 2 ve 3. grup numunelerin yarmada çekme dayanımı değerlerini sırasıyla yaklaşık % 8, %15 ve % 7 oranında arttırmıştır. Çökeltme ortamında kür edilen geopolimer harç örneklerinin aksine, laboratuvar koşullarında ve suda kür edilen geopolimer harç örneklerinin yarmada çekme dayanımı değerlerinde bakteri konsantrasyonunun değişmesiyle birlikte bir takım azalmalar yaşandığı gözlenmiştir. Örneğin, %1 ve % 2 bakteri/bağlayıcı oranına sahip olacak şekilde üretilen ve laboratuvar koşullarında kür edilen geopolimer harç örneklerinde bakteri konsantrasyonunun 10^9 CFU/mL değerinden 10^7 CFU/mL değerine düşmesi yarmada çekme dayanımı değerlerini sırasıyla yaklaşık %23, %8 oranında azaltırken, %3 bakteri/bağlayıcı oranına sahip numunelerde ise yaklaşık %1'lik bir artış gözlenmiştir. Suda kür edilen geopolimer harç örneklerinde de bakteri konsantrasyonunun 10^9 CFU/mL değerinden 10^7 CFU/mL değerine düşmesi %2 ve 3 bakteri/bağlayıcı oranına sahip numune gruplarının yarmada çekme dayanımı değerlerini sırasıyla yaklaşık %4 ve %2 oranında azaltırken, %1 bakteri/bağlayıcı oranına sahip numunelerde ise yaklaşık %0,6'lık bir artışa neden olmuştur.



Şekil 4. 25 Bakteri konsantrasyonunun yarmada çekme dayanımına etkisi

4.2.3.3. Uygulanan kür rejiminin yarmada çekme dayanımına etkisi

Şekil 4.26 farklı bakteri konsantrasyonları ve bakteri/bağlayıcı oranları kullanılarak üretilen geopolimer harç örneklerinin yarmada çekme dayanımı değerleri üzerinde uygulanan kür rejiminin etkisini göstermektedir. Deneysel bulgular, en yüksek yarmada çekme dayanımı değerlerinin çökeltme ortamında kür edilen örneklerden elde edilirken, en düşük yarmada çekme dayanımı değerlerinin ise laboratuvar koşullarında kür edilen örneklerden elde edildiğini ortaya çıkarmıştır. Örneğin, 10⁷ CFU/mL konsantrasyona sahip, %3 bakteri/bağlayıcı oranı kullanılarak üretilen ve çökeltme ortamında kür edilen 6-N grup örneklerinin yarmada çekme dayanımı değerleri, 10⁷ CFU/mL konsantrasyona sahip, %3 bakteri/bağlayıcı oranı kullanılarak üretilen ve laboratuvar koşullarında kür edilen benzerlerinin yarmada çekme dayanımı değerlerine göre %170 oranında artış göstermiştir. Bahsedilen 6-N grubu örneklerinin suda kür edilen benzerlerine (6-W) göre yarmada çekme dayanımı değerlerinde meydana gelen artış oranı ise yaklaşık %21 mertebesinde olmuştur. Üç farklı referans örneklerin yarmada çekme dayanımı incelemesinde ise en yüksek dayanım değerlerinin suda kür yöntemi ile elde edildiği görülmektedir. Yarmada çekme dayanımı değerleri açısından, referans örneklerin suda kür edilmesinin (R-W) havada kür edilen benzerlerine (R-A) kıyasla yaklaşık %61, çökeltme ortamında kür edilmesine nazaran ise yaklaşık %21 oranında artış gösterdiği saptanmıştır.

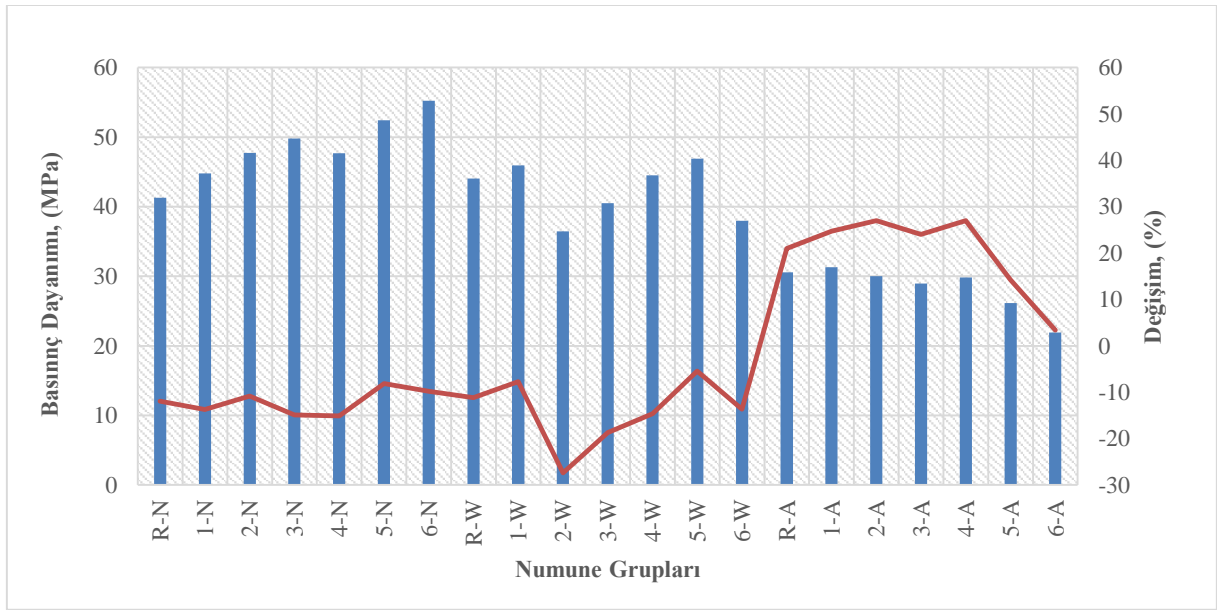


Şekil 4. 26 Kür rejiminin yarmada çekme dayanımına etkisi

4.2.4. Geopolimer harç örneklerinin asite karşı dayanıklılığı

Şekil 4.27 geopolimer harç örneklerinin 28 günlük asit saldırısı sonucu sahip oldukları basınç dayanımı değerlerini ve asit öncesi basınç dayanımı değerlerine göre göstermiş oldukları değişimleri sergilemektedir. Deneysel bulgular, asit saldırısına maruz bırakılan geopolimer harç örneklerin basınç dayanımı değerlerinin 21,92 MPa ile 55,23 MPa arasında değişiklik gösterdiğini ortaya çıkarmıştır. Asit etkisi sonucu en yüksek basınç dayanımı değerleri 10^7 CFU/mL konsantrasyona sahip, %3 bakteri/bağlayıcı oranı kullanılarak üretilen ve çökeltme ortamında kür edilen 6-N grubu örneklerden elde edilirken, en düşük basınç dayanımı değerleri ise 10^7 CFU/mL konsantrasyona sahip %3 bakteri/bağlayıcı oranı kullanılarak üretilen ve laboratuvar koşullarında kür edilen 6-A grubu örneklerden elde edilmiştir. Çökeltme ortamında kür edilen geopolimer harç örneklerinde asit saldırısı sonucu gözlenen en yüksek basınç dayanımı değerleri bakteri konsantrasyonundan bağımsız olarak %3 bakteri/bağlayıcı oranı kullanılarak üretilen geopolimer harç örneklerden elde edilmiştir. Ayrıca, 28 günlük asit saldırısı sonucu çökeltme ortamında ve suda kür edilen tüm geopolimer harç örneklerin basınç dayanımı değerlerinde azalmalar meydana gelirken, laboratuvar koşullarında kür edilen geopolimer harç örneklerin basınç dayanımı değerlerinde ise belirgin artışlar gözlenmiştir. Bu durum başlangıçta bir zıtlık olarak görülse de, Na_2SiO_3 ile aktive edilen geopolimer kompozitlerin yüksek dayanıma ulaşabilmesi için kür ortamında suya ihtiyaç duyması şeklinde açıklanabilir. Bu nedenle, asit solüsyonu içerisindeki suyun laboratuvar koşullarında bekletilen

geopolimer harç örnekleri üzerinde kür etkisi oluşturup dayanıma olumlu katkı sağladığı, asit içeriğinin ise yıpratıcı etkilere yol açtığı şeklinde yorum yapılmıştır. Gerçekleştirilen bir çalışmada, geleneksel betonlar ile geopolimer betonlara bakteri ilave edilmiş ve %5 H₂SO₄ çözeltisine maruz bırakılmıştır. Asit çözeltisine beş farklı maruz kalma süresinin (7, 14, 28, 45 ve 90 gün) basınç dayanımı ve ağırlık üzerindeki etkileri incelenmiş ve asit etkisine maruz kalma süresinin artmasıyla birlikte basınç dayanımı ve ağırlıkta meydana gelen azalmaların artış gösterdiği belirlenmiştir. Sonuçlar, ayrıca, en yüksek basınç dayanımı kayıplarının geleneksel Portland çimentolu betonlarda gözlendiğini, en düşük basınç dayanımı kayıplarının ise bakteri ilave edilmiş geopolimer betonlardan elde edildiğini göstermiştir (Tech, 2015).



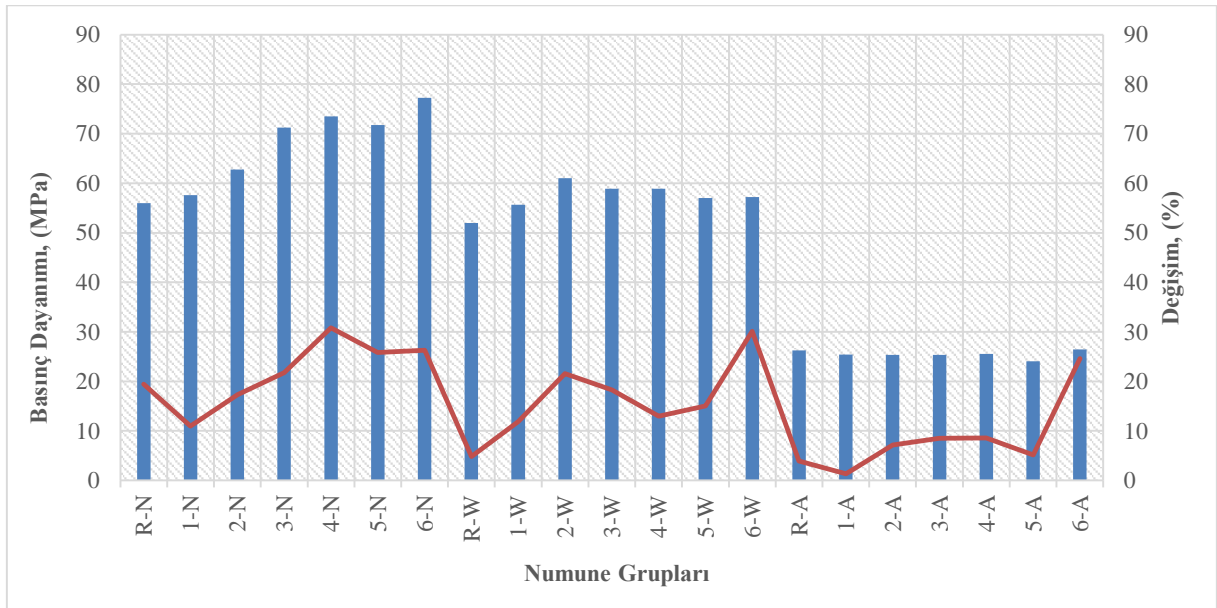
Şekil 4.27 Geopolimer harç numunelerinin asit dayanıklılığı

4.2.5. Geopolimer harç örneklerin sülfata karşı dayanıklılığı

4.2.5.1. Sülfat etkisi sonrası basınç dayanımı

Şekil 4.28 geopolimer harç numunelerinin 28 günlük sülfat etkisi sonrasında meydana gelen basınç dayanımı değişimlerini göstermektedir. Deneysel bulgular, 28 gün sülfat saldırısına maruz bırakılan geopolimer harç numunelerin basınç dayanımı değerlerinin 24,08 MPa ile 77,27 MPa arasında değişiklik gösterdiğini açığa çıkarmaktadır. Tüm numune grupları için, en düşük basınç dayanımı değerleri 10⁷ CFU/mL bakteri konsantrasyonuna sahip, %2 bakteri/bağlayıcı oranı kullanılarak üretilen ve laboratuvar koşullarında kür edilen 5-A grubu örneklerden elde edilirken, en yüksek basınç dayanımı değerleri ise 10⁷ CFU/mL bakteri konsantrasyonuna sahip, %3 bakteri/bağlayıcı oranı kullanılarak üretilen ve çökeltilme

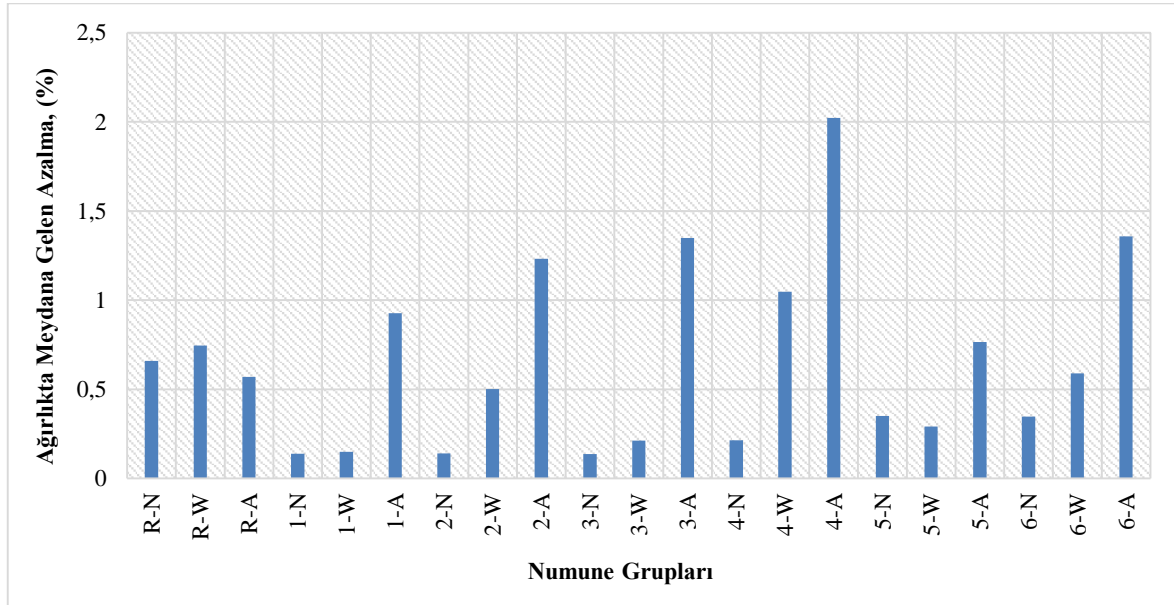
ortamında kür edilen 6-N grubu numunelerden elde edilmiştir. 10^9 CFU/mL bakteri konsantrasyonu kullanılarak üretilen numune grupları içerisinde de, en yüksek basınç dayanımı değerleri 71,23 MPa ile %3 bakteri/bağlayıcı oranı kullanılan ve çökeltme ortamında kür edilen örneklerden elde edilmiştir. 28 günlük sülfat saldırısı sonucu elde edilen basınç dayanımı sonuçları, sülfat etkisine maruz kalan geopolimer harç numunelerinde en yüksek basınç dayanımı değerlerinin bakteri konsantrasyonundan bağımsız olarak %3 bakteri/bağlayıcı oranı kullanılarak üretilen numune gruplarından elde edildiğini göstermiştir. Ayrıca, Şekil 4.28, 28 günlük sülfat saldırısı sonucu tüm numune gruplarının basınç dayanımı değerlerinde bir miktar artışlar olduğunu göstermektedir. Basınç dayanımı değerlerinde gözlenen artışlara bakıldığında, en yüksek artış oranlarının genel olarak çökeltme ortamında kür edilen numune gruplarında gözlemlendiği görülmektedir. Ek olarak, sülfat etkisi sonucu basınç dayanımı değerlerinde meydana gelen en düşük artışlar ise laboratuvar koşullarında kür edilen numune gruplarından elde edilmiştir. Sonuçlar, bakteri ilave edilen ve çökeltme ortamında kür edilen numune gruplarının yüksek basınç dayanımı değerlerine sahip olmasının, daha yüksek basınç dayanımı gelişimlerine de sahip olduğunu göstermektedir. *S. pasteurii* ve *B. Subtilis* tip bakterilerin geleneksel betonların dayanıklılık özellikleri üzerine etkilerinin araştırıldığı bir çalışmada, sülfat çözeltisine maruz bırakılan beton numunelerin basınç dayanımı değerlerinin 90. güne kadar artış gösterdiği, ilerleyen yaşlarda ise sülfat atağı nedeniyle azaldığı belirlenmiştir. Ayrıca, *S. pasteurii* uygulamasının sülfat ortamında *B. subtilis*'e kıyasla daha yüksek basınç dayanımına yol açtığı sonucuna varılmıştır (Nosouhian ve diğ, 2016).



Şekil 4. 28 Geopolimer harç numunelerin sülfat dayanıklılığı

4.2.5.2. Sülfat etkisi sonrası ağırlık değişimi

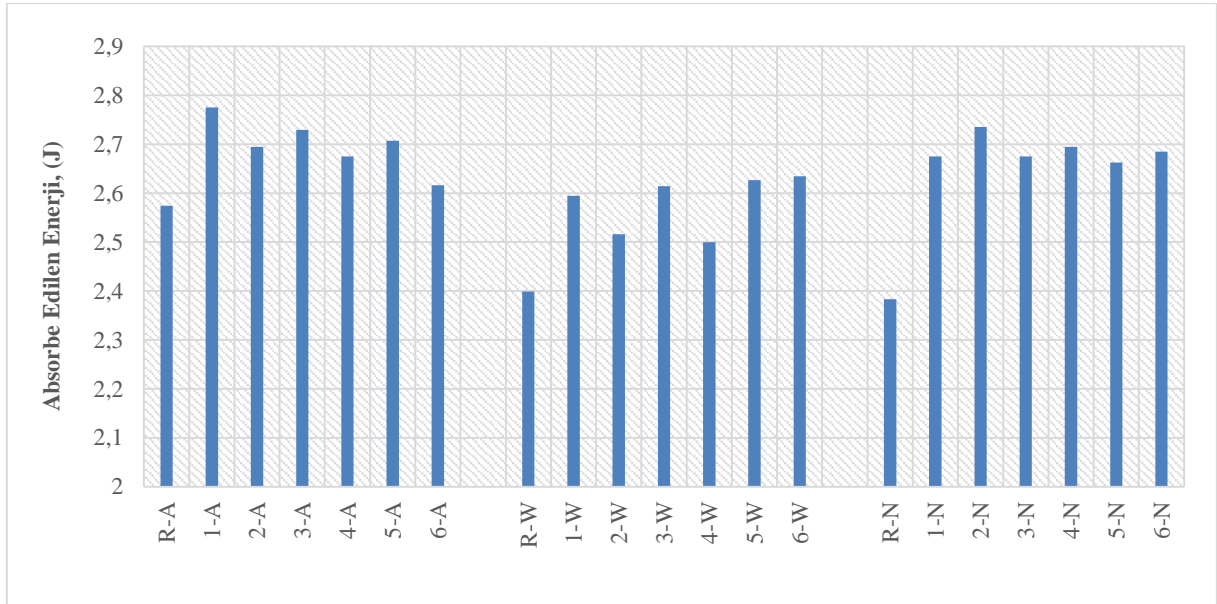
Farklı parametreler kullanılarak üretilen geopolimer harç örneklerinde 28 gün boyunca %5'lik $MgSO_4$ çözeltisine daldırılmak suretiyle sülfat saldırısı sonucu meydana gelen ağırlık azalmaları Şekil 4.29'da verilmiştir. Şekil 4.30'da görüleceği gibi, 28 günlük sülfat saldırısı sonucu tüm geopolimer harç örneklerinin ağırlıklarında bir miktar azalma tespit edilmiştir. Sülfat saldırısı sonucu oluşan en yüksek ağırlık azalmaları %2,02 ile 10^7 CFU/mL konsantrasyona sahip %1 bakteri/bağlayıcı oranı kullanılarak üretilen ve laboratuvar koşullarında kür edilen 4-A grubu numunelerden elde edilirken, en düşük ağırlık azalmaları ise % 0,13 ile 10^9 CFU/mL konsantrasyona sahip %3 bakteri/bağlayıcı oranı kullanılarak üretilen ve çökeltme ortamında kür edilen 3-N grubu numunelerden elde edilmiştir. Sülfat saldırısı sonucu meydana gelen kütle değişimlerinde; kütle artışına sebep olan olayın sülfat penetrasyonu, kütle azalmasına sebep olan olayın ise sülfat sızıntısı olduğu belirtilmiştir (El-Hachem ve diğ., 2012). Bu noktada, en düşük ağırlık azalmalarının bakteri ilave edilen ve çökeltme ortamında kür edilen numunelerden elde edilmesi, uygun kür şartlarında bakterilerin metabolik aktivitesi sonucunda gerçekleştirilen çatlakların onarılması işleminin sülfat sızıntılarını engellediği şeklinde bir çıkarım yapılmasına olanak sağlamıştır. Deneysel bulgular, ayrıca, referans örnekler haricinde bakteri ilave edilen tüm grup örneklerinde en yüksek ağırlık azalmalarının laboratuvar koşullarında kür edilen numunelerden elde edildiğini göstermiştir. Ek olarak, bakteri konsantrasyonunun 10^9 'dan 10^7 CFU/mL'ye düşmesiyle birlikte sülfat saldırısı sonucu meydana gelen ağırlık azalmalarında artışlar gözlenmiştir.



Şekil 4. 29 Sülfat saldırısı sonucu meydana gelen ağırlık değişimleri

4.2.6. Geopolimer harç örneklerinin darbe dayanıklılığı

Şekil 4.30, farklı bakteri konsantrasyonu ve bakteri/bağlayıcı oranları kullanılarak üretilen ve farklı kür ortamlarında bekletilen geopolimer harç numunelerinin enerji emme kapasitesini göstermektedir. Çelik bilyenin numunenin yüzeyine çarptıktan sonra geri tepme yüksekliğini elde etmek suretiyle numunelerin enerji emme kapasitesi hakkında yorum yapılan bu deneyde, en yüksek enerji emme kapasitesinin genel olarak laboratuvar koşullarında kür edilen geopolimer harç numunelerden elde edildiği gözlenmiştir. En düşük enerji emme kapasitesi 2,38 J ile çökeltme ortamında kür edilen referans örneklerden (R-N) elde edilirken, en yüksek enerji emme kapasitesi ise 10^9 CFU/mL konsantrasyona sahip, bakteri/bağlayıcı oranı %1 olan ve laboratuvar koşullarında kür edilen 1-A grubu örneklerden elde edilmiştir.

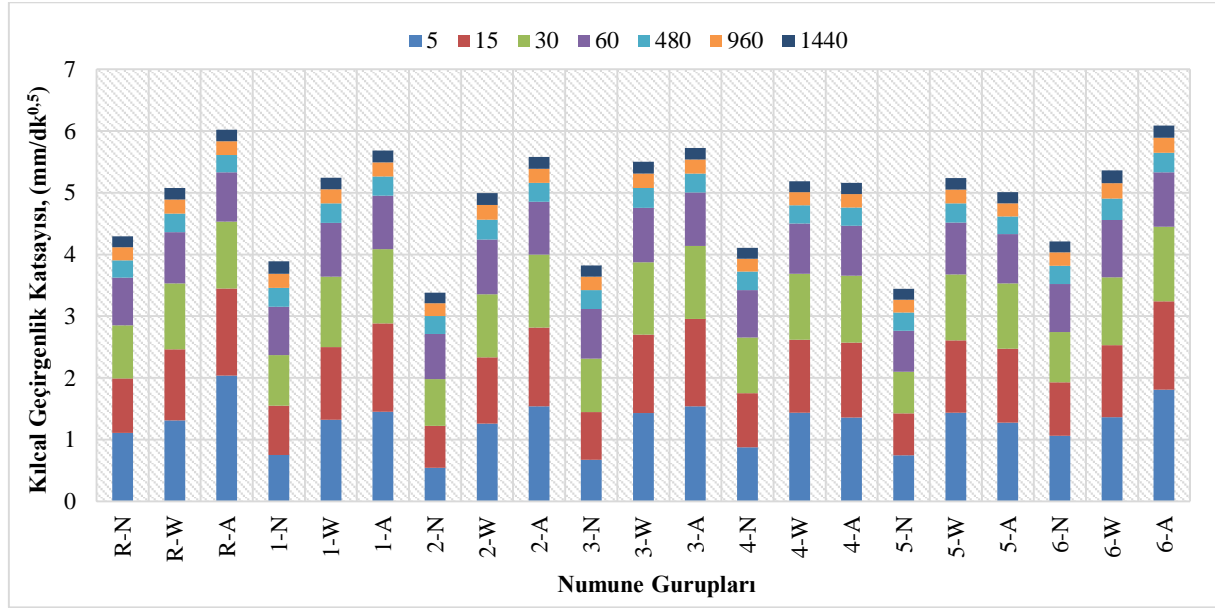


Şekil 4. 30 Absorbe edilen enerji miktarı

4.2.7. Geopolimer harç örneklerinin kılcal su emme değerleri

Referans ve bakteri içeren geopolimer harç örneklerinin kılcal su emme değerleri 5, 15, 30, 60, 480, 960 ve 1440. dakikalarda tespit edilmiştir. Şekil 4.31, geopolimer harç numunelerinin farklı zaman aralıklarında ölçülen kılcal su emme katsayısı değerlerini göstermektedir. Şekil 4.31'den görüleceği gibi en düşük kılcal su emme katsayısına sahip örnekler 2-N ve 5-N grubu olarak karşımıza çıkarken, en yüksek kılcal su emme katsayısı değerleri ise laboratuvar koşullarında kür edilen referans ve 6. grup numunelerden (R-A ve 6-A) elde edilmiştir. Kılcal

su emme katsayısı değerleri, tüm numune gruplarında çökeltme ortamında kür tekniğinde en düşük seviyeleri görmüştür.

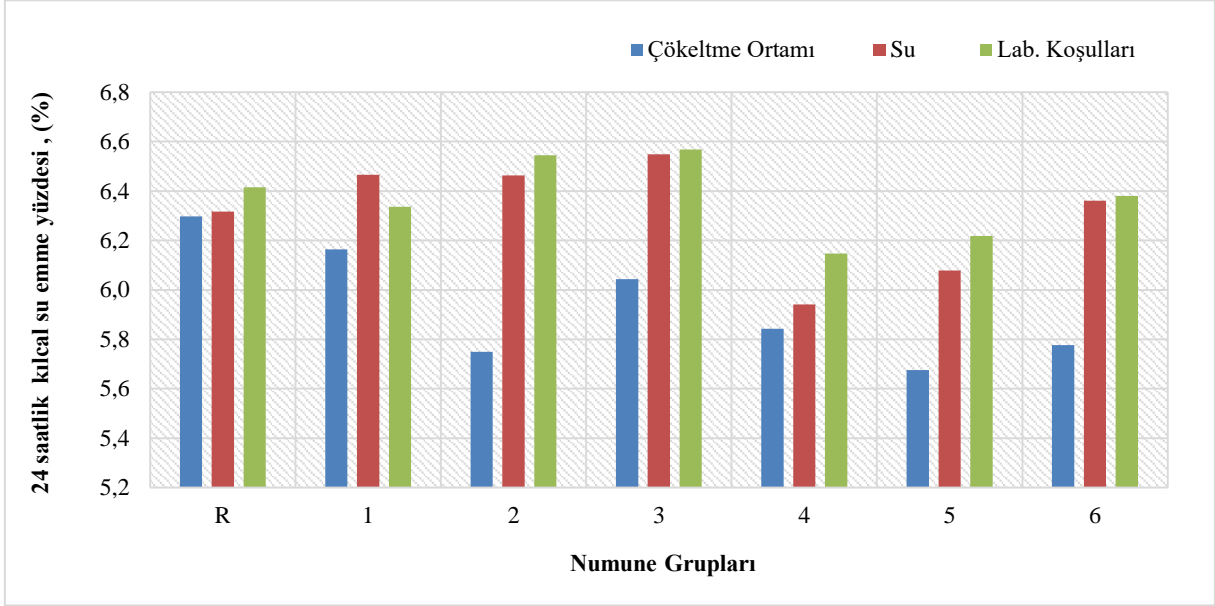


Şekil 4. 31 Geopolimer harç numunelerinin kılcal su emme katsayıları

Şekil 4.32, geopolimer harç numunelerin 24 saat sonunda ölçülen kapiler su emme yüzdeleri göstermektedir. Şekil 4.32'den görüleceği gibi, genel olarak 24 saatlik kılcal en yüksek su emme yüzdeleri laboratuvar koşullarında kür edilen geopolimer harç örneklerinden elde edilmiştir. Kullanılan bakteri konsantrasyonundan bağımsız olarak, kılcal su emme özelliği bakımından en iyi performansa sahip örnekler %2 bakteri/bağlayıcı oranı ile üretilen ve çökeltme ortamında kür edilen örnekler olarak karşımıza çıkmaktadır. Şöyle ki, 5-N grup numunelerin kapiler su emme yüzdeleri, aynı kür şartlarında bekletilen referans örneklerin kapiler su emme yüzdelere göre yaklaşık %10 azalma göstermiştir. Referans örnekler ile kıyaslandığında, bakteri ilave edilerek üretilen ve çökeltme ortamında kür edilen örneklerin kapiler su emme yüzdesindeki düşüşler bakterinin mikrobiyal aktivitesi sonucu çatlak ve boşlukların CaCO_3 çökeltmesi yoluyla doldurulması şeklinde açıklanmıştır (Nguyen, 2019; De Muynck, 2008).

Uygulanan kür şartlarının kapiler su emme yüzdelere etkileri incelendiğinde, örneklerin çökeltme ortamında kür edilmesinin, laboratuvar şartlarında kür edilmesine nazaran R, 1, 2, 3, 4, 5 ve 6. grup numuneleri için kapiler su emme yüzdelerinde sırasıyla % 1.8, % 2.7, % 12, % 8, %5, %8.7 ve %9.5 oranında düşüşler yaşanmasına yol açtığı gözlenmiştir. Bu durum,

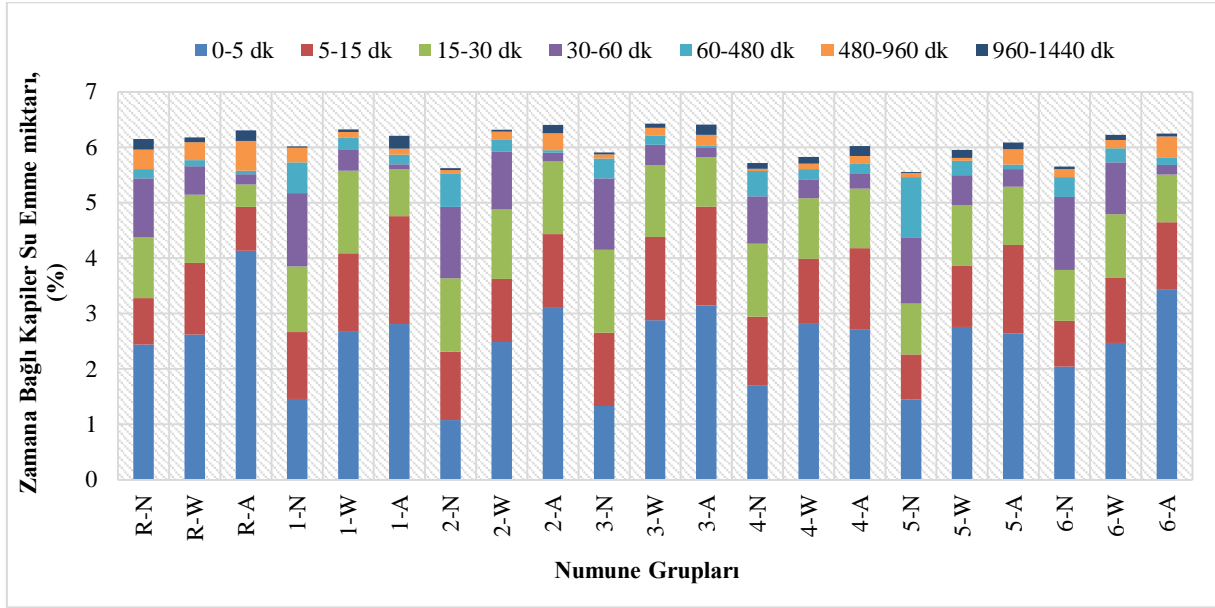
mikrobiyal kaynaklı kendini onarma kapasitesinin geçirimsizlik üzerinde etkili olabilmesi için uygun kür ortamının oluşturulması gerektiğini göstermektedir.



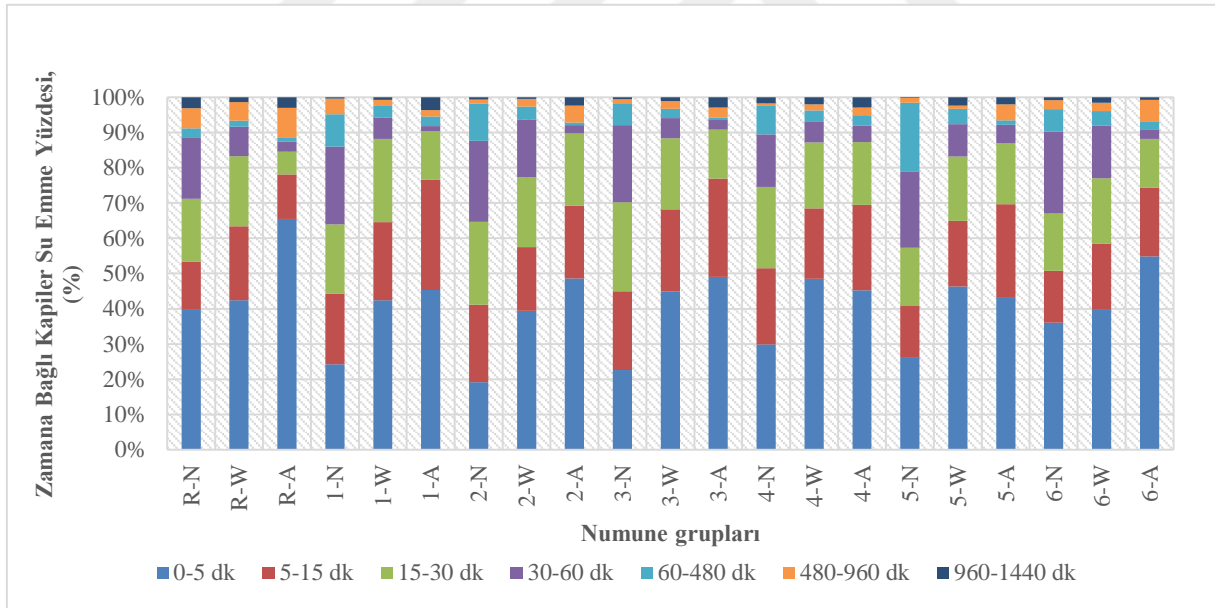
Şekil 4. 32 Geopolimer harç numunelerin 24 saatlik kılcal su emme yüzdeleri

Şekil 4.33 ve 4.34 sırasıyla zamana bağlı kapiler su emme değerleri ve kapiler su emme yüzdelerini göstermektedir. Şekil 4.33 ve 4.34'den görüleceği gibi, geopolimer harç bünyesine kapiler yolla giriş sağlayan su miktarının çok büyük bir bölümünün ilk 1 saat içerisinde bünyeye nüfuz ettiği tespit edilmiştir. Örneğin, laboratuvar koşullarında kür edilen örneklerin tümünde, 24 saatte kapiler yol ile emilen su miktarının %40'ından fazlası ilk 5 dakikada gerçekleşmiştir. Hatta R-A grup numunelerde 24 saatte emilen su miktarının yaklaşık %65'i ilk 5 dakikalık zaman diliminde gerçekleşmiştir. Ancak, bakteri kullanılarak üretilen ve çökeltme ortamında kür edilen örneklerin ilk dakikalarda kapiler yolla emilen su miktarları diğer kür yöntemi uygulanan numunelere ve çökeltme ortamında bekletilen referans örneklere göre oldukça azdır. Örneğin, çökeltme ortamında kür edilen R-N numunesinin ilk 5 dakika içerisinde kapiler yolla emdiği su miktarı 24 saatlik emilen su miktarının yaklaşık % 40'ı iken, 10^9 CFU/mL konsantrasyona sahip, %2 bakteri/bağlayıcı oranı kullanılarak üretilen ve çökeltme ortamında kür edilen 2-N örneğinin ilk 5 dakikalık zaman diliminde kapiler yolla emdiği su miktarı ise yaklaşık %25 civarında olmuştur. Bu durum, suyla temas eden yüzeyde bulunan çatlakların bakteri yoluyla CaCO_3 çökertilmesi suretiyle kapatıldığı ve su girişinin diğer örneklere kıyasla daha zor olduğunu göstermektedir. Ek olarak, tüm örneklerde deney süresinin artmasıyla birlikte kapiler su emme yüzdelerinde çok belirgin düşüşler gözlenmiştir. Şöyle ki, 16-24 saat

arasında kapiler yollar ile emilen su miktarları değerleri 24 saatte emilen toplam su miktarının %0.24'ü ile (5-N) %3.03'ü (R-A) arasında değişmektedir.



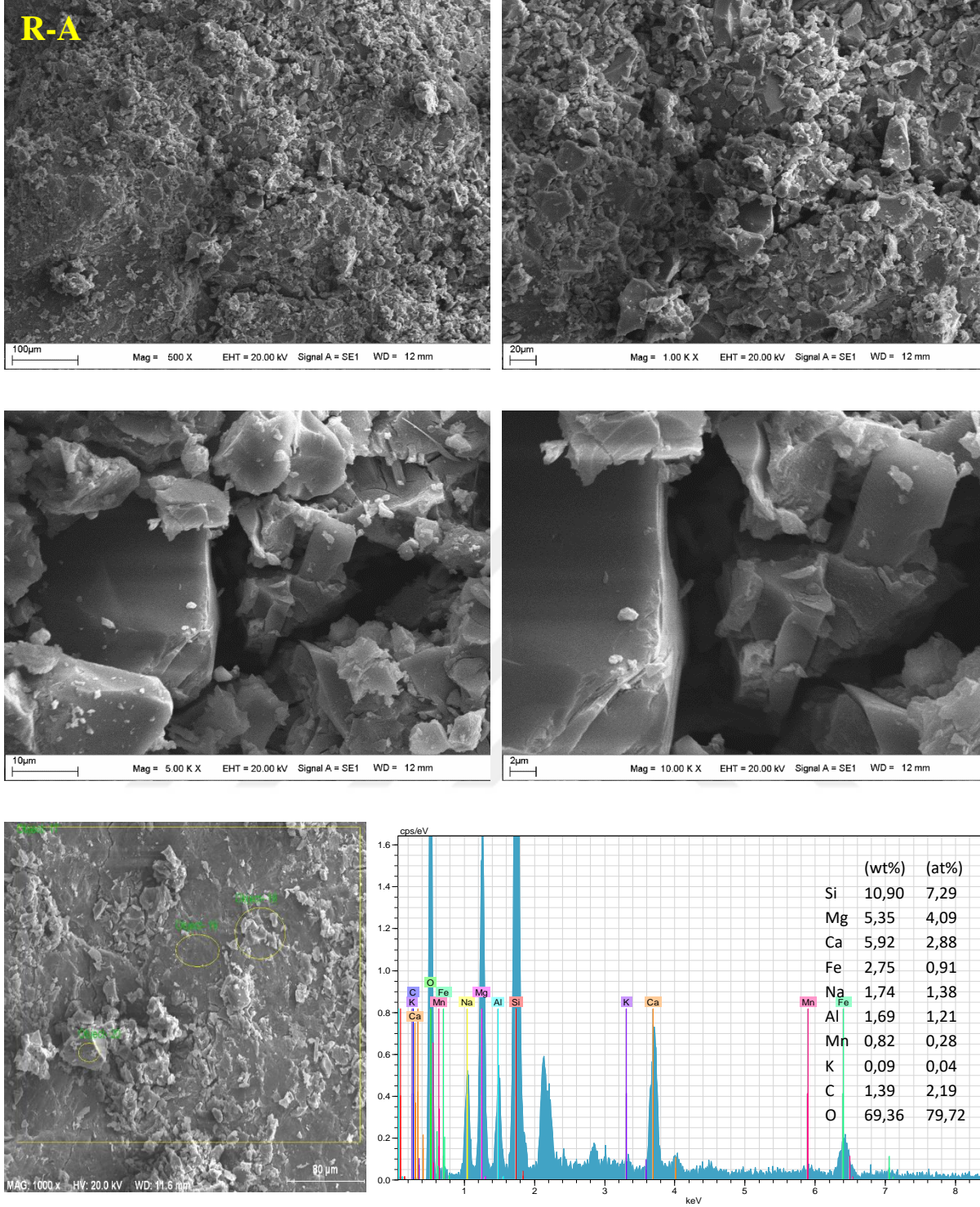
Şekil 4. 33 Zamana bağlı kapiler su emme değerleri



Şekil 4. 34 Zamana bağlı kapiler su emme yüzdeleri

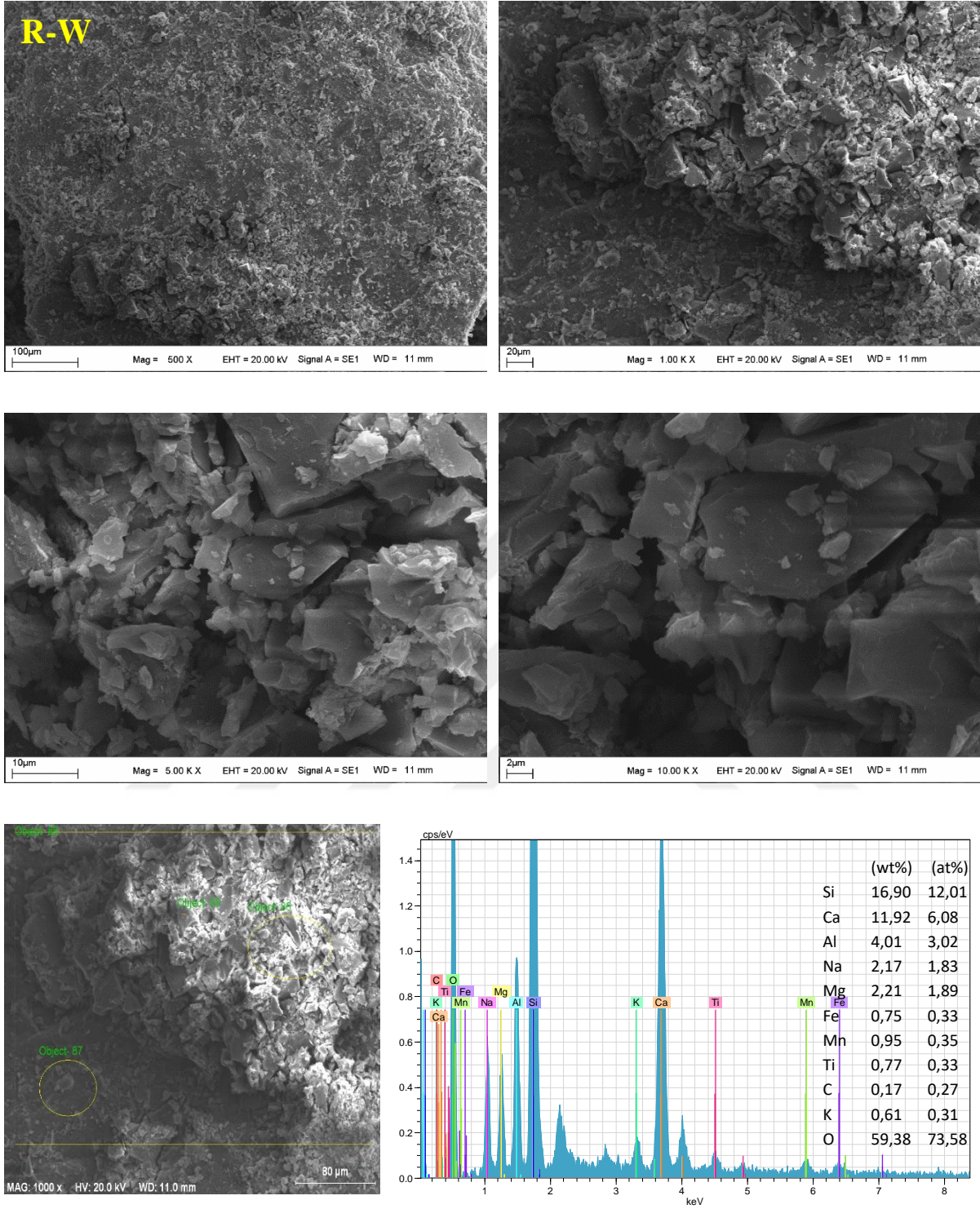
4.2.8. Geopolimer harç örneklerinin mikro yapısı

Geopolimer harç örneklerinin mikro yapı özellikleri SEM-EDS ve XRD analizleri yapılarak detaylı bir şekilde incelenmiştir. Gerçekleştirilen mikro yapısal analizler Şekil 4.35- 4.56'de sunulmuştur. Üç farklı kür ortamında (çökeltme ortamı, su ve laboratuvar koşulları) bekletilen, iki farklı bakteri konsantrasyonu (10^9 ve 10^7 CFU mL) ve kullanılan ve üç farklı bakteri/bağlayıcı oranı dikkate alınarak üretilen geopolimer harç örneklerin SEM ve EDS analizleri çökeltme ortamında bekletilen ve bakteri ilave edilmiş tüm örneklerde CaCO_3 oluşumuna işaret eden üç ana elementin (Ca, C ve O) yüksek oranda var olduğunu ortaya çıkarmıştır. Benzer şekilde, mikrobiyal kaynaklı kalsit çökeltmesi yoluyla kendini onaran kompozitlerde gerçekleştirilen karakterizasyon çalışmalarında da bu şekilde benzer çıkarımlar yapılmıştır (Wiktor ve Jonkers, 2011; Tziviloglou ve diğ., 2016; Nguyen ve diğ., 2019; Li ve diğ., 2017). Diğer bir yandan, SEM görüntüleri çökeltme ortamında kür edilen bakteri ilave edilmiş örneklerde CaCO_3 kristalleri oluşumunu göstermiş, ayrıca özellikle laboratuvar koşullarında kür edilen geopolimer harç örneklerde de belirgin mikro çatlakların varlığını kanıtlamıştır. Bu bağlamda, gerçekleştirilen mikro yapısal analizlerin numuneler üzerinde uygulanmış neredeyse tüm performans analizlerini doğrular nitelikte olduğu belirlenmiştir.



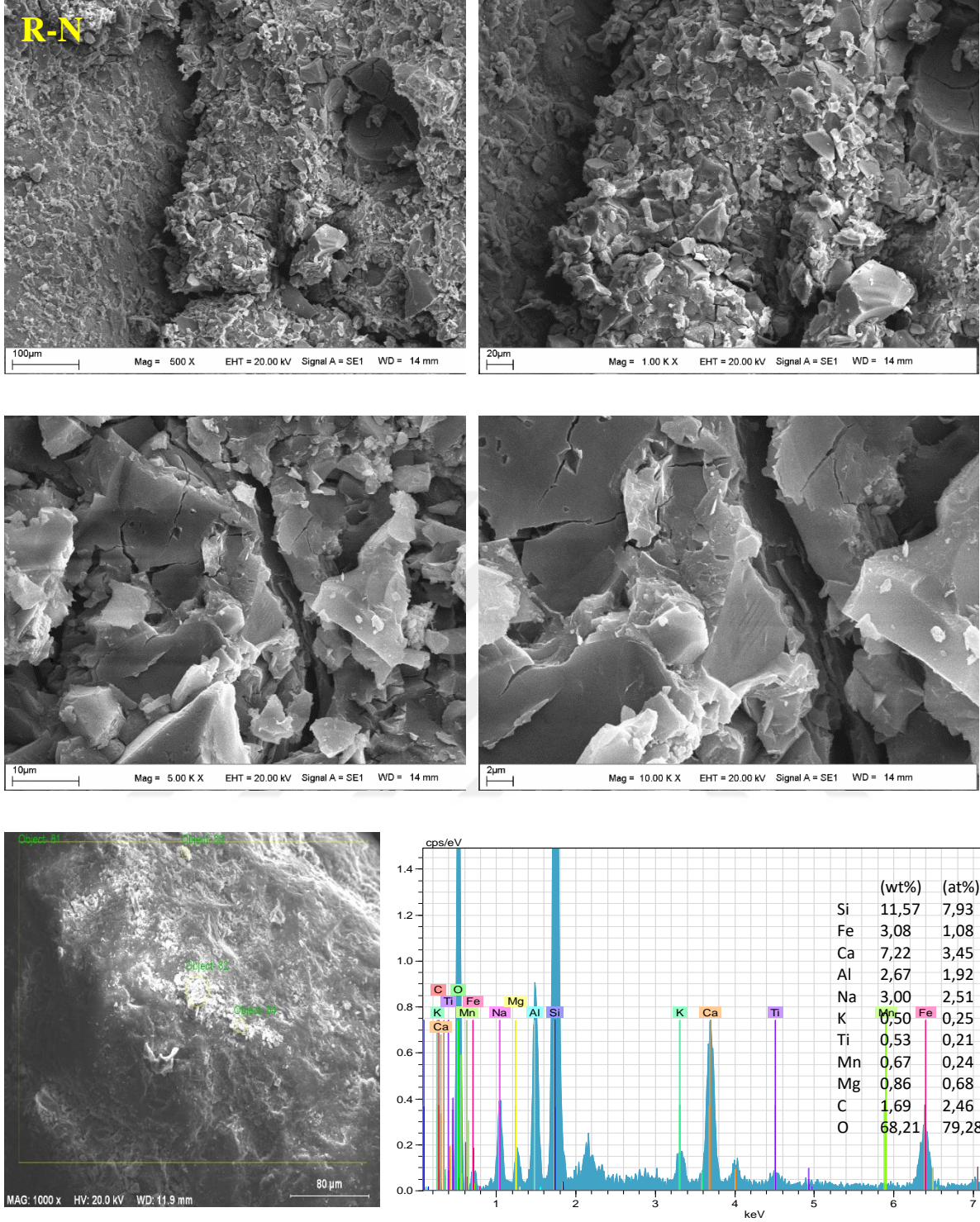
Şekil 4. 35 R-A numunesine ait mikro yapısal gözlemler

Şekil 4.35, laboratuvar şartlarında kür edilen referans örneğe ait mikro yapısal analiz sonuçlarını göstermektedir. Şekil 4.35’de, CaCO_3 oluşumuna işaret eden Ca ve C elementlerinin düşük atomik yüzdelerde yer aldığı görülmektedir. Bu durum, R-A grup numunelerde verimli bir kendini onarmanın sağlanmadığını ortaya koymaktadır.



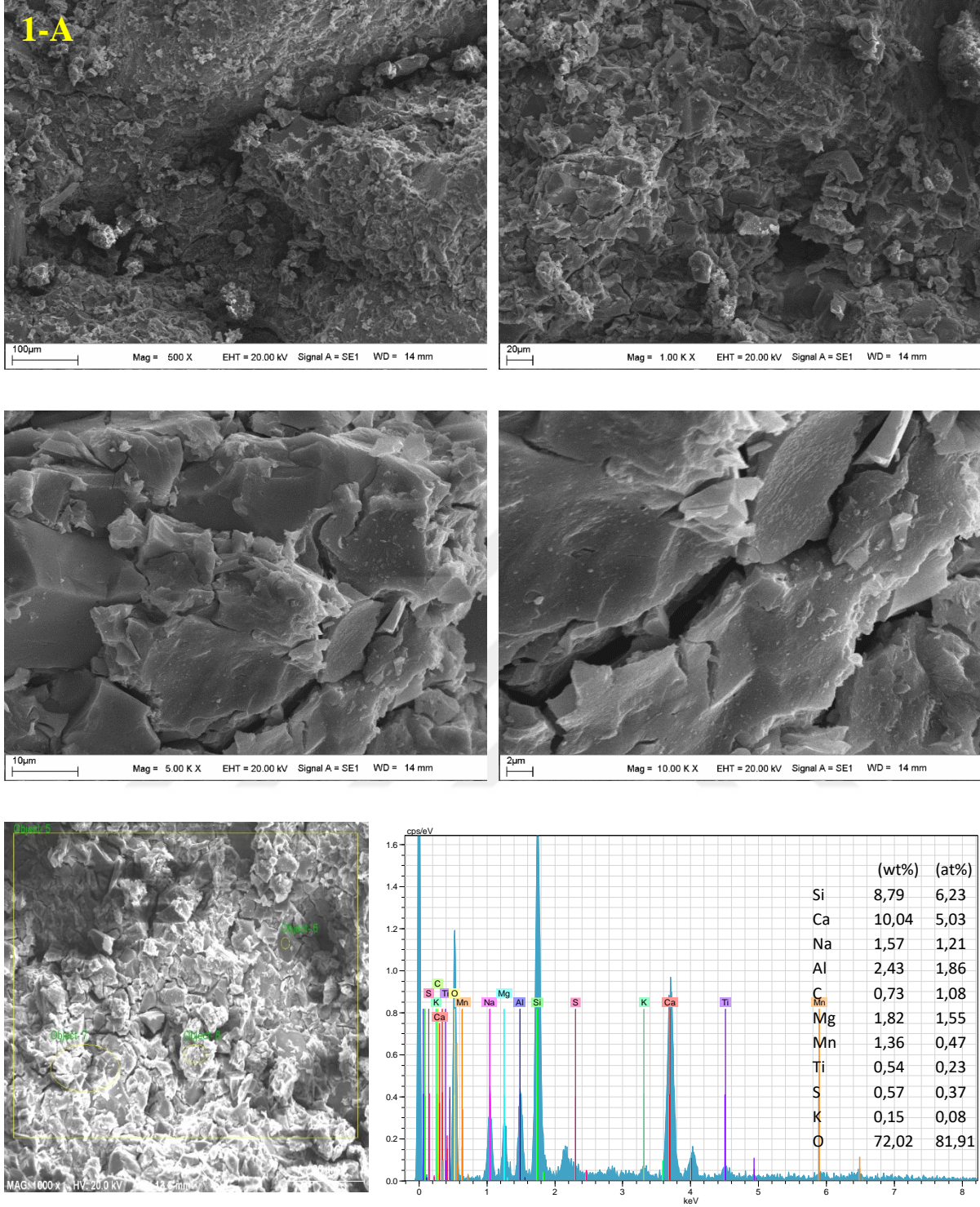
Şekil 4. 36 R-W numunesine ait mikro yapısal gözlemler

Şekil 4.36, suda kür edilen referans örneğe ait mikro yapısal analiz sonuçlarını göstermektedir. Şekil 4.36’da CaCO_3 oluşumuna işaret eden Ca ve C elementlerinin düşük atomik yüzdelerde yer aldığı görülmektedir. Bu durum, R-W grup numunelerde verimli bir kendini onarmanın sağlanamadığını ortaya koymaktadır.



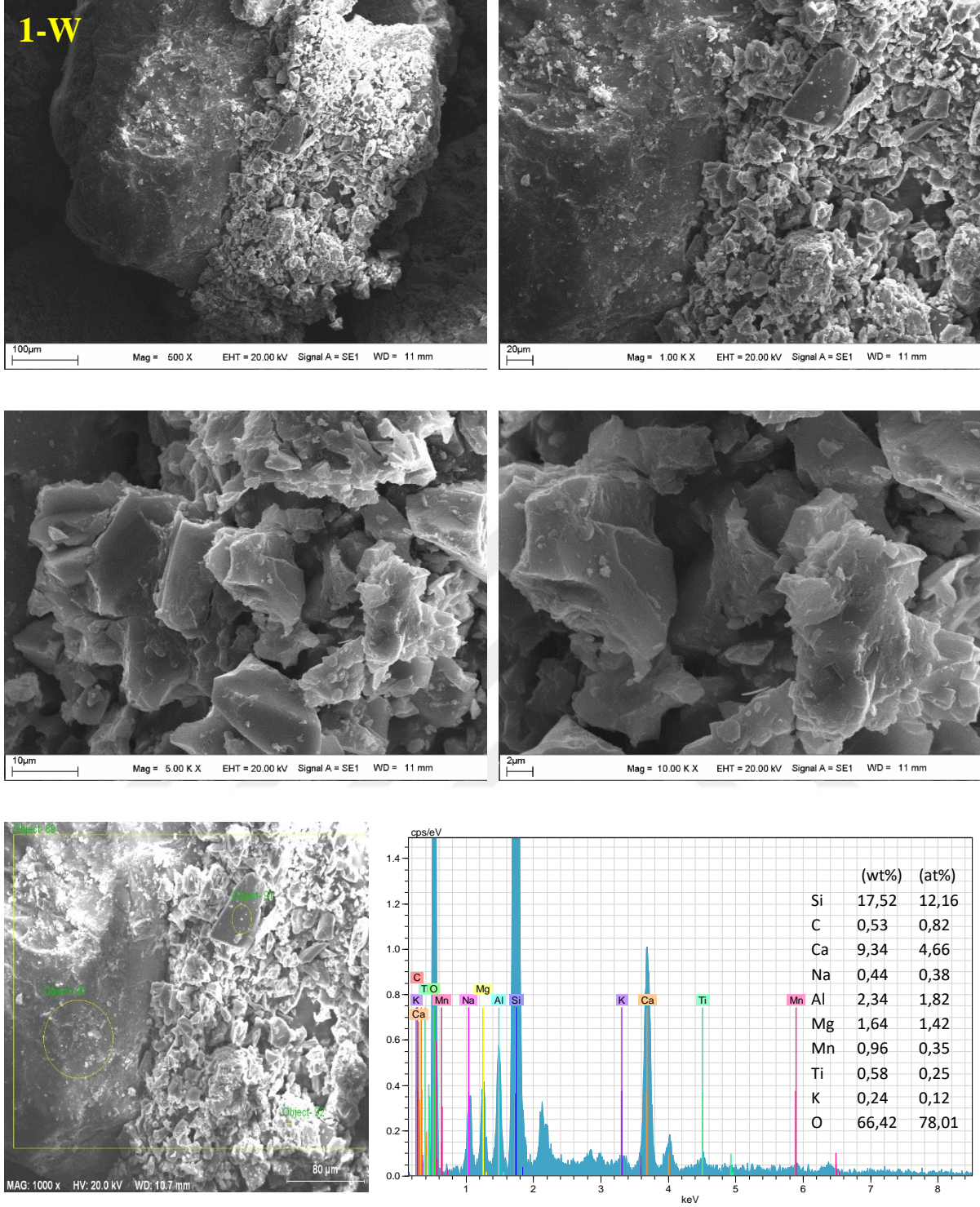
Şekil 4. 37 R-N numunesine ait mikro yapısal gözlemler

Şekil 4.37, çökeltme ortamında kür edilen referans örneğe ait mikro yapısal analiz sonuçlarını göstermektedir. Şekil 4.37’de CaCO_3 oluşumuna işaret eden Ca ve C elementlerinin düşük atomik yüzdelerde yer aldığı görülmektedir. Bu durum, R-N grup numunelerde verimli bir kendini onarmanın sağlanmadığını ortaya koymaktadır.



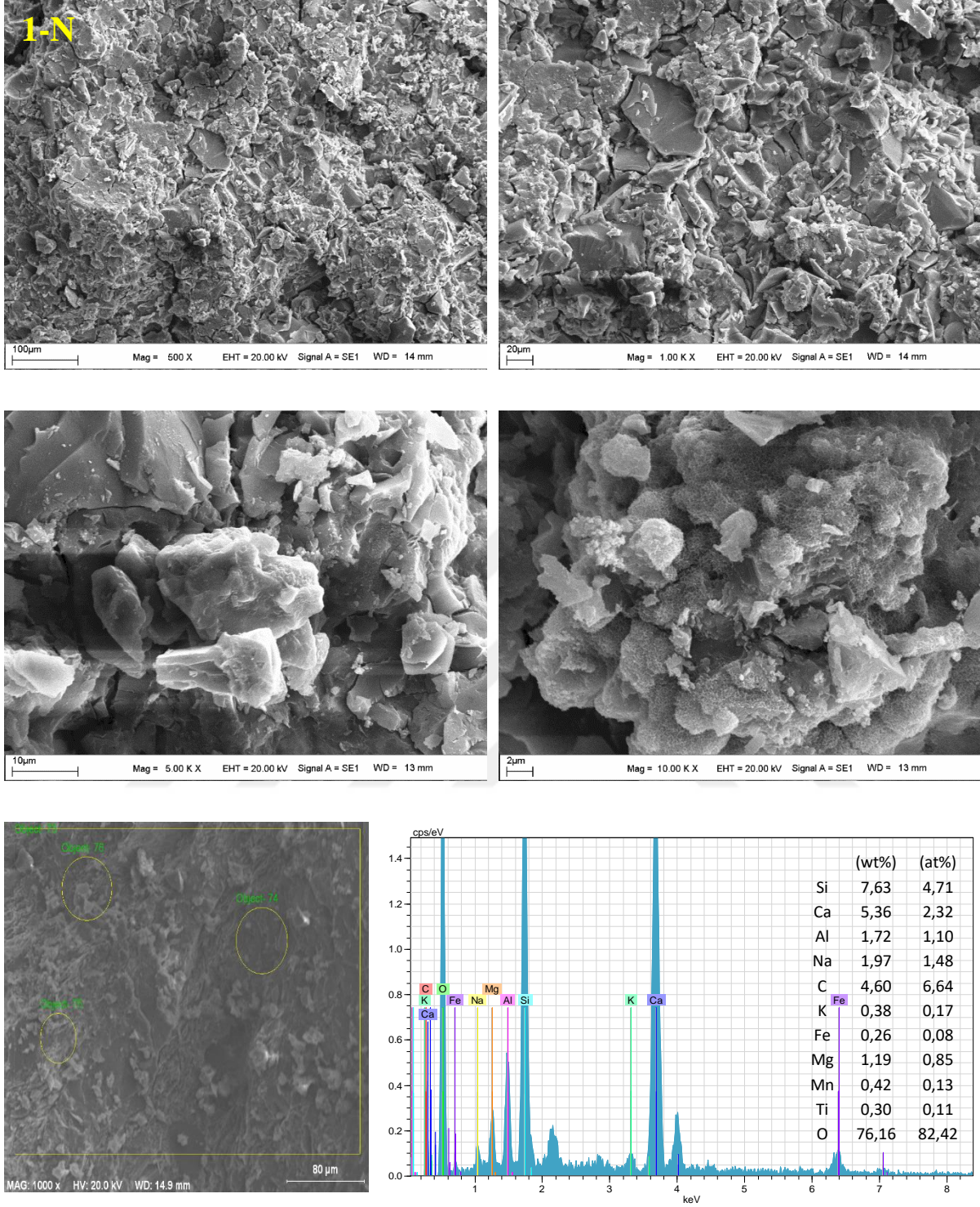
Şekil 4. 38 1-A numunesine ait mikro yapısal gözlemler

Şekil 4.38, çökeltme ortamında kür edilen 1. grup numuneye ait mikro yapısal analiz sonuçlarını göstermektedir. Şekil 4.38’de görüldüğü gibi, CaCO_3 oluşumuna işaret eden Ca ve C elementlerinin düşük atomik yüzdelerde yer aldığı belirlenmiştir. Bu durum, 1-A grup numunelerde verimli bir kendini onarmanın sağlanamadığını ortaya koymaktadır.



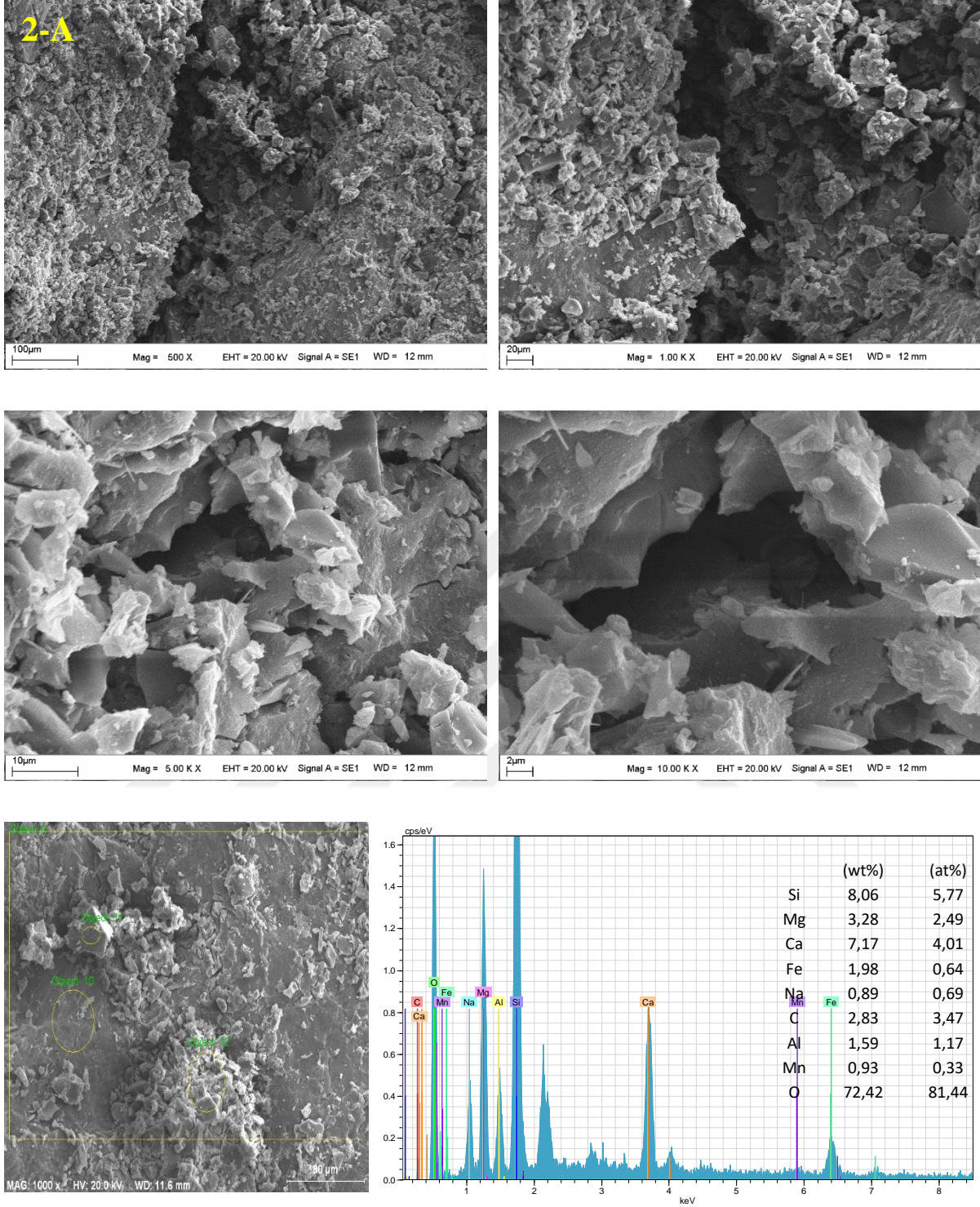
Şekil 4. 39 1-W numunesine ait mikro yapısal gözlemler

Şekil 4.39, suda kür edilen 1. grup numuneye ait mikro yapısal analiz sonuçlarını göstermektedir. Şekil 4.39’da CaCO_3 oluşumuna işaret eden Ca ve C elementlerinin düşük atomik yüzdelerde yer aldığı görülmektedir. Bu durum, 1-W grup numunelerde verimli bir kendini onarmanın sağlanamadığını ortaya koymaktadır.



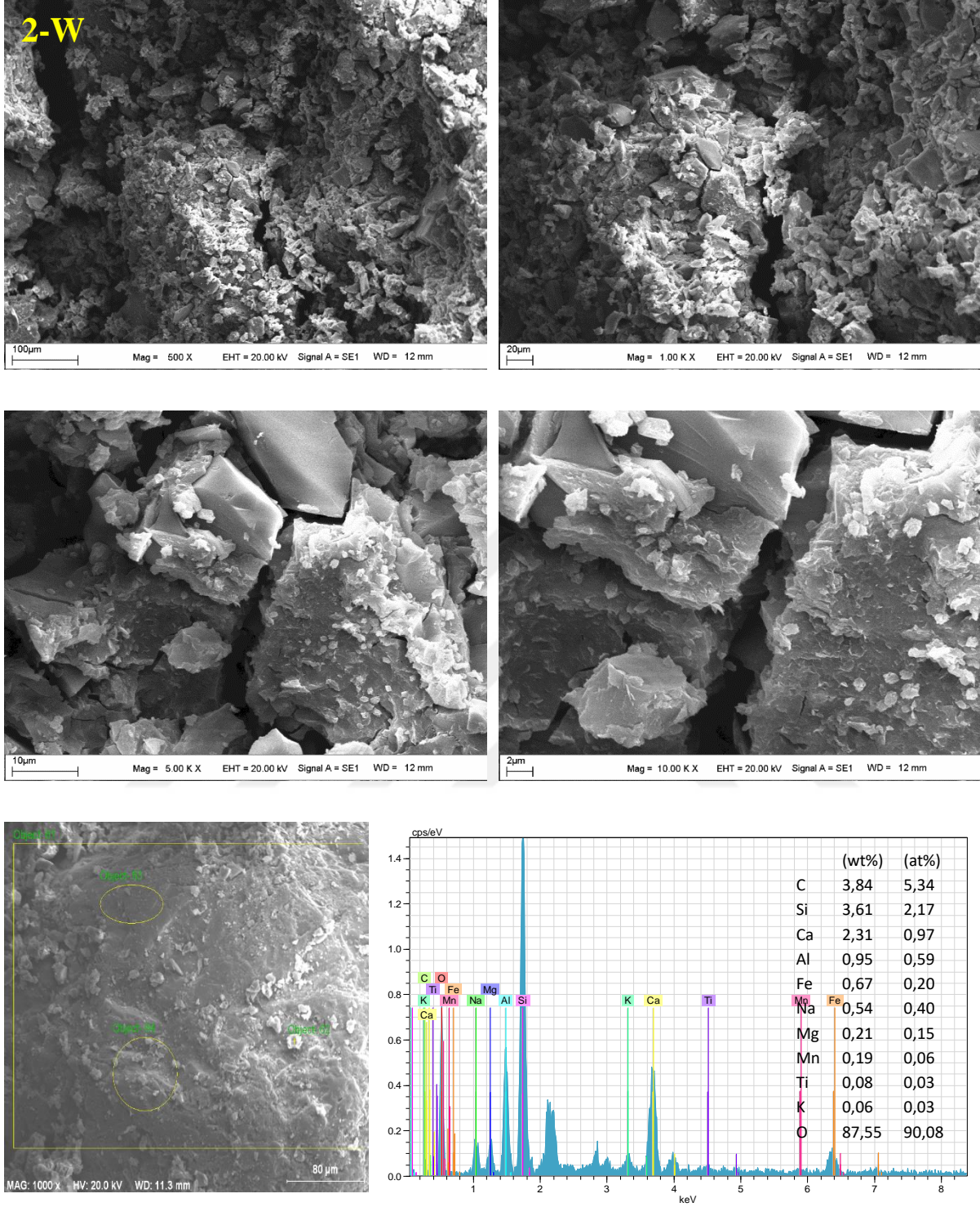
Şekil 4. 40 1-N numunesine ait mikro yapısal gözlemler

Şekil 4.40, çökeltme ortamında kür edilen 1. grup numuneye ait mikro yapısal analiz sonuçlarını göstermektedir. Şekil 4.40'da CaCO_3 oluşumuna işaret eden Ca ve C elementlerinin yüksek atomik yüzdelerde yer aldığı görülmektedir. Bu durum, 1-N grup numunelerde verimli bir kendini onarma mekanizmasının sağlandığını ortaya koymaktadır.



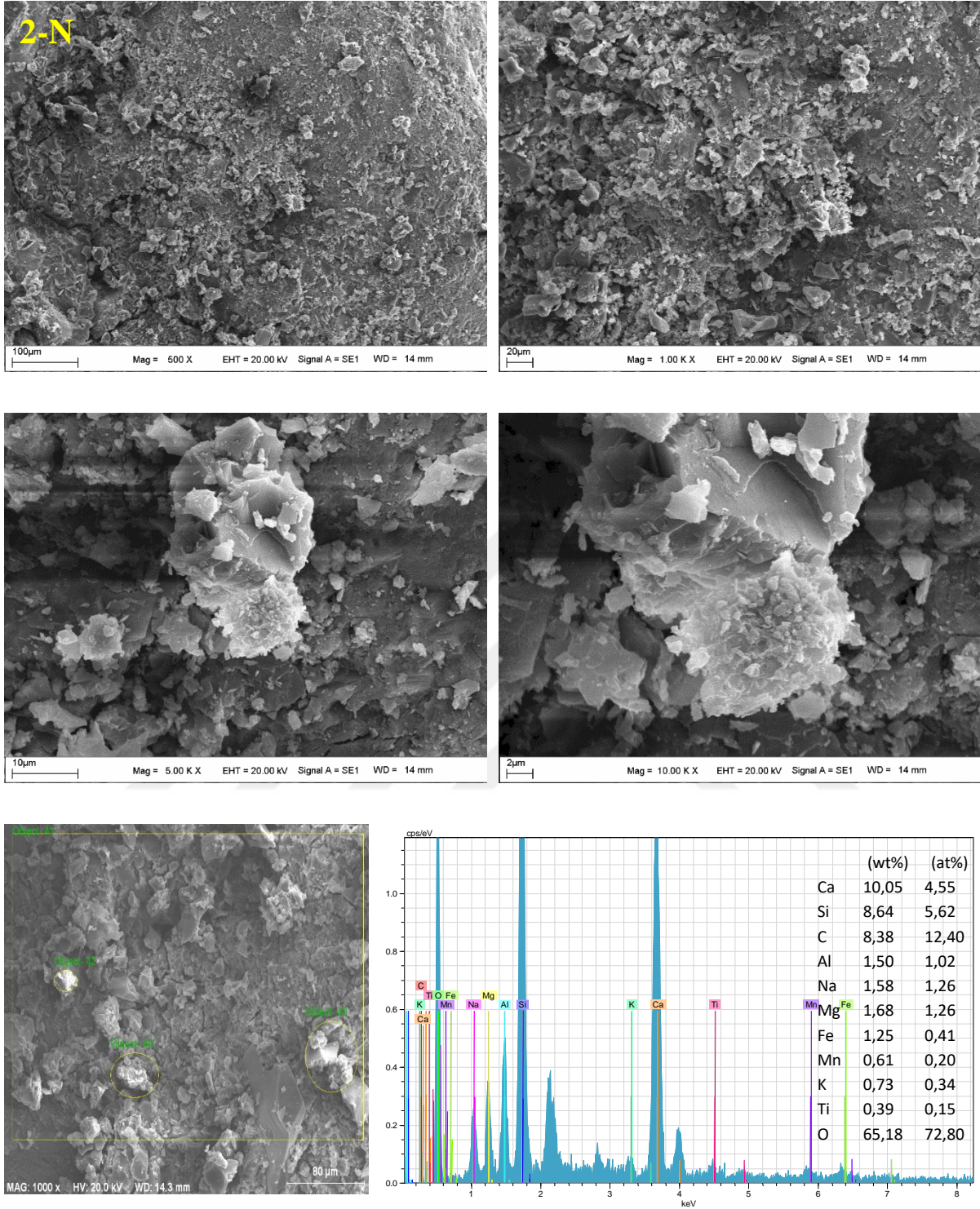
Şekil 4. 41 2-A numunesine ait mikro yapısal gözlemler

Şekil 4.41, laboratuvar koşullarında kür edilen 2. grup numuneye ait mikro yapısal analiz sonuçlarını göstermektedir. Şekil 4.41’de CaCO_3 oluşumuna işaret eden Ca ve C elementlerinin düşük atomik yüzdelerde yer aldığı görülmektedir. Bu durum, 2-A grup numunelerde verimli bir kendini onarmanın sağlanamadığını ortaya koymaktadır.



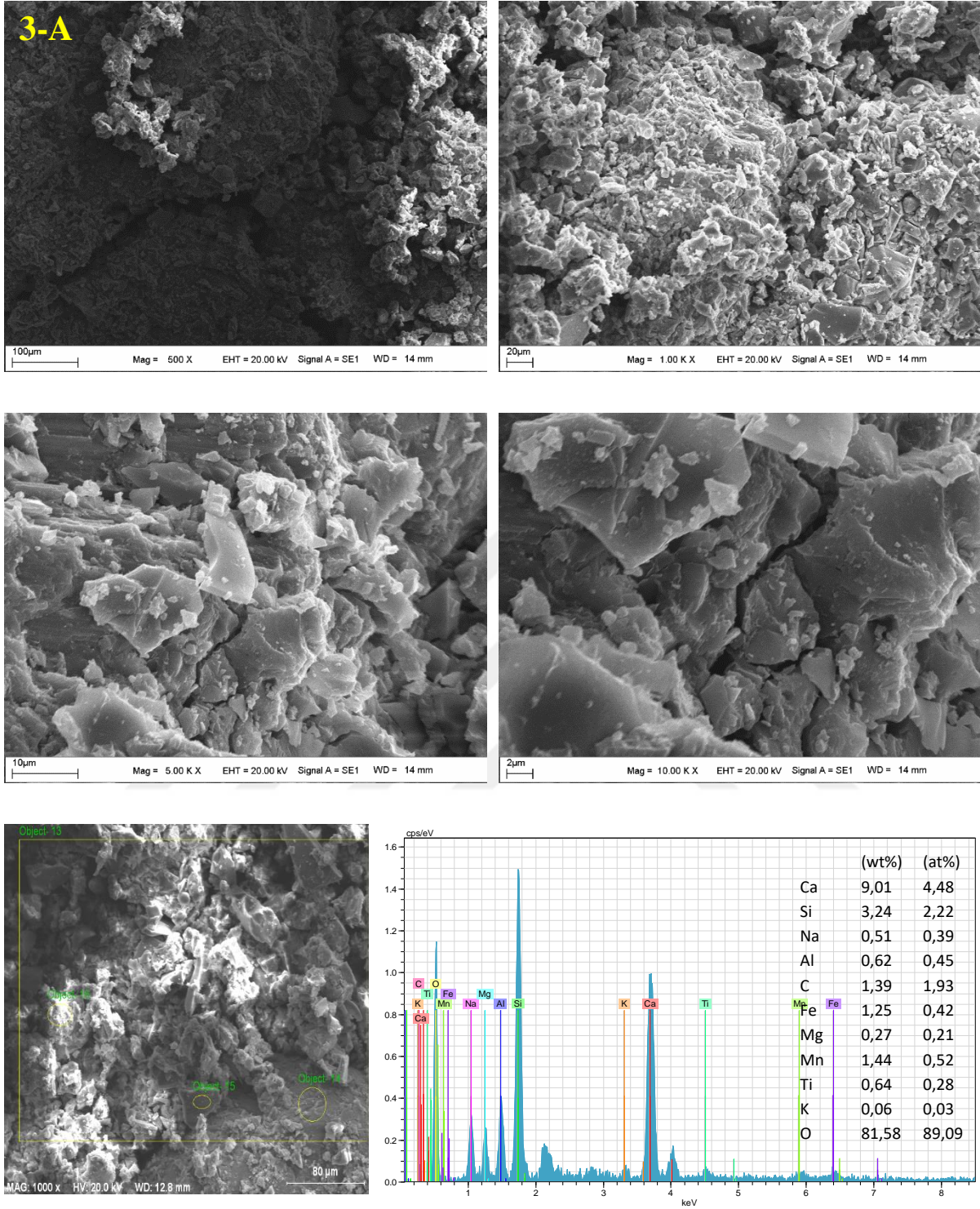
Şekil 4. 42 2-W numunesine ait mikro yapısal gözlemler

Şekil 4.42, suda kür edilen 2. grup numuneye ait mikro yapısal analiz sonuçlarını göstermektedir. Şekil 4.42’de CaCO_3 oluşumuna işaret eden Ca ve C elementlerinin düşük atomik yüzdelerde yer aldığı görülmektedir. Bu durum, 2-W grup numunelerde verimli bir kendini onarmanın sağlanamadığını ortaya koymaktadır.



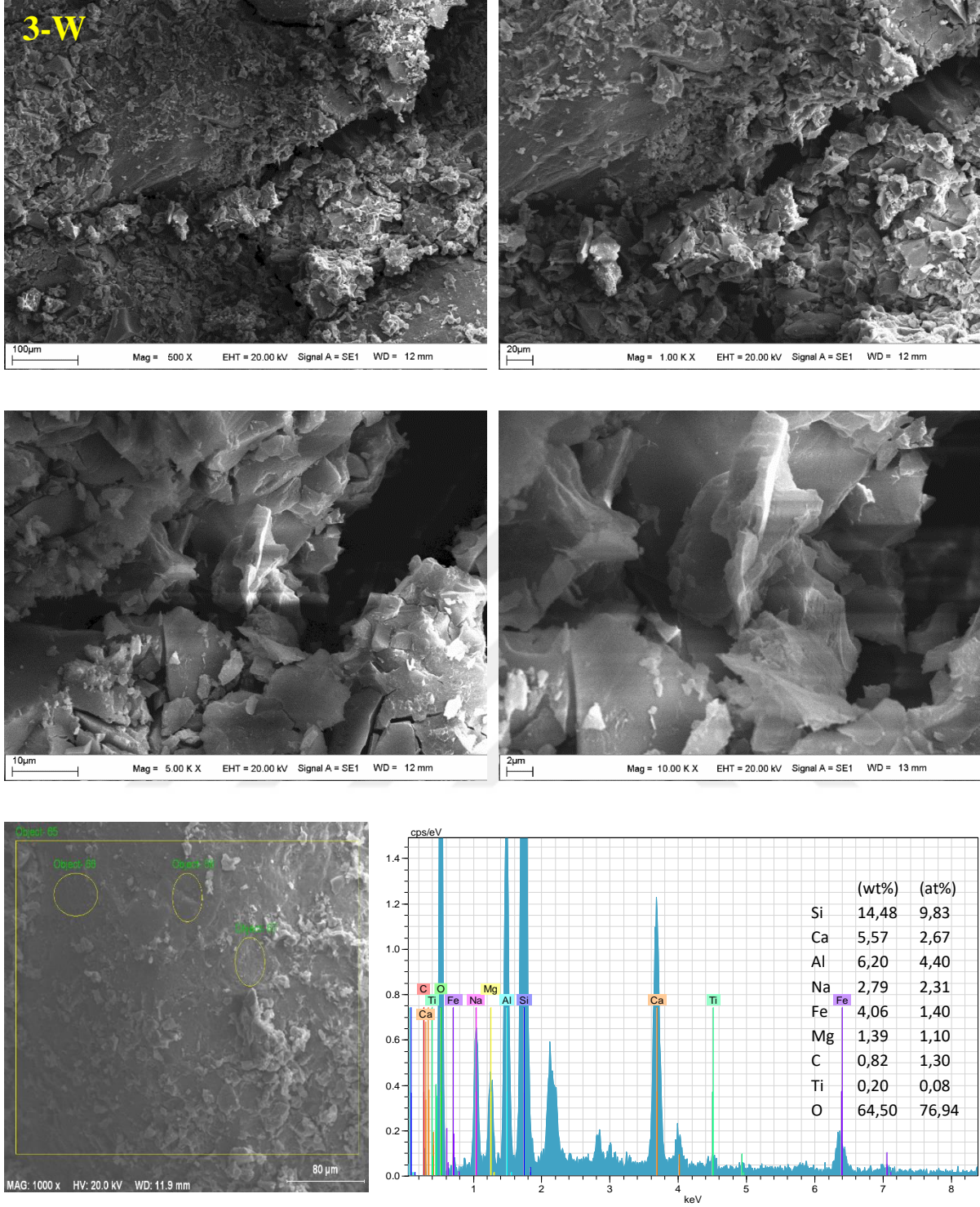
Şekil 4. 43 2-N numunesine ait mikro yapısal gözlemler

Şekil 4.43, çökeltme ortamında kür edilen 2. grup numuneye ait mikro yapısal analiz sonuçlarını göstermektedir. Şekil 4.43’de CaCO_3 oluşumuna işaret eden Ca ve C elementlerinin yüksek atomik yüzdelerde yer aldığı görülmektedir. Bu durum, 2-N grup numunelerde verimli bir kendini onarma mekanizmasının sağlandığını ortaya koymaktadır.



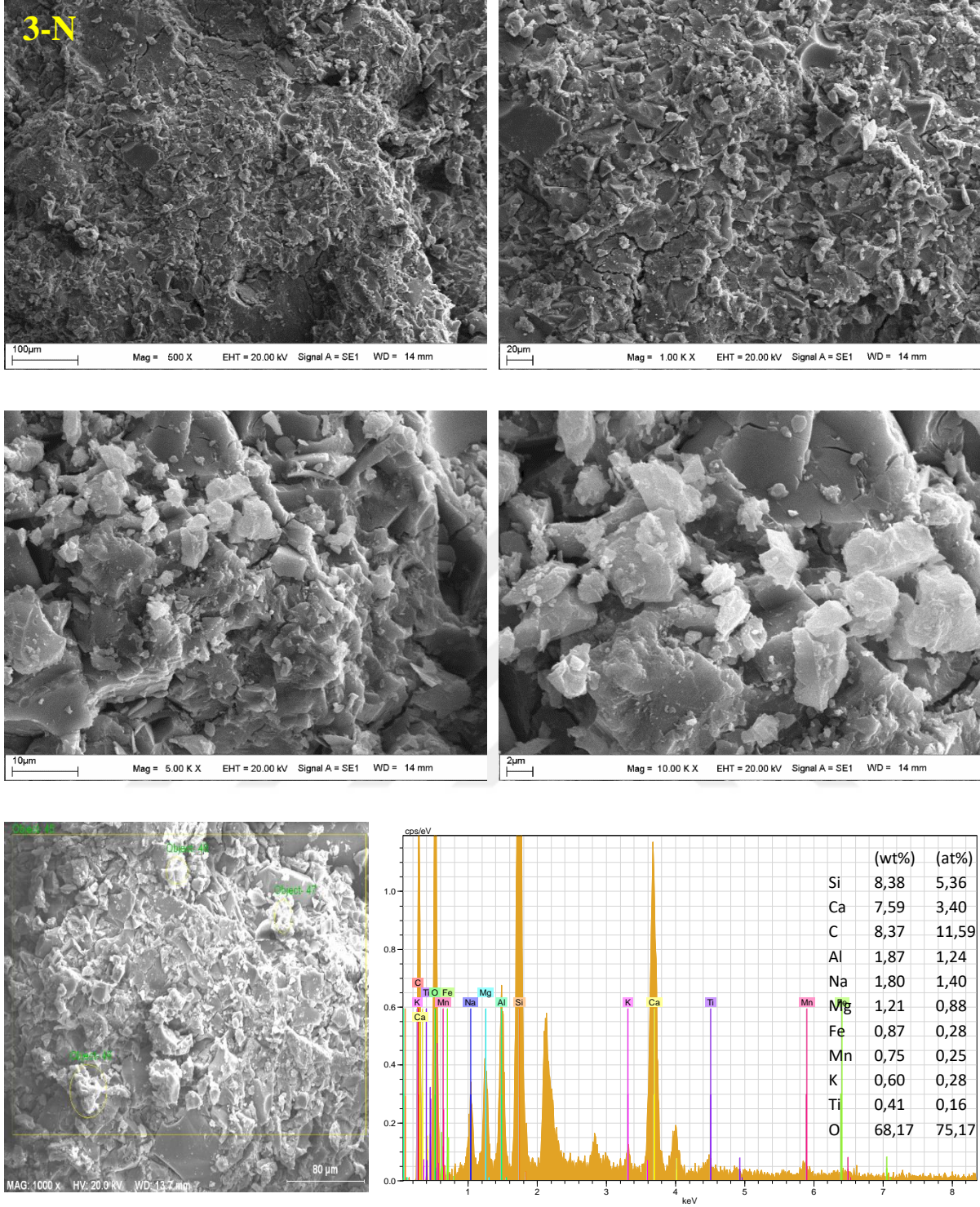
Şekil 4. 44 3-A numunesine ait mikro yapısal gözlemler

Şekil 4.44, laboratuvar koşullarında kür edilen 3. grup numuneye ait mikro yapısal analiz sonuçlarını göstermektedir. Şekil 4.44’de CaCO_3 oluşumuna işaret eden Ca ve C elementlerinin düşük atomik yüzdelerde yer aldığı görülmektedir. Bu durum, 3-A grup numunelerde verimli bir kendini onarmanın sağlanamadığını ortaya koymaktadır.



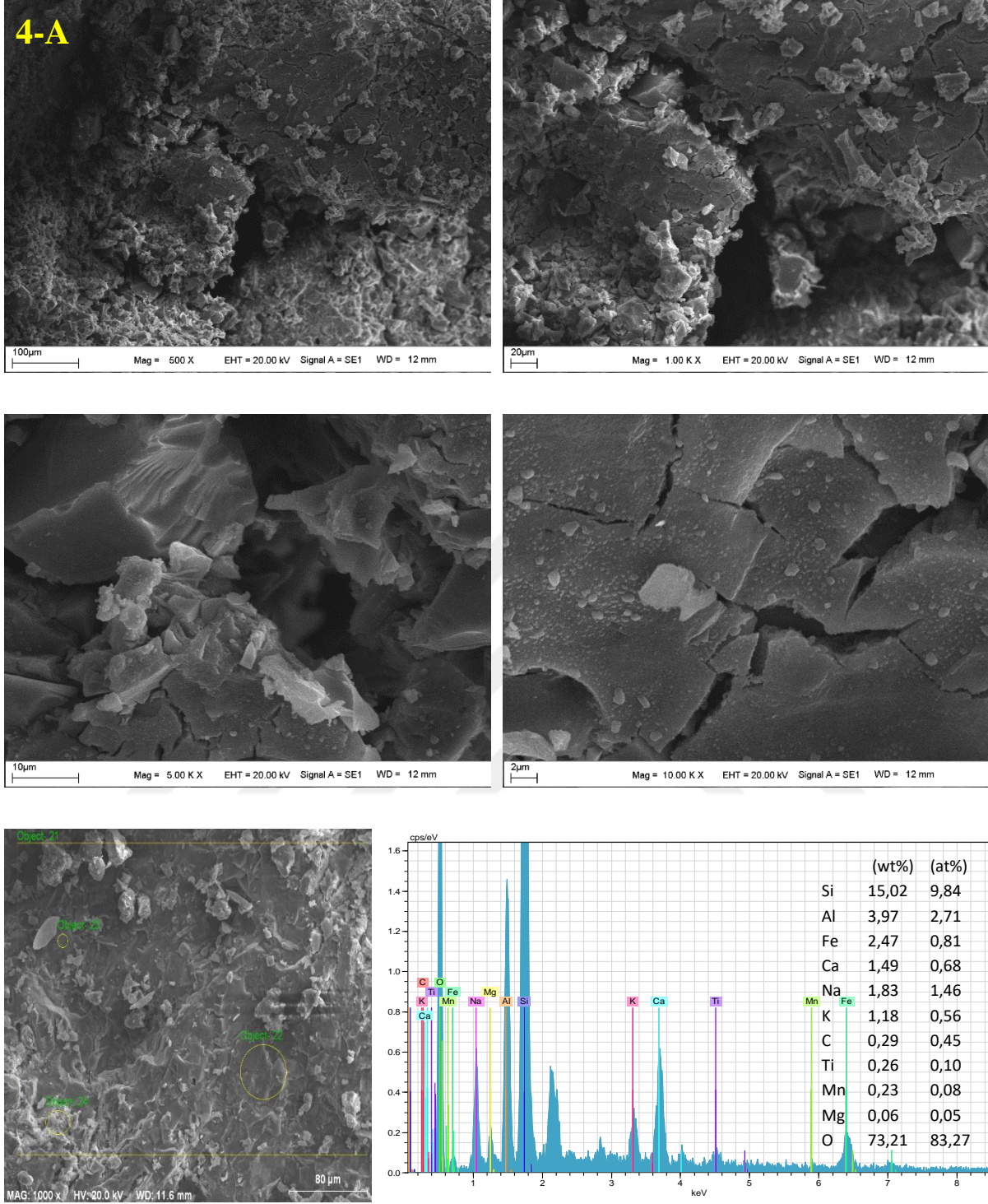
Şekil 4. 45 3-W numunesine ait mikro yapısal gözlemler

Şekil 4.45, suda kür edilen 3. grup numuneye ait mikro yapısal analiz sonuçlarını göstermektedir. Şekil 4.45’de CaCO_3 oluşumuna işaret eden Ca ve C elementlerinin düşük atomik yüzdelerde yer aldığı görülmektedir. Bu durum, 3-W grup numunelerde verimli bir kendini onarmanın sağlanamadığını ortaya koymaktadır.



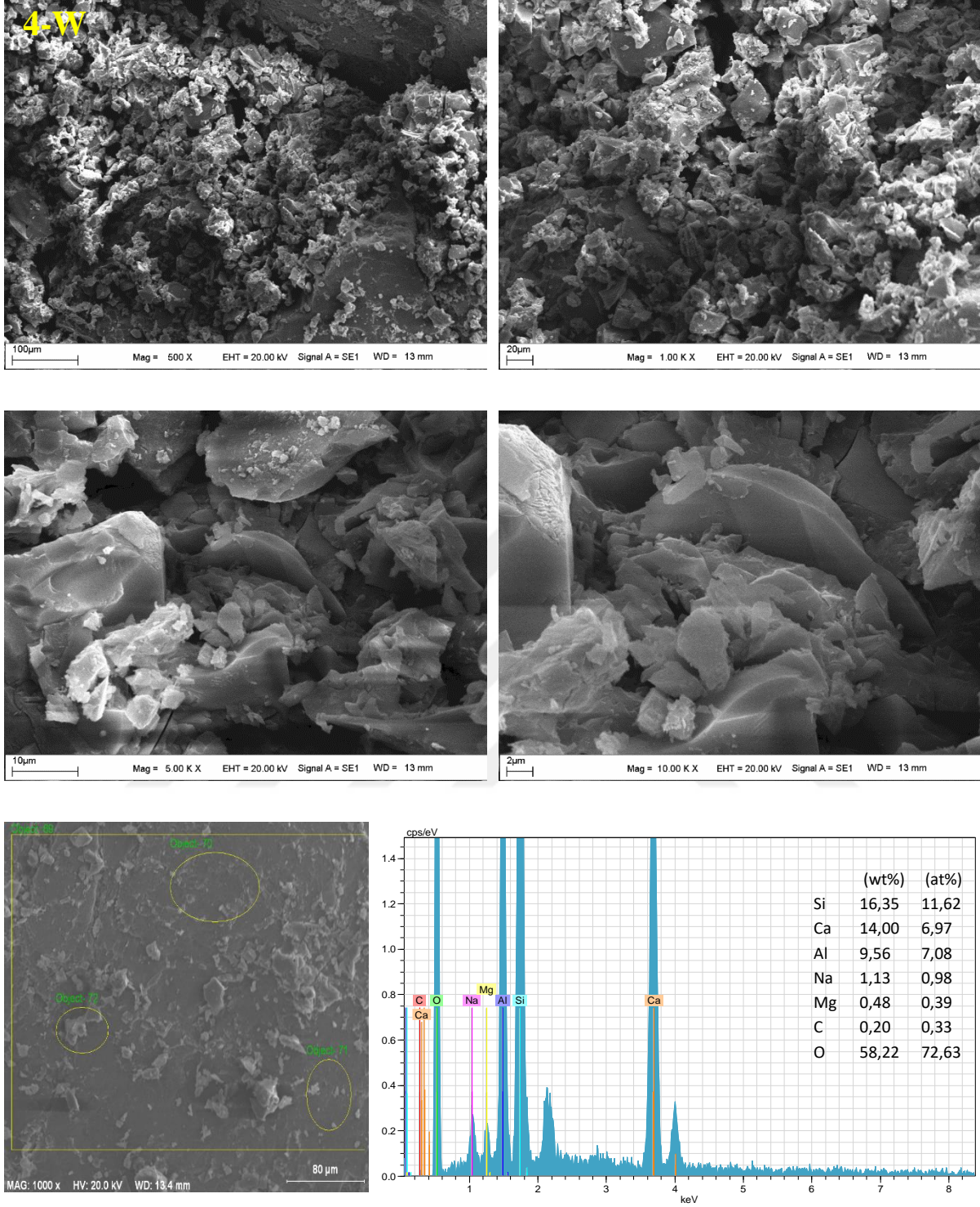
Şekil 4. 46 3-N numunesine ait mikro yapısal gözlemler

Şekil 4.46, çökeltme ortamında kür edilen 3. grup numuneye ait mikro yapısal analiz sonuçlarını göstermektedir. Şekil 4.46'da CaCO_3 oluşumuna işaret eden Ca ve C elementlerinin yüksek atomik yüzdelerde yer aldığı görülmektedir. Bu durum, 3-N grup numunelerde verimli bir kendini onarma mekanizmasının sağlandığını ortaya koymaktadır.



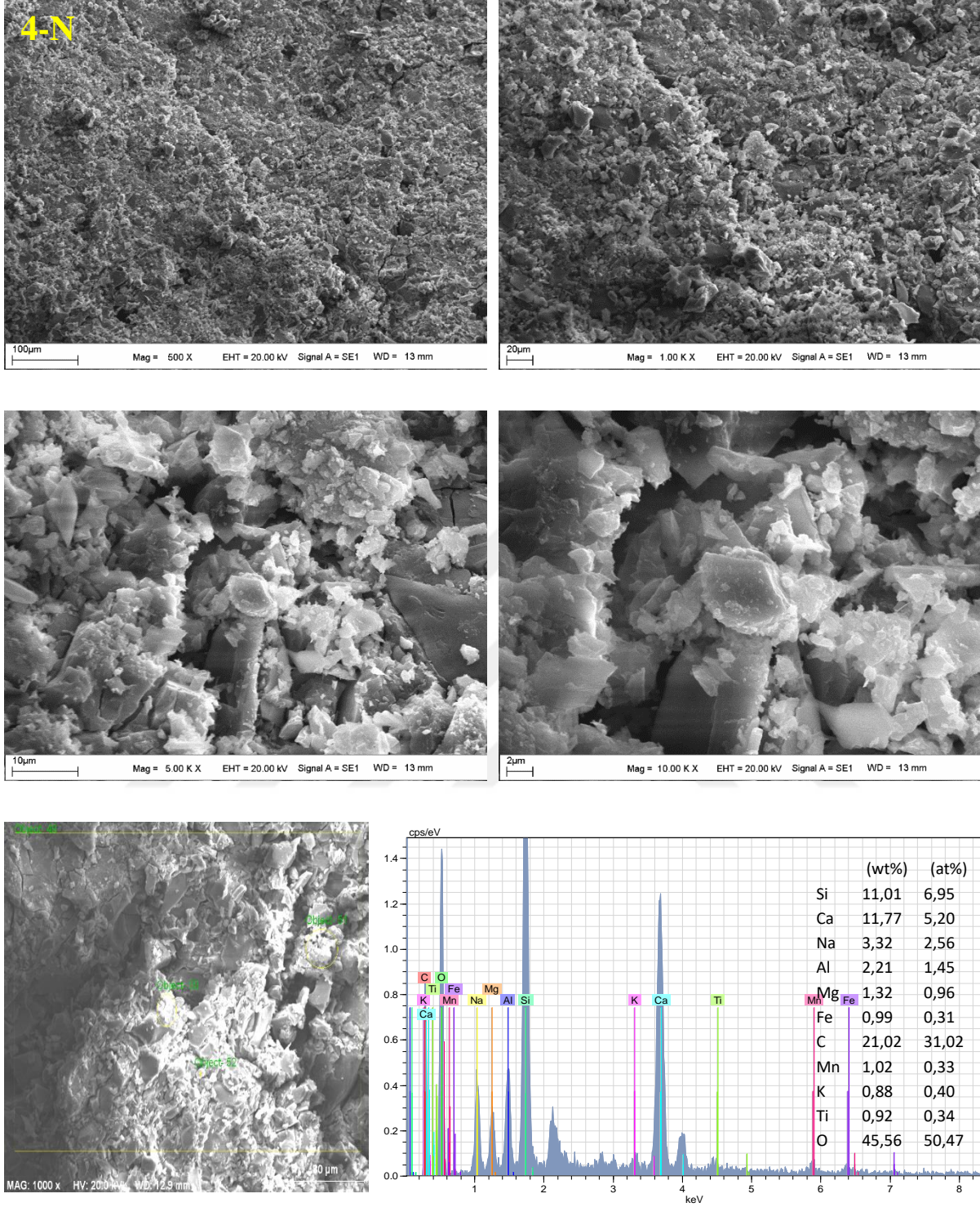
Şekil 4. 47 4-A numunesine ait mikro yapısal gözlemler

Şekil 4.47, laboratuvar koşullarında kür edilen 4. grup numuneye ait mikro yapısal analiz sonuçlarını göstermektedir. Şekil 4.47’de CaCO_3 oluşumuna işaret eden Ca ve C elementlerinin düşük atomik yüzdelerde yer aldığı görülmektedir. Bu durum, 4-A grup numunelerde verimli bir kendini onarmanın sağlanamadığını ortaya koymaktadır.



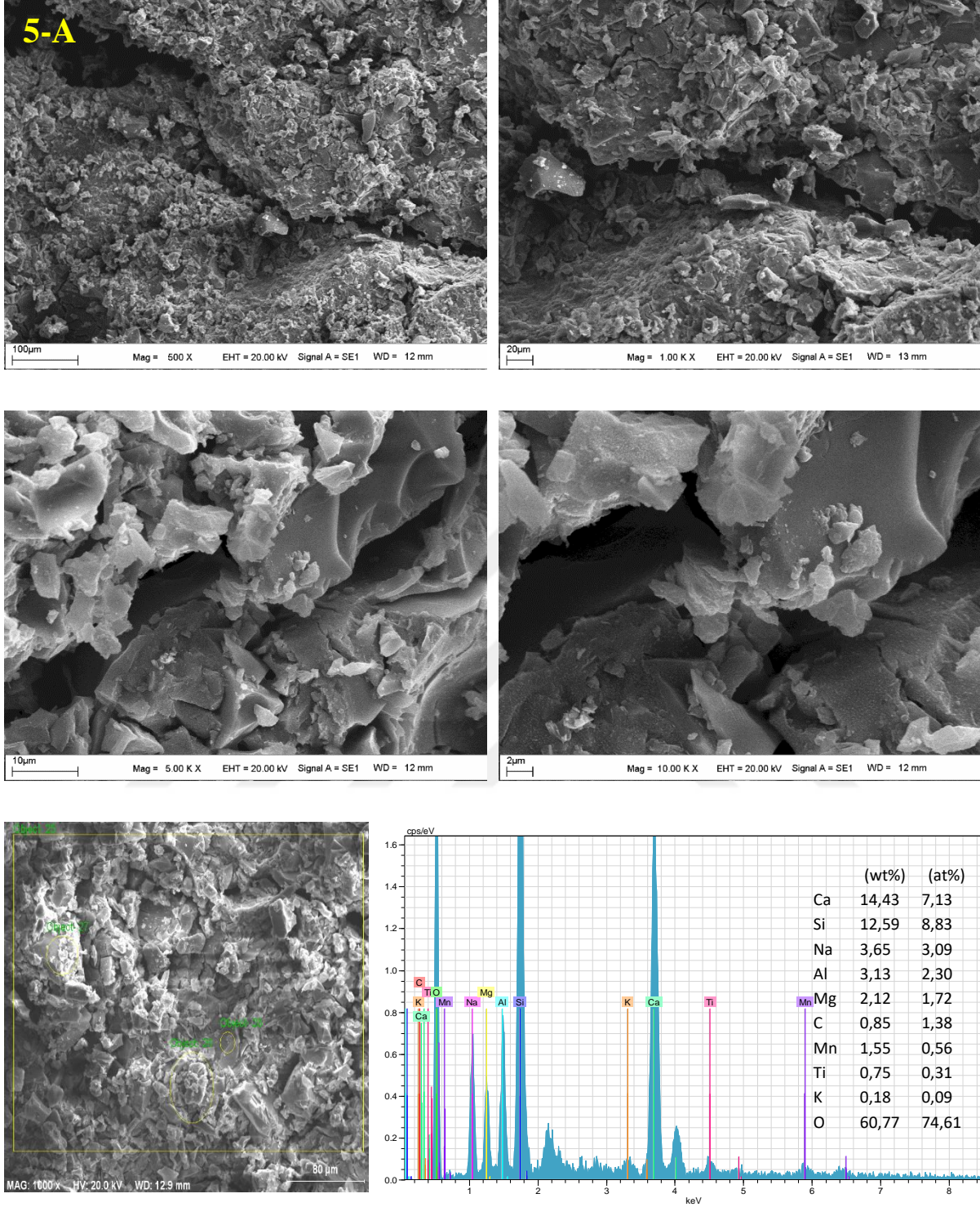
Şekil 4. 48 4-W numunesine ait mikro yapısal gözlemler

Şekil 4.48, suda kür edilen 4. grup numuneye ait mikro yapısal analiz sonuçlarını göstermektedir. Şekil 4.48’de CaCO_3 oluşumuna işaret eden C elementinin düşük atomik yüzdelerde yer aldığı görülmektedir. Bu durum, 4-W grup numunelerde verimli bir kendini onarmanın sağlanamadığını ortaya koymaktadır.



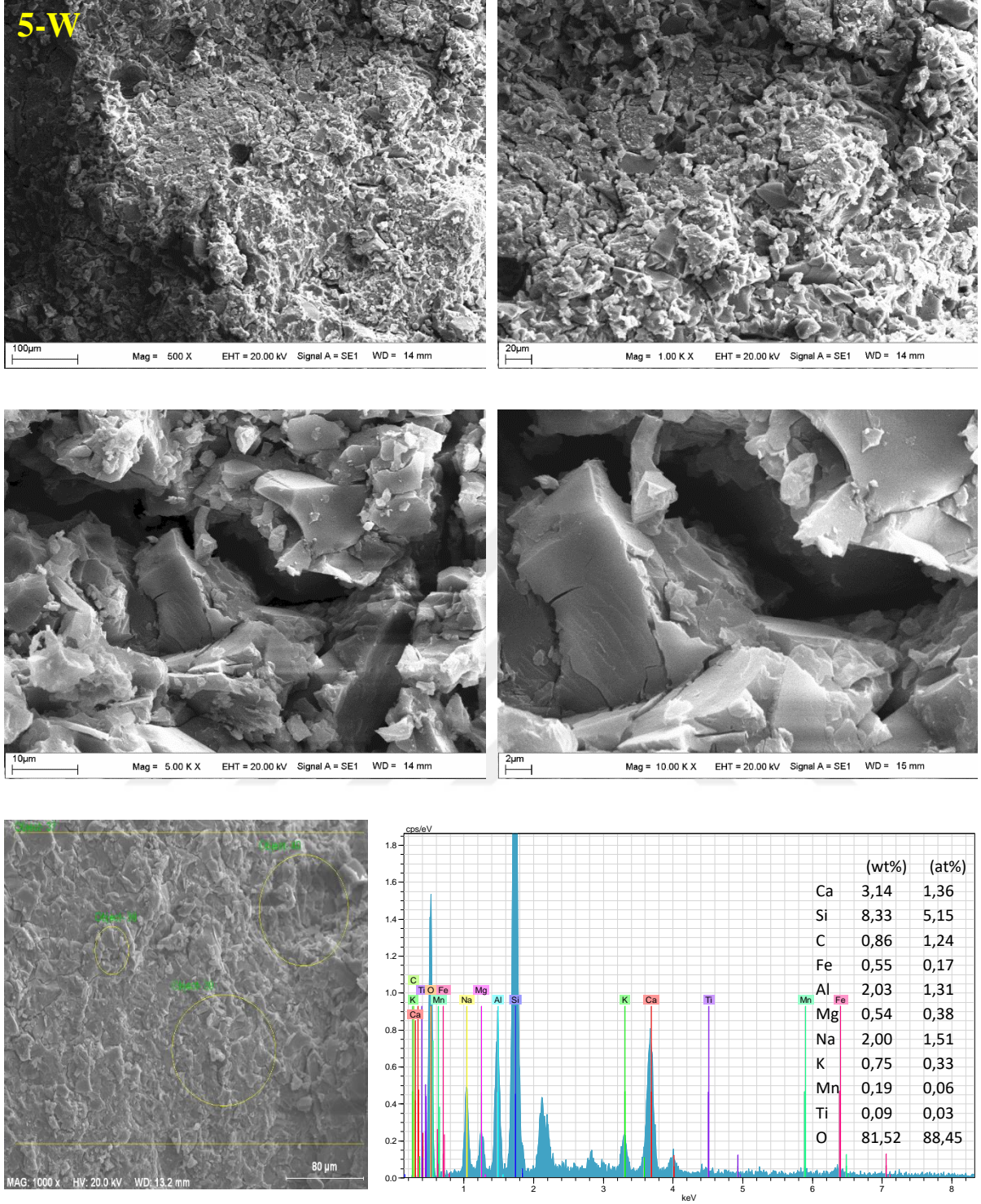
Şekil 4. 49 4-N numunesine ait mikro yapısal gözlemler

Şekil 4.49, çökeltme ortamında kür edilen 4. grup numuneye ait mikro yapısal analiz sonuçlarını göstermektedir. Şekil 4.49'da CaCO_3 oluşumuna işaret eden Ca ve C elementlerinin yüksek atomik yüzdelerde yer aldığı görülmektedir. Bu durum, 4-N grup numunelerde verimli bir kendini onarma mekanizmasının sağlandığını ortaya koymaktadır.



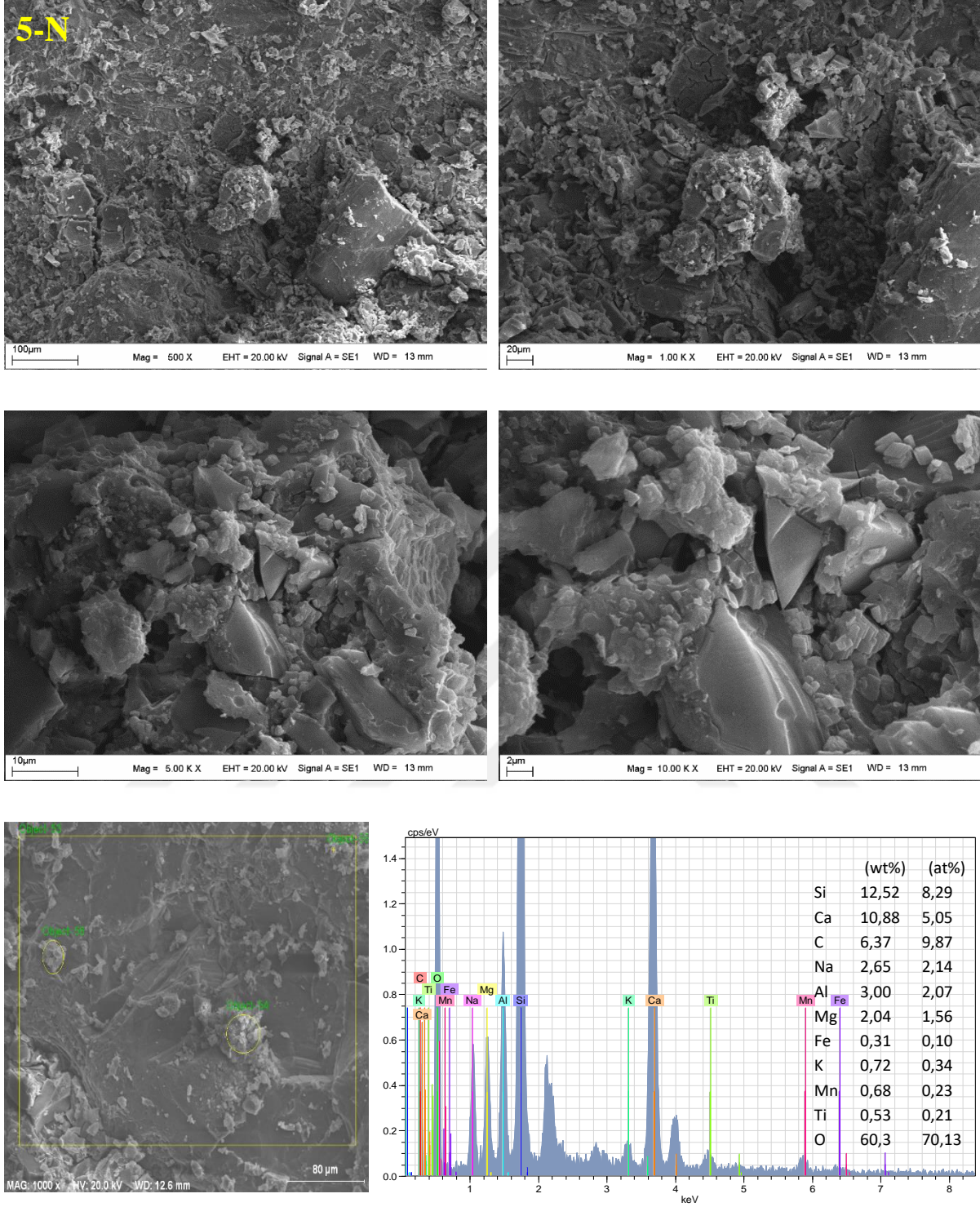
Şekil 4. 50 5-A numunesine ait mikro yapısal gözlemler

Şekil 4.50, laboratuvar koşullarında kür edilen 5. grup numuneye ait mikro yapısal analiz sonuçlarını göstermektedir. Şekil 4.50’de CaCO_3 oluşumuna işaret eden C elementinin düşük atomik yüzdelerde yer aldığı görülmektedir. Bu durum, 5-A grup numunelerde verimli bir kendini onarmanın sağlanamadığını ortaya koymaktadır.



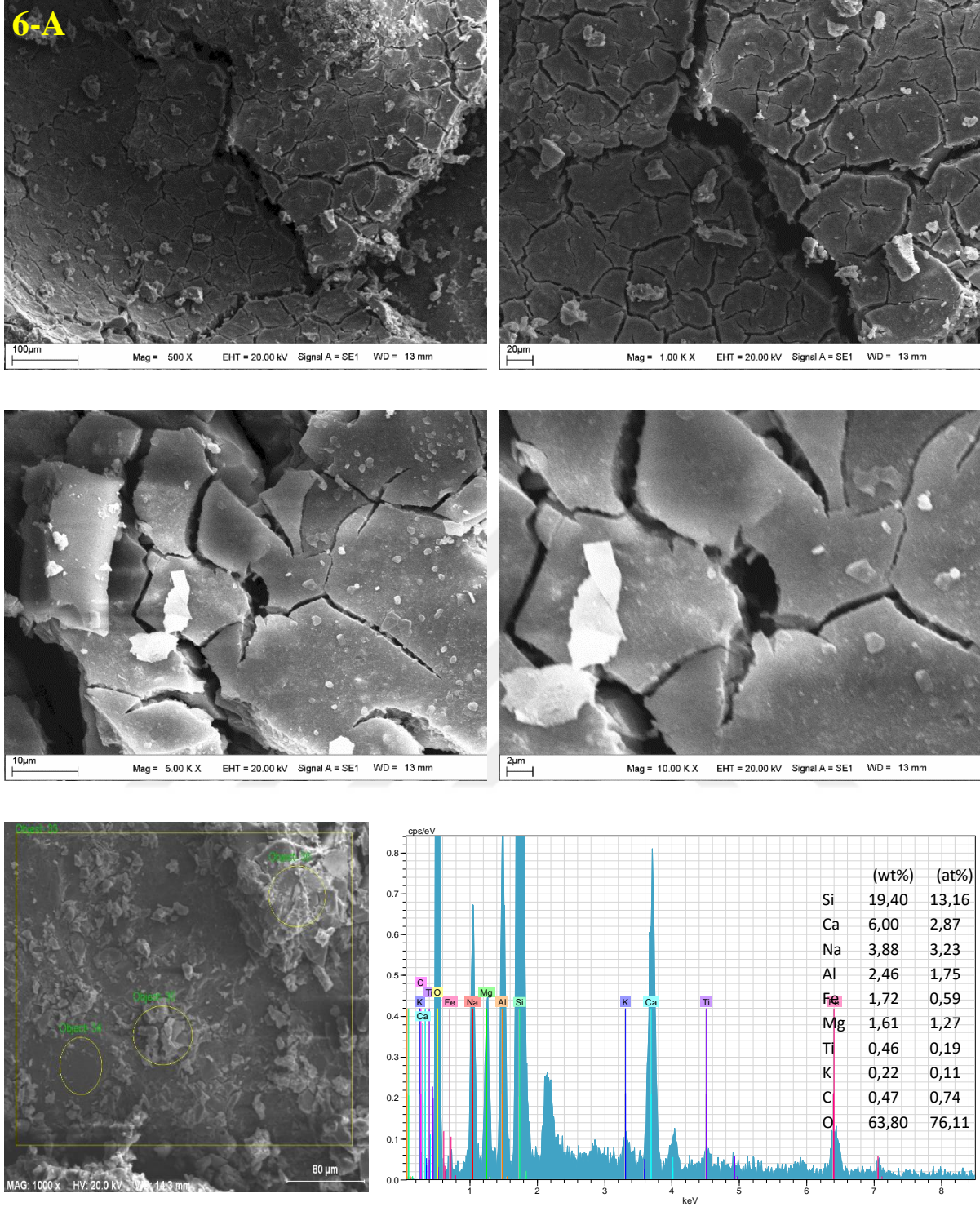
Şekil 4. 51 5-W numunesine ait mikro yapısal gözlemler

Şekil 4.51, suda kür edilen 5. grup numuneye ait mikro yapısal analiz sonuçlarını göstermektedir. Şekil 4.51’de CaCO_3 oluşumuna işaret eden Ca ve C elementlerinin düşük atomik yüzdelerde yer aldığı görülmektedir. Bu durum, 5-W grup numunelerde verimli bir kendini onarmanın sağlanamadığını ortaya koymaktadır.



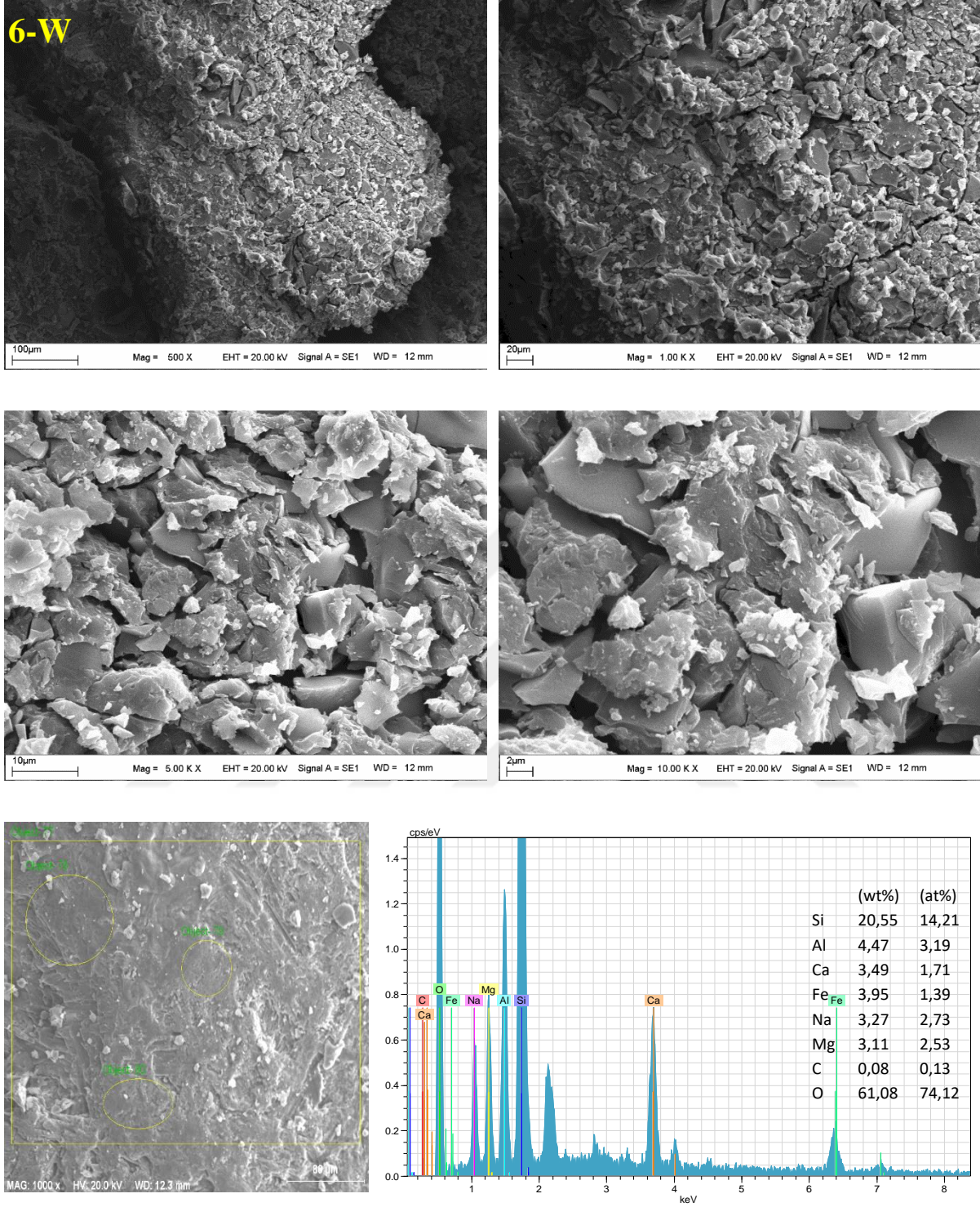
Şekil 4. 52 5-N numunesine ait mikro yapısal gözlemler

Şekil 4.52, çökeltme ortamında kür edilen 5. grup numuneye ait mikro yapısal analiz sonuçlarını göstermektedir. Şekil 4.52’de CaCO_3 oluşumuna işaret eden Ca ve C elementlerinin yüksek atomik yüzdelerde yer aldığı görülmektedir. Bu durum, 5-N grup numunelerde verimli bir kendini onarma mekanizmasının sağlandığını ortaya koymaktadır.



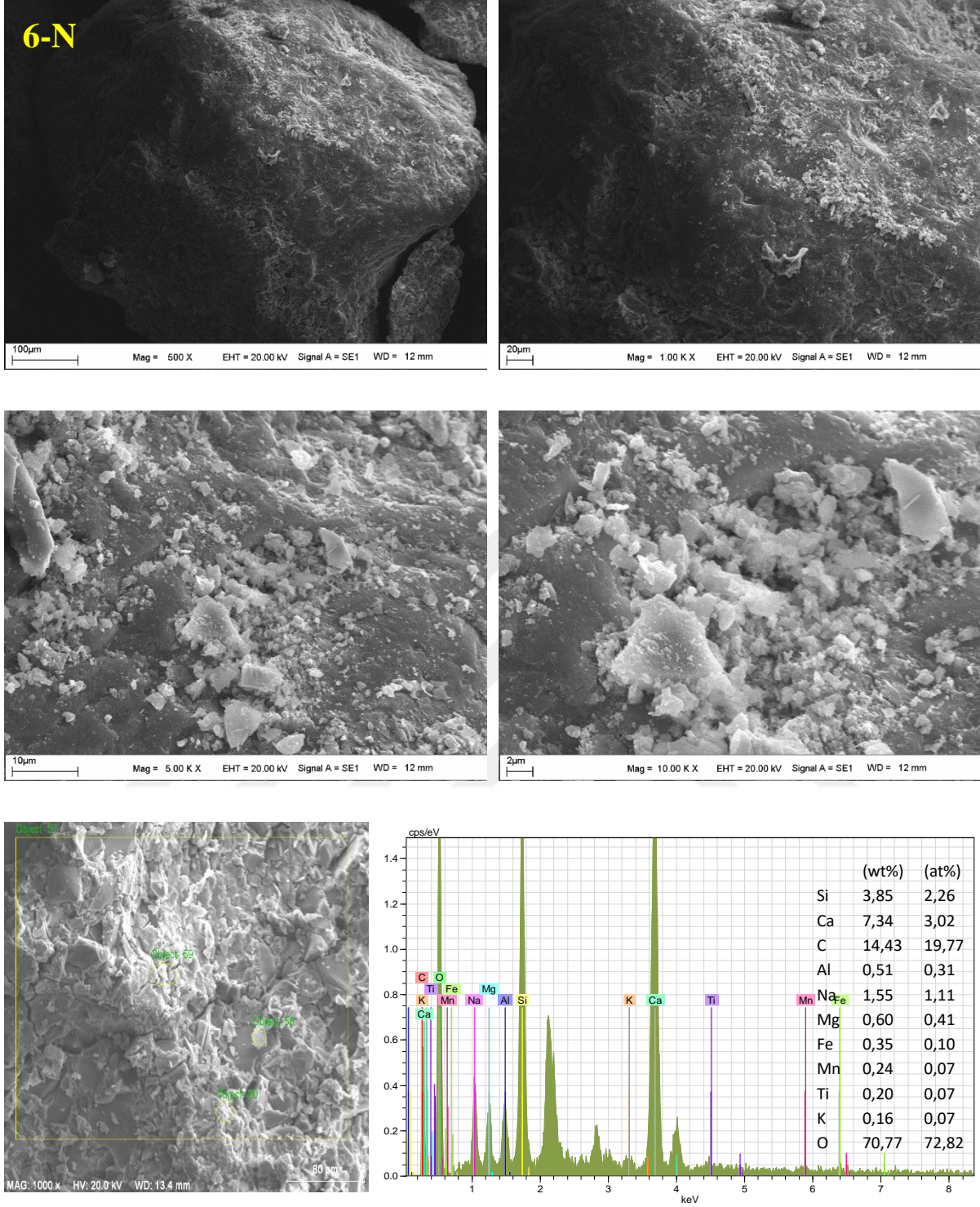
Şekil 4. 53 6-A numunesine ait mikro yapısal gözlemler

Şekil 4.53, laboratuvar koşullarında kür edilen 6. grup numuneye ait mikro yapısal analiz sonuçlarını göstermektedir. Şekil 4.53’de CaCO_3 oluşumuna işaret eden Ca ve C elementlerinin düşük atomik yüzdelerde yer aldığı görülmektedir. Bu durum, 6-A grup numunelerde verimli bir kendini onarmanın sağlanamadığını ortaya koymaktadır.



Şekil 4. 54 6-W numunesine ait mikro yapısal gözlemler

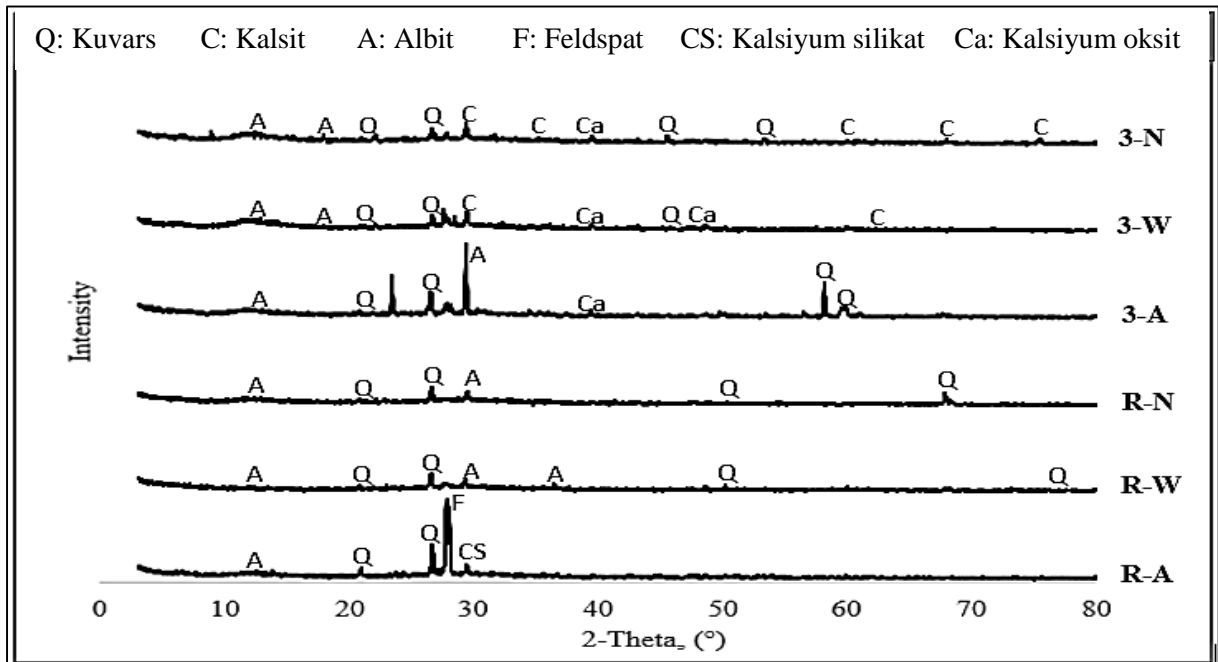
Şekil 4.54, suda kür edilen 6. grup numuneye ait mikro yapısal analiz sonuçlarını göstermektedir. Şekil 4.54’de CaCO_3 oluşumuna işaret eden Ca ve C elementlerinin düşük atomik yüzdelerde yer aldığı görülmektedir. Bu durum, 6-W grup numunelerde verimli bir kendini onarmanın sağlanamadığını ortaya koymaktadır.



Şekil 4. 55 6-N numunesine ait mikro yapısal gözlemler

Şekil 4.55, çökeltme ortamında kür edilen 6. grup numuneye ait mikro yapısal analiz sonuçlarını göstermektedir. Şekil 4.55’de CaCO_3 oluşumuna işaret eden Ca ve C elementlerinin yüksek atomik yüzdelerde yer aldığı görülmektedir. Bu durum, 6-N grup numunelerde verimli bir kendini onarma mekanizmasının sağlandığını ortaya koymaktadır.

Farklı parametrelerle üretilen geopolimer harç numunelerinde kendini onarma mekanizmasının daha detaylı incelenmesi için X-ışını kırınım analizi (XRD) gerçekleştirilmiştir. Numune yüzeylerinde biriken beyaz çökeltilerden ziyade, yüzeyin daha homojen bir şekilde alındığı toz numunelerin XRD analizleri Şekil 4.56'da sunulmuştur. Şekil 4.56'da görüldüğü gibi, geopolimer harç numunelerinde kuvars ve albit gibi ortak fazlar gözlemlenmiştir. Farklı bileşim ve kür tekniklerine sahip geopolimer harç numunelerinde ise feldspat (R-A), CaO (3-W ve 3-A) ve kalsiyum silikat (R-A) fazları gözlenmiştir. Benzer şekilde, geopolimer harç numunelerinde gözlenen albit ve feldspat fazlarının, geopolimer kompozitteki alüminosilikat jellerin N-A-S-H, N-C-A-S-H ve C-A-S-H tipi yapılardan oluştuğunu gösterdiği belirtilen çalışmalar yapılmıştır (Bayati ve Saadabadi, 2021; Çelikten ve diğ., 2019; Türker ve diğ., 2016). Ayrıca, sadece 3-N grubunun XRD analizinde saf kalsite ait $2\theta=29.42^\circ$ ile $2\theta=29.455^\circ$ arasında oldukça yakın olan pikin tespit edilmiş olması, %3 bakteri/bağlayıcı oranı ile üretilen ve çöktürme ortamında kür edilen bu örnek grubunda etkin bir kendini onarma mekanizmasının gerçekleştiğini göstermiştir. Benzer çıkarımlar daha önce yapılan çalışmalarda da yapılmıştır (Harrington, 1927; Khaliq ve Ehsan, 2016). Elde edilen bu bulgular, XRD spektrum sonuçlarının SEM ve EDS analizi sonuçları ile tutarlılık gösterdiğini ortaya çıkarmıştır. Sonuç olarak, araştırılan farklı mekanik ve durabilite deneylerine ek olarak, gerçekleştirilen mikro yapısal analizler de karışıma doğrudan eklenen bakterilerin etkin bir kendini onarma sağlayabilmesi için mutlaka uygun bir kür ortamının (üre ve kalsiyum içeren) var olması gerektiğini kanıtlamıştır.

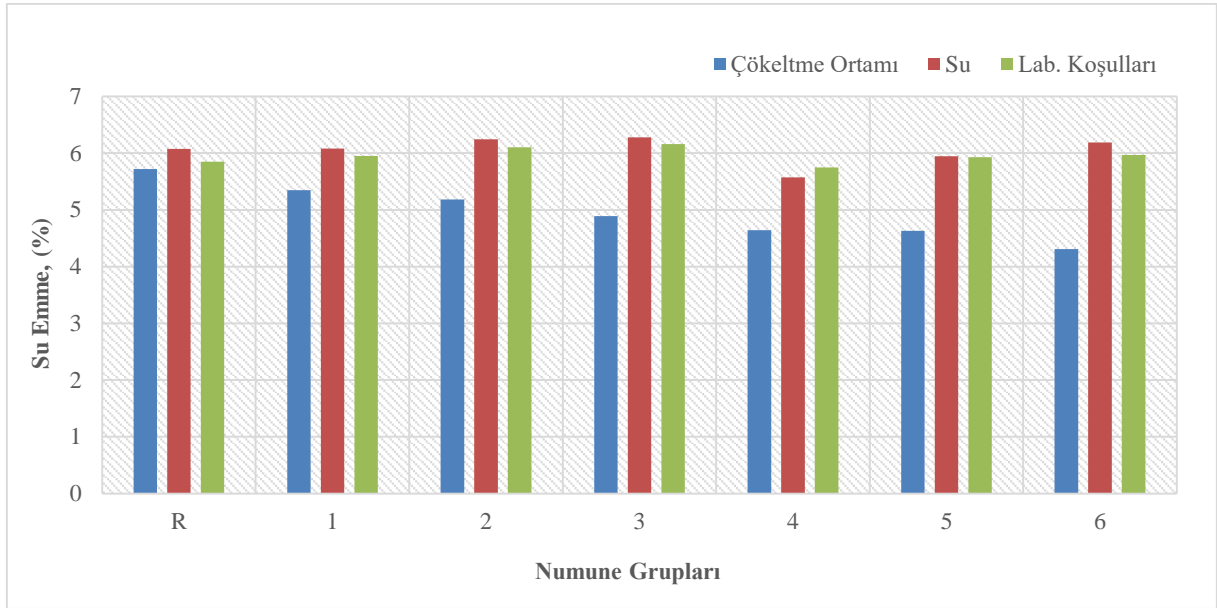


Şekil 4. 56 Geopolimer harç örneklerin XRD analizi

4.2.9. Geopolimer harç örneklerin fiziksel özellikleri

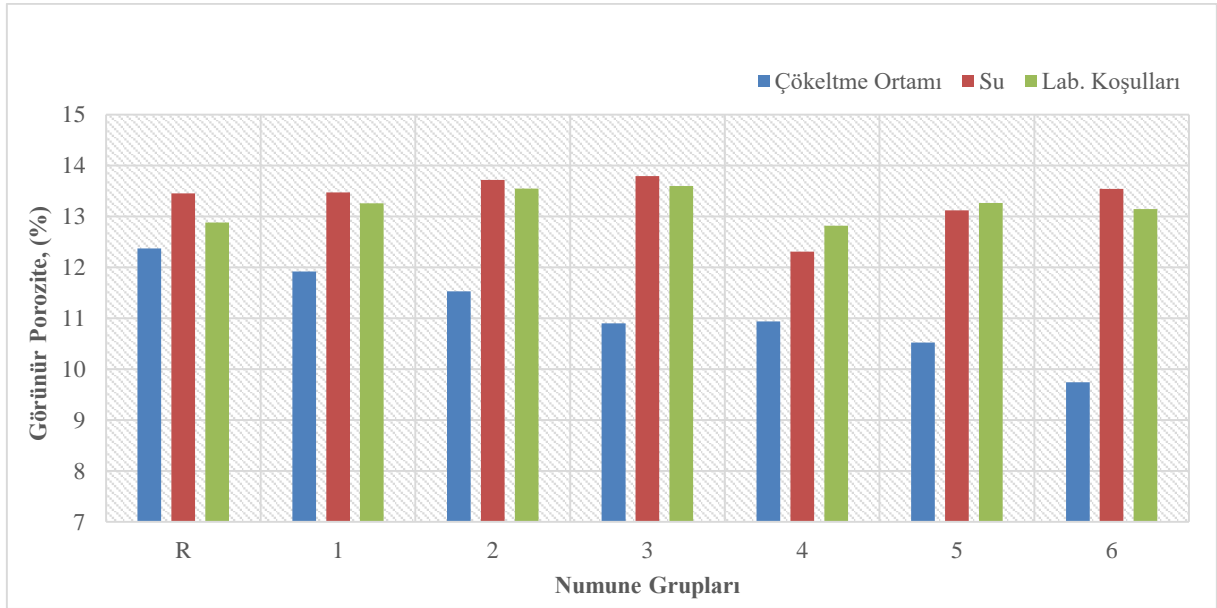
Şekil 4.57 geopolimer harç numunelerin su emme değerlerini göstermektedir. Tüm numune grupları arasında en yüksek su emme değerlerine sahip örnekler 3-W grubu (% 6.24) olurken, en düşük su emme değerleri ise 6-N grubu (% 4.3) numunelerden elde edilmiştir. Çökeltme ortamında kür edilen örnekler için, en yüksek su emme değerleri referans örneklerden elde edilirken, bakteri/bağlayıcı oranında yaşanan artış su emme değerlerinde belirgin azalmalara yol açmıştır. Şöyle ki, bakteri/bağlayıcı oranının %1'den %3'e yükselmesiyle, 10^9 CFU/mL konsantrasyona sahip numune gruplarının su emme değerleri yaklaşık %8,6 oranında azalmıştır. Bakteri/bağlayıcı oranındaki bu artış, 10^7 CFU/mL konsantrasyona sahip numune gruplarının su emme değerlerinde ise yaklaşık %7.25 oranında azalmaya neden olmuştur. Benzer şekilde, daha önce yapılan bir çalışmada, üre ve kalsiyum klorür içeren kür ortamına maruz bırakılan örneklerin daha iyi durabilite performanslarına sahip oldukları gözlenmiştir (Ramakrishnan ve diğ, 2005).

Ancak, bakteri/bağlayıcı oranında yaşanan artışın su emme değerlerini azalttığı yönündeki bulguların sadece çökeltme ortamında kür edilen numuneler için geçerli olduğunu belirtmek gerekmektedir. Su ve laboratuvar koşullarında kür edilen bakterili örneklerde, çökeltme ortamında kür edilen örneklerin aksine bakteri/bağlayıcı oranının artması su emme değerlerinde belirli oranlarda artışlara yol açmıştır. Şöyle ki, laboratuvar koşullarında kür edilen 10^9 CFU/mL konsantrasyona sahip numune gruplarında bakteri/bağlayıcı oranının %1'den %3'e yükselmesi su emme değerlerini yaklaşık %3,5 oranında arttırırken, 10^7 CFU/mL konsantrasyona sahip numune gruplarında bakteri/bağlayıcı oranının %1'den %3'e yükselmesi ise su emme değerlerine yaklaşık % 4 oranında artışa sebep olmuştur. Benzer şekilde, suda kür edilen örnekler için, bakteri/bağlayıcı oranının %1'den %3'e yükselmesi 10^9 CFU/mL konsantrasyona sahip numune gruplarının su emme değerlerini yaklaşık %3.2 oranında arttırırken, 10^7 CFU/mL konsantrasyona sahip numune gruplarının su emme değerlerinde ise yaklaşık %11 oranında artış gözlenmiştir. Sonuçlar, ayrıca, Bahsedilen bu onarım mekanizmasının sağlanması için ortamda birlikte var olması gereken bakteri, üre ve kalsiyum bileşenlerinin bir arada sağlandığı çökeltme ortamında kür edilen bakterili örneklerin (6-N) su emme değerlerinin, suda (6-W) ve laboratuvar koşullarında (6-A) kür edilen örneklere kıyasla sırasıyla yaklaşık %30 ve %28 oranında azaldığını göstermiştir. Bu dramatik düşüşler, diğer bakterili örneklerin su emme değerlerinde de gözlenmiştir.



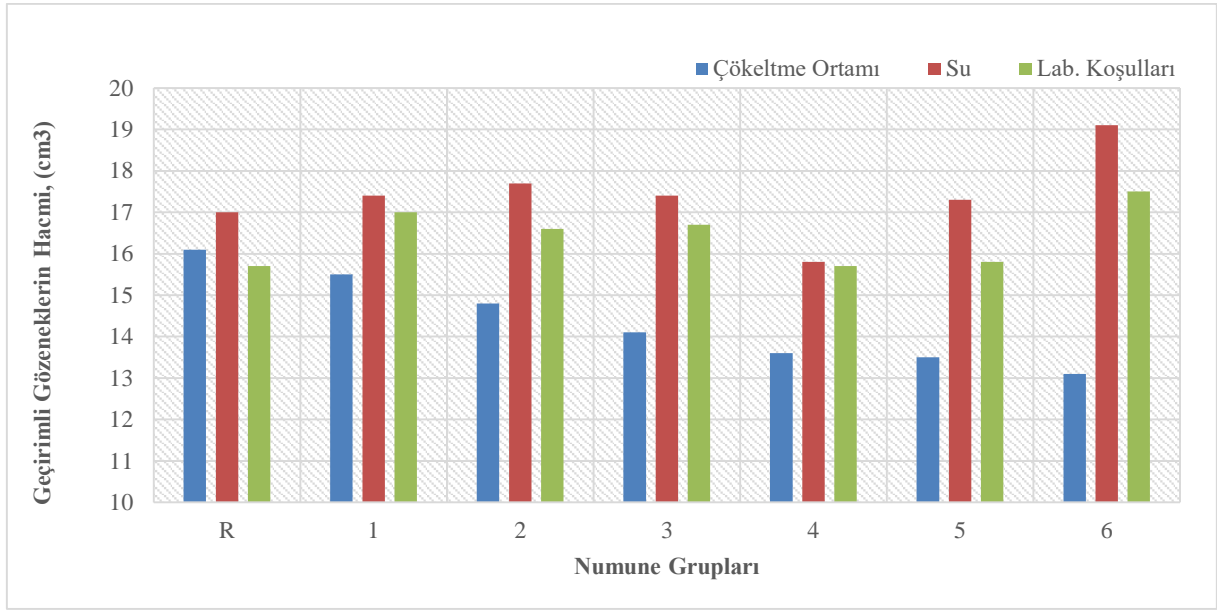
Şekil 4. 57 Geopolimer harç numunelerinin su emme değerleri

Şekil 4.58, geopolimer harç örneklerin görünür porozite değerlerine farklı konsantrasyon ve dozajlarda bakteri ilavesi ile uygulanan kür rejiminin etkisini göstermektedir. Şekil 4.58, geopolimer harç numunelerinin görünür porozite değerlerinin yaklaşık %9,7 (6-N) ile %13,8 (3-W) arasında değişiklik gösterdiğini ortaya çıkarmıştır. Tüm numune gruplarında, çökeltme ortamında kür tekniğinin en düşük görünür porozite değerleri ile sonuçlandığı tespit edilmiştir. Ayrıca, 4. ve 5. grup numuneleri dışında en yüksek görünür porozite değerleri ise suda kür edilen örneklerden elde edilmiştir. Şekil 4.58'den görüleceği gibi, bakterili örneklerin görünür porozite değerleri üzerinde örneklere uygulanan kür rejiminin etkisi çok büyüktür. Örneğin, 10^7 CFU/mL konsantrasyona sahip olan %3 bakteri/bağlayıcı oranında üretilen numunelerin çökeltme ortamında kür edilmesi sonucu elde edilen görünür porozite değerleri, suda kür edilen benzerlerine göre yaklaşık %28 oranında azalmıştır. Benzer azalmalar, diğer tüm numune gruplarında da görülmüştür. Ek olarak, su emme deneyi sonrasında elde edilen bulgulara benzer şekilde, bakteri/bağlayıcı oranının artması, çökeltme ortamında kür edilen numunelerin görünür porozite değerlerinde belirgin düşüslere yol açmıştır. Bakteri/bağlayıcı oranının %1'den %3'e yükselmesi 10^9 CFU/mL konsantrasyona sahip numune gruplarının görünür porozite değerlerini yaklaşık %8.5 oranında azaltırken, 10^7 CFU/mL konsantrasyona sahip numune grupları için bu azalma değerleri ise yaklaşık %11 oranında olmuştur.



Şekil 4. 58 Geopolimer harç örneklerin görünür porozite değerleri

Şekil 4.59 geopolimer harç örneklerin geçirimli gözenek hacimlerine farklı konsantrasyon ve dozajlarda bakteri ilavesi ile uygulanan kür rejiminin etkilerini sunmaktadır. Şekil 4.59'dan görüleceği gibi geopolimer harç örneklerinin geçirimli gözeneklerin hacimleri %13,1 (6-N) ile %19,1 (6-W) arasında değişiklik göstermektedir. Maksimum ve minimum geçirimli gözenek hacmi değerlerinin farklı ortamlarda kür edilen aynı grup numunelerden elde edilmesi, kendini onaran geopolimer harç üretiminde uygulanan kür rejiminin geçirimlilik özellikleri üzerinde ne kadar büyük bir etkisi olduğunu gözler önüne sermektedir. Su emme ve görünür porozite deneylerinde elde edilen bulgulara benzer olarak, en düşük geçirimli gözenek hacimleri çökeltme ortamında kür edilen bakterili örnek gruplarından elde edilmiştir. Ayrıca, çökeltme ortamında kür edilen örneklerde bakteri/bağlayıcı oranının artmasıyla geçirimli gözeneklerin hacimleri oldukça azalmıştır. Bakteri/bağlayıcı oranının %1'den %3'e yükselmesi 10^9 CFU/mL konsantrasyona sahip numune gruplarının geçirimli gözenek hacimleri yaklaşık %9 oranında azalırken, 10^7 CFU/mL konsantrasyona sahip numune grupları için bu azalma değerleri ise yaklaşık %3,7 oranında meydana gelmiştir. Çökeltme ortamında kür edilen örneklerin aksine, su ve laboratuvar koşullarında bekletilen örneklerin geçirimli gözenek hacim değerlerinde bakteri/bağlayıcı oranının artması ile herhangi bir azalma gözlenmemiştir. Hatta 10^7 CFU/mL konsantrasyona sahip olan ve suda kür edilen numune gruplarında bakteri/bağlayıcı oranı %1'den %3'e yükselmesi geçirimli gözeneklerin hacim değerlerinin yaklaşık %21 oranında azalmasına neden olurken, havada kür edilen bu örnek gruplarında bakteri/bağlayıcı oranındaki artış geçirimli gözeneklerin hacimlerini yaklaşık %11 oranında azaltmıştır.



Şekil 4. 59 Geopolimer harç örneklerinin geçirimli gözeneklerin hacmi

5. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında *Bacillus subtilis* kullanılarak üretilen kendini onaran geopolimer hamur ve harç numunelerin çeşitli performans değerleri detaylı bir şekilde araştırılmıştır. Farklı bakteri konsantrasyonları, bakteri/bağlayıcı oranları ve uygulanan farklı kür ortamlarının geopolimer hamur ve harç örneklerin taze ve sertleşmiş birçok özelliğine etkisinin incelendiği bu tez çalışmasından elde edilen bulgular aşağıdaki gibi özetlenebilir;

- Geopolimer hamur örneklerinde, kullanılan bakteri konsantrasyonlarından bağımsız olarak, en yüksek basınç dayanımı değerleri %1 bakteri/bağlayıcı oranı kullanımıyla elde edilmiştir. Deneysel bulgular, ayrıca, bakterilerin 7 günlük basınç dayanımına olan etkisinin 28 günlük basınç dayanımlarına olan etkilerinden daha az olduğunu göstermiştir.
- Geopolimer hamur numunelerin basınç dayanımı değerlerine bakteri konsantrasyonunun etkisi incelendiğinde; 28 günlük basınç dayanımı değerleri için 10^9 CFU/mL konsantrasyonuna sahip örnekler üzerinde genel olarak daha yüksek basınç dayanımı değerlerinin gözlemlendiği belirlenmiştir.
- Uygulanan kür rejiminin geopolimer hamur numunelerin basınç dayanımı değerlerine bakteri konsantrasyonunun etkisi incelendiğinde ise; laboratuvar koşullarında kür yönteminin gerek bakteri ilave edilmiş örneklerde gerekse referans örneklerde çok düşük basınç dayanımı değerlerine yol açtığı gözlemlenmiştir. 7 ve 28 gün arasında gözlenen en yüksek basınç dayanımı gelişimi %47'lik bir oranla, çökeltme ortamında kür edilmiş, 10^9 CFU/mL konsantrasyonuna sahip, %1 bakteri / bağlayıcı oranında üretilen 1-N grubundan elde edilmiştir. Öte yandan, referans örneklerin çökeltme ortamı ve laboratuvar ortamında kür edilmesi 7 günlük basınç dayanımlarına göre sırasıyla %26 ve %24'lük azalmalara neden olurken, su içerisinde kür edilen referans örneklerin basınç dayanımlarının 7 günlük basınç dayanımına göre %3 oranında arttığı tespit edilmiştir.
- Bakteri ilavesi geopolimer hamur numunelerinin viskozite değerlerinde azalmaya neden olurken, yayılma çaplarının da artmasına yol açmıştır. Referans örnekler en yüksek viskozite değerlerine ve en düşük yayılma çaplarına sahip olan örnekler olarak karşımıza çıkmıştır.

- Bakteri ilavesinin geopolimerizasyon kinetiği özelliklerine etkisi incelendiğinde; açığa çıkan en yüksek ısı miktarının bakteri kullanılmadan üretilen referans geopolimer hamur örneklerinden elde edildiği saptanmıştır.
- Tüm örneklerin geopolimerizasyon ısı grafiklerinde iki ana pik değeri gözlenirken, ilk pik değerlerinin karıştırma işlemi takip eden ilk bir saat içerisinde, ikinci pik noktasının da 8 ila 19 saat arasında gözlemlendiği belirlenmiştir. Bakteri ilavesinin ikinci pik oluşum süresini önemli ölçüde geciktirdiği saptanmıştır.
- Kendini onarma kapasitesinin mikroskop yardımıyla incelenmesinde; bakteri veya bakteri + besin ilave edilip çökeltme ortamında kür edilen geopolimer hamur örneklerinde çatlakların %100 oranında kapandığı gözlenmiştir. Bunun yanı sıra, bakteri + besin ilave edilen ve suda kür edilen örneklerde ise nispeten daha düşük oranlarda iyileşme gözlemlendiği belirlenmiştir. Yapılan gözlemler, ayrıca, bakteri ilave edilen ve suda kür edilen geopolimer hamur örneklerde ise herhangi bir iyileşme gözlenmediğini gözler önüne sermiştir.
- Gerçekleştirilen mikroyapı analizleri, ön deneylerde çatlak onarım performansı açısından pozitif beklentilerin yapıldığı geopolimer hamur örneklerin tümünde CaCO_3 oluşumuna işaret eden üç ana elementin (Ca, C ve O) yüksek oranlarda mevcut olduğunu ortaya çıkarmıştır.
- Ayrıca, mikroskobik gözlemler ve mikro yapı analizleri çatlak onarım performansı açısından ön deneylerde yapılan pozitif ve negatif beklentilerin %100 doğrulukla gerçekleştiğini ortaya çıkarmıştır.
- Gerçekleştirilen fiziksel ölçümler, geopolimer hamur numunelerinde elde edilen en düşük su emme değerinin 10^7 CFU/mL konsantrasyona sahip, %3 bakteri/bağlayıcı oranı ile üretilen ve çökeltme ortamında kür edilen gruptan (6-N) %6,45 oranında elde edildiğini göstermektedir. Ayrıca, çökeltme ortamında kür edilen numunelerde bakteri/bağlayıcı oranındaki artışın su emme değerlerinde azalmalara neden olduğu gözlenmiştir.
- Su emme deney sonuçlarına paralel olarak, en düşük görünür gözeneklilik ve geçirimli gözeneklilik hacim değeri ise 10^7 CFU/mL konsantrasyona sahip, % 3 bakteri/bağlayıcı oranı ile üretilen ve çökeltme ortamında kür edilen gruptan (6-N) elde edilmiştir.

- Geopolimer harç numunelerin basınç dayanımları incelendiğinde; bakteri/bağlayıcı oranının %1'den %3'e çıkması 7 günlük basınç dayanımı değerlerini azaltırken, çökeltme ortamında kür edilen ve bakteri ilave edilmiş örneklerin 28 günlük basınç dayanımı değerlerini ise önemli ölçüde arttırmıştır. Çökeltme ortamında kür edilen geopolimer harç örneklerde en yüksek basınç dayanımı değerleri 61,2 MPa ile 6. grup (10^7 CFU/mL ve bakteri/bağlayıcı oranı %3) numunelerden elde edilirken, en düşük basınç dayanımı değerleri ise referans (R) örneklerden elde edilmiştir.
- Geopolimer harç örneklerin basınç dayanımı sonuçları, en yüksek mekanik performansın 10^7 CFU/mL konsantrasyona sahip bakteri kültürü kullanılarak üretilen numunelerden gözlemlendiğini ortaya çıkarmıştır.
- Geopolimer hamur örneklerle benzer şekilde, geopolimer harç örneklerin basınç dayanımı değerlerinde de en kötü sonuçlar laboratuvar koşullarında kür yönteminden elde edilmiştir. Şöyle ki, laboratuvar koşullarında kür edilen referans geopolimer harç örneklerin basınç dayanımı değerlerine nazaran, suda kür edilen referans örneklerin basınç dayanımı %96, çökeltme ortamında kür edilen referans örneklerin basınç dayanımı ise yaklaşık %86 oranında artmıştır. Bu sonuçlar, YFC kullanılarak üretilen ve Na_2SiO_3 ile aktive edilen geopolimer örneklerin kür şartlarında mutlaka suyun bulunması gerektiğini gözler önüne sermektedir.
- Bakteri kullanılarak üretilen geopolimer harç numunelerinde bakteri/bağlayıcı oranı ve bakteri konsantrasyonundan bağımsız olarak en yüksek basınç dayanımı değerlerinin çökeltme ortamında kür yöntemi ile sağlanmıştır. Bu durumun ise meydana gelen çatlak ve boşlukların CaCO_3 çökeltmesi yoluyla kapatılmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.
- Çökeltme ortamında kür edilen geopolimer harç örneklerinde bakteri/bağlayıcı oranında yaşanan artış elektriksel özdirenç değerlerini yaklaşık %60 oranında arttırmıştır. Ayrıca, %2 bakteri/bağlayıcı oranı kullanılarak üretilen ve çökeltme ortamında kür edilen geopolimer harç numunelerinin (5-N) elektriksel özdirenç değerleri aynı ortamda kür edilen referans örneklerle kıyasla yaklaşık %119 oranında artmıştır.
- Basınç dayanımı sonuçlarına paralel olarak, bakteri konsantrasyonunun 10^9 CFU/mL'den 10^7 CFU/mL değerine düşmesi elektriksel özdirenç değerlerini önemli ölçüde arttırdığı gözlemlenmiştir.

- Çökeltme ortamında kür edilen ve bakteri kullanılarak üretilen geopolimer harç örneklerin elektriksel özdirenç değerleri laboratuvar koşullarında kür edilen benzerlerine göre önemli ölçüde artışlar (%238'e varan) göstermiştir.
- En yüksek yarmada çekme dayanımı değerleri çökeltme ortamında kür edilen geopolimer harç örneklerinden elde edilirken, en düşük değerler ise laboratuvar koşullarında kür edilen numunelerde gözlenmiştir.
- Sülfat etkisine maruz bırakılmış geopolimer harç numunelerinde en yüksek basınç dayanımı sonuçları bakteri konsantrasyonundan bağımsız bir şekilde çökeltme ortamında kür edilmiş ve %3 bakteri/bağlayıcı oranı kullanılarak üretilmiş numunelerde (3-N ve 6-N) gözlenmiştir. Ayrıca, tüm geopolimer harç numuneleri için, 28 günlük sülfat etkisi sonucunda basınç dayanımı değerlerinde bir miktar artışlar gözlenmiştir.
- Sülfat etkisi sonucunda meydana gelen en düşük ağırlık kayıplarının çökeltme ortamında kür edilen bakteri ilave edilmiş geopolimer harç numunelerinden elde edilirken, en yüksek kayıpların ise laboratuvar koşullarında kür edilen numunelerde gözlemlendiği belirlenmiştir.
- Rebaunt testi yardımıyla gerçekleştirilen darbe dayanıklılığı testi sonucunda; en düşük enerji emme kapasitesi çökeltme ortamında kür edilen referans örneklerden (R-N) elde edilirken, en yüksek enerji emme kapasitesi ise 10^9 CFU/mL konsantrasyona sahip, bakteri/bağlayıcı oranı %1 olan ve laboratuvar koşullarında kür edilen 1-A grubu örneklerden elde edilmiştir.
- En düşük kılcal su emme katsayısı değerleri %2 bakteri/bağlayıcı oranı kullanılarak üretilen ve çökeltme ortamında kür edilen (2-N ve 5-N) örneklerden elde edilirken, en yüksek kılcal su emme katsayısı değerleri ise laboratuvar koşullarında kür edilen (R-A ve 6-A) geopolimer harç numunelerinden elde edilmiştir.
- Ayrıca 5, 15, 30, 60, 480, 960 ve 1440. dakikalarda ölçümü gerçekleştirilen kılcal su emme katsayısının belirlenmesi ile ilgili veriler, geopolimer harç numunesinin bünyesine kapiler yolla giriş sağlayan su miktarının çok büyük bir bölümünün ilk 1 saat içerisinde nüfuz ettiğini göstermiştir.
- Geopolimer harç örneklerin mikro yapısal analizleri, laboratuvar koşullarında kür edilen numunelerde belirgin mikro çatlakların varlığını göstermiştir. Öte yandan, kendini onarma yeteneği gösterebilen, bakteri ilave edilen ve çökeltme ortamında

kür edilmiş numune gruplarının tümünde SEM gözlemleri ile CaCO₃ oluşumu gözlenmiştir. Ayrıca, gerçekleştirilen EDS analizleri ile de bu numune gruplarında CaCO₃ oluşumuna işaret eden üç ana elementin (Ca, C ve O) yüksek oranlarda bulunduğu belirlenmiştir. Benzer şekilde, XRD analizleri de kendini onarma yeteneği gösterebilen örnek gruplarında belirgin CaCO₃ piklerinin varlığını doğrulamıştır.

- Geopolimer harç örnekleri arasında en yüksek su emme değerine sahip numune grubu 3-W olarak karşımıza çıkarken, en düşük su emme değerlerinin ise 6-N grubu örneklerden elde edildiği belirlenmiştir. Görünür porozite ve geçirimli gözeneklerin hacimleri değerlerinin de su emme sonuçları ile paralellik gösterdiği gözlenmiştir.

Bakteri ilavesinin geopolimer hamur ve harç örnekleri üzerinde; geopolimerizasyon kinetiği, viskozite değerleri, ve çeşitli durabilite özellikleri üzerine etkileri ilk kez detaylı olarak bu tez çalışmasında gerçekleştirilmiştir. Karışımlara direkt olarak ilave edilen bakteri kültürlerinin kendini onarma mekanizmasını gerçekleştirebilmesi için mutlaka uygun bir kür ortamına (ek kalsiyum kaynağı ve üre içeren kür ortamı) ihtiyaç duyduğu da birçok deney sonucunda belirtilmiştir. Bu anlamda, gelecekte yapılacak çalışmalarda;

- Farklı bakteri türlerinin geopolimer kompozitler üzerinde etkilerinin incelenmesi,
- Farklı bakteri türlerinin farklı yöntemlerle immobilizasyon ve enkapsülasyon işlemlerinin tamamlanarak karışıma dahil edilmesi ve böylece herhangi bir kür ortamına ihtiyaç duymadan kendini onarma sisteminin sağlanması önerilmektedir.

Yapılacak bu girişimler sayesinde, geleneksel Portland çimentosunda meydana gelen, hidrate olmayan çimento parçacıklarının sürekli hidratasyonu gibi otojen kendi kendini iyileştirmenin mümkün olmadığı geopolimer kompozitlerde hayati önem taşıyan bir onarım sisteminin uygulanabilirliği mümkün olacaktır.

KAYNAKLAR

- Abdelmonem, A., El-Feky, M. S., Nasr, E. S. A., & Kohail, M.** (2019). Performance of high strength concrete containing recycled rubber. *Construction and Building Materials*, 227, 116660.
- Abdul Rahim, R. H., Rahmiati, T., Azizli, K. A., Man, Z., Nuruddin, M. F., & Ismail, L.** (2015). Comparison of using NaOH and KOH activated fly ash-based geopolymer on the mechanical properties. In *Materials science forum* (Vol. 803, pp. 179-184). Trans Tech Publications Ltd.
- ACI Committee 201.** "Guide to Durable Concrete", ACI 201.2R-92 (Reapproved 1997) Manual of Concrete Practice, vol. 1. 41 pp
- Aleem, M. A., & Arumairaj, P. D.** (2012). Geopolymer concrete—a review. *International Journal Of Engineering Sciences & Emerging Technologies*, 1(2), 118-122.
- Allahverdi, A., Mehrpour, K., & Kani, E. N.** (2008). Investigating the possibility of utilizing pumice-type natural pozzonal in production of geopolymer cement. *Ceramics Silikat*, 52(1), 16.
- Al-Zboon, K. K., Al-smadi, B. M., & Al-Khawaldh, S.** (2016). Natural volcanic tuff-based geopolymer for Zn removal: adsorption isotherm, kinetic, and thermodynamic study. *Water, Air, & Soil Pollution*, 227(7), 1-22.
- Ameri, F., Shoaie, P., Bahrami, N., Vaezi, M., & Ozbakkaloglu, T.** (2019). Optimum rice husk ash content and bacterial concentration in self-compacting concrete. *Construction and Building Materials*, 222, 796-813.
- Amran, Y. M., Alyousef, R., Alabduljabbar, H., & El-Zeadani, M.** (2020). Clean production and properties of geopolymer concrete; A review. *Journal of Cleaner Production*, 251, 119679.
- Ananthayya, M. B., & WP, P. K.** (2014). Effect of partial replacement of sand by iron ore tailing (IOT) and cement by ground granulated blast furnace slag (GGBFS) on the compressive strength of concrete. *Esrta Publications*, 3(8), 192-197.
- Andalib, R., Abd Majid, M. Z., Hussin, M. W., Ponraj, M., Keyvanfar, A., Mirza, J., & Lee, H. S.** (2016). Optimum concentration of Bacillus megaterium for strengthening structural concrete. *Construction and Building Materials*, 118, 180-193.

- Arjunan, P., Silsbee, M. R., & Roy, D. M.** (2001). Chemical Activation of Low Calcium Fly Ash Part II: Effect of Mineralogical Composition on Alkali Activation. *Center for Applied Energy Research*, 1-8.
- ASTM C109** ASTM, C. (2016). Standard test method for compressive strength of hydraulic cement mortars (using 2-in. or [50-mm] cube specimens). Annual Book of ASTM Standards, 4.
- ASTM C1585-13**. Standard Test Method for Measurement of Rate of Absorption of Water by Hydraulic-Cement Concretes, Annual Book of ASTM Standards.
- ASTM C186-17**, Standard Test Method for Heat of Hydration of Hydraulic Cement (Withdrawn 2019), ASTM International, West Conshohocken, PA, 2017, www.astm.org
- ASTM, A. C496/C496M-11** (2007). Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens, ASTM International, West Conshohocken, Pennsylvania, USA.
- ASTM C642-06**, Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2013, www.astm.org.
- ASTM C989 / C989M-18a**, Standard Specification for Slag Cement for Use in Concrete and Mortars, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2018, www.astm.org
- Azima, M., & Bundur, Z. B.** (2019). Influence of *Sporasarcina pasteurii* cells on rheological properties of cement paste. *Construction and Building Materials*, 225, 1086-1097.
- Baradan, B., & Aydın, S.** (2013). Betonun Durabilitesi (Dayanıklılık, Kalıcılık). Beton 2013 Hazır Beton Kongresi, 265-288.
- Baradan, B., Yazıcı, H., Aydın S.** (2012). Beton. Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Yayınları, İzmir.
- Baradan, B., Yazıcı, H., & Ün, H.** (2002). Betonarme yapılarda kalıcılık (Durabilite). Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Yayınları, İzmir.

- Baradan, B., Yazıcı, H., & Ün, H.** (2010). Beton ve betonarme yapılarda kalıcılık (Durabilite). Türkiye Hazır Beton Birliği, s. 38-39.
- Bayati, M., & Saadabadi, L. A.** (2021). Efficiency of bacteria based self-healing method in alkali-activated slag (AAS) mortars. *Journal of Building Engineering*, 42, 102492.
- Birhanli, E., Boran, F., Yeşilada, Ö., & Özdemir, S.** A Study On The Color Removal Of Different Foron Dyes By Using Thermofilic And Mesophilic Bacillus Species. *İnönü Üniversitesi Sağlık Hizmetleri Meslek Yüksek Okulu Dergisi*, 8(1), 101-110.
- Bouziani, T., & Benmounah, A.** (2013). Correlation between v-funnel and mini-slump test results with viscosity. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 17(1), 173-178.
- Buller, A. S., Buller, A. M., Ali, T., Tunio, Z. A., Shabbir, S., & Malik, M. A.** (2021). Experimental Characterization of Bacterial Concrete Against Mechanical and Durability Performance. *Engineering, Technology & Applied Science Research*, 11(1), 6703-6707.
- Bundur, Z. B., Amiri, A., Ersan, Y. C., Boon, N., & De Belie, N.** (2017). Impact of air entraining admixtures on biogenic calcium carbonate precipitation and bacterial viability. *Cement and Concrete Research*, 98, 44-49.
- Bundur, Z. B., Ferron, R., & Kirisits, M. J.** (2015). Biyomineralizasyonun Çimento Esaslı Malzemelerin Performansına Olan Etkisinin Araştırılması. *Ulusal Beton Kongresi*, 16-18.
- Bundur, Z. B., Kirisits, M. J., & Ferron, R. D.** (2015). Biomineralized cement-based materials: Impact of inoculating vegetative bacterial cells on hydration and strength. *Cement and Concrete Research*, 67, 237-245.
- Chahal, N., Siddique, R., & Rajor, A.** (2012). Influence of bacteria on the compressive strength, water absorption and rapid chloride permeability of concrete incorporating silica fume. *Construction and Building Materials*, 37, 645-651.
- Chahal, N., Siddique, R., & Rajor, A.** (2012). Influence of bacteria on the compressive strength, water absorption and rapid chloride permeability of fly ash concrete. *Construction and Building Materials*, 28(1), 351-356.

- Cheng, T. W., & Chiu, J. P.** (2003). Fire-resistant geopolymer produced by granulated blast furnace slag. *Minerals Engineering*, 16(3), 205-210.
- Chithambar Ganesh, A., Muthukannan, M., Malathy, R., & Ramesh Babu, C.** (2019). An experimental study on effects of bacterial strain combination in fibre concrete and self-healing efficiency. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 23(10), 4368-4377.
- Cohn, F. (1872).** Grundzuge einer neuen natuerlichen Anordnung der Kryptogamischen Pflanzen. *Jahrb. Schles. Ges. Vaterl. Kult.*, 49, 83-89.
- Çelikten, S., Saridemir, M., & Deneme, İ. Ö.** (2019). Mechanical and microstructural properties of alkali-activated slag and slag+ fly ash mortars exposed to high temperature. *Construction and Building Materials*, 217, 50-61.
- Davidovits, J.** (1999). Chemistry of geopolymeric systems, terminology. In *Geopolymer* (Vol. 99, No. 292, pp. 9-39). sn.
- Davidovits, J.** (2008). *Geopolymer Chemistry and Applications*. Institut Géopolymère, Saint-Quentin, France.
- De Belie, N., Gruyaert, E., Al-Tabbaa, A., Antonaci, P., Baera, C., Bajare, D., ... & Jonkers, H. M.** (2018). A review of self-healing concrete for damage management of structures. *Advanced materials interfaces*, 5(17), 1800074.
- De Muynck, W., Debrouwer, D., De Belie, N., & Verstraete, W.** (2008). Bacterial carbonate precipitation improves the durability of cementitious materials. *Cement and Concrete Research*, 38(7), 1005-1014.
- De Rooij, M., Van Tittelboom, K., De Belie, N., & Schlangen, E. (Eds.).** (2013). *Self-healing phenomena in cement-Based materials: state-of-the-art report of RILEM technical committee 221-SHC: self-Healing phenomena in cement-Based materials* (Vol. 11). Springer Science & Business Media.
- Dry, C. M.** (2000). Three designs for the internal release of sealants, adhesives, and waterproofing chemicals into concrete to reduce permeability. *Cement and Concrete Research*, 30(12), 1969-1977.
- Duxson, P., Fernández-Jiménez, A., Provis, J. L., Lukey, G. C., Palomo, A., & van Deventer, J. S.** (2007). Geopolymer technology: the current state of the art. *Journal of Materials Science*, 42(9), 2917-2933.

- Duxson, P., Provis, J. L., Lukey, G. C., Mallicoat, S. W., Kriven, W. M., & Van Deventer, J. S.** (2005). Understanding the relationship between geopolymer composition, microstructure and mechanical properties. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 269(1-3), 47-58.
- Eduok, E.** (2016). *Thermal properties of geopolymer materials* (Master's thesis, University of Stavanger, Norway).
- Ekinci, E., & Türkmen, İ.** Farklı Aktivatör Ve Ham Madde Değişkenlerinin Geopolimer Hamurun Basınç Dayanımına Etkisinin İncelenmesi. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, (24), 169-175.
- Ekinci, E., Türkmen, İ., Kantarcı, F., & Karakoç, M. B.** (2019). The improvement of mechanical, physical and durability characteristics of volcanic tuff based geopolymer concrete by using nano silica, micro silica and Styrene-Butadiene Latex additives at different ratios. *Construction and Building Materials*, 201, 257-267.
- El-Chabib, H.** (2020). Properties of SCC with supplementary cementing materials. In *Self-Compacting Concrete: Materials, Properties and Applications* (pp. 283-308). Woodhead Publishing.
- El-Hachem, R., Rozière, E., Grondin, F., & Loukili, A.** (2012). New procedure to investigate external sulphate attack on cementitious materials. *Cement and Concrete Composites*, 34(3), 357-364.
- Erdoğan, T. Y.** (2007). Beton. ODTÜ Geliştirme Vakfı Yayıncılık ve İletişim.
- Feng, J., Chen, B., Sun, W., & Wang, Y.** (2021). Microbial induced calcium carbonate precipitation study using *Bacillus subtilis* with application to self-healing concrete preparation and characterization. *Construction and Building Materials*, 280, 122460.
- George, J., Joseph, N., & Mathew, N.** (2016). Experimental Investigation on Properties of Bacterial Concrete. *International Journal of Research in Engineering Technology*, 1(4), 25-32.
- Hadi, M. N., Zhang, H., & Parkinson, S.** (2019). Optimum mix design of geopolymer pastes and concretes cured in ambient condition based on compressive

strength, setting time and workability. *Journal of Building Engineering*, 23, 301-313.

Hager, M.D. Self-Healing Materials. In *Handbook of Solid State Chemistry*; John Wiley & Sons: Hoboken, NJ, USA, 2017; pp. 201–225.

Harley, J. P., & Prescott, L. M. (1996). *Laboratory exercises in microbiology*.

Harrington, E. A. (1927). X-ray diffraction measurements on some of the pure compounds concerned in the study of Portland cement. *American journal of Science*, 5(78), 467-479.

Hassan, A., Arif, M., & Shariq, M. (2020). Mechanical behaviour and microstructural investigation of geopolymer concrete after exposure to elevated temperatures. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 45(5), 3843-3861.

Hendriks, C. A., Worrell, E., De Jager, D., Blok, K., & Riemer, P. (1998). Emission reduction of greenhouse gases from the cement industry. In *Proceedings of the fourth international conference on greenhouse gas control technologies* (pp. 939-944). IEA GHG R&D Programme Interlaken, Austria.

Hogg, S. (2013). *Essential microbiology*. John Wiley & Sons.

Huntzinger, D. N., & Eatmon, T. D. (2009). A life-cycle assessment of Portland cement manufacturing: comparing the traditional process with alternative technologies. *Journal of Cleaner Production*, 17(7), 668-675.

Jadhav, U. U., Lahoti, M., Chen, Z., Qiu, J., Cao, B., & Yang, E. H. (2018). Viability of bacterial spores and crack healing in bacteria-containing geopolymer. *Construction and Building Materials*, 169, 716-723.

Kantarıcı, F. (2018). Nano silis, mikro silis ve polimer katkıları içeren volkanik tüf esaslı geopolimer beton üretimi ve özelliklerinin araştırılması (Doktora Tezi). İnönü Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Malatya.

Kantro, D. L. (1980). Influence of water-reducing admixtures on properties of cement paste a miniature slump test. *Cement, Concrete and Aggregates*, 2(2), 95-102

- Kaur, M., Singh, J., & Kaur, M.** (2018). Synthesis of fly ash based geopolymer mortar considering different concentrations and combinations of alkaline activator solution. *Ceramics International*, 44(2), 1534-1537.
- Khaliq, W., & Ehsan, M. B.** (2016). Crack healing in concrete using various bio influenced self-healing techniques. *Construction and Building Materials*, 102, 349-357.
- Khan, M. B. E., Shen, L., & Dias-da-Costa, D.** (2021). Self-healing behaviour of bio-concrete in submerged and tidal marine environments. *Construction and Building Materials*, 277, 122332.
- Kim, H., Son, H. M., Park, S., & Lee, H. K.** (2020). Effects of biological admixtures on hydration and mechanical properties of Portland cement paste. *Construction and Building Materials*, 235, 117461.
- Komljenović, M., Baščarević, Z., & Bradić, V.** (2010). Mechanical and microstructural properties of alkali-activated fly ash geopolymers. *Journal of Hazardous Materials*, 181(1-3), 35-42.
- Kumar, S., Kumar, R., & Mehrotra, S. P.** (2010). Influence of granulated blast furnace slag on the reaction, structure and properties of fly ash based geopolymer. *Journal of Materials Science*, 45(3), 607-615.
- Lahoti, M., Tan, K. H., & Yang, E. H.** (2019). A critical review of geopolymer properties for structural fire-resistance applications. *Construction and Building Materials*, 221, 514-526.
- Li, M., Zhu, X., Mukherjee, A., Huang, M., & Achal, V.** (2017). Biomineralization in metakaolin modified cement mortar to improve its strength with lowered cement content. *Journal of Hazardous Materials*, 329, 178-184.
- Li, N., Shi, C., Zhang, Z., Wang, H., & Liu, Y.** (2019). A review on mixture design methods for geopolymer concrete. *Composites Part B: Engineering*, 178, 107490.
- Li, V. C., & Herbert, E.** (2012). Robust self-healing concrete for sustainable infrastructure. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 10(6), 207-218.
- Li, V. C., & Yang, E. H.** (2007). Self healing in concrete materials. In *Self healing materials* (pp. 161-193). Springer, Dordrecht.

- Ling, Y., Wang, K., Wang, X., & Hua, S.** (2019). Effects of mix design parameters on heat of geopolymerization, set time, and compressive strength of high calcium fly ash geopolymer. *Construction and Building Materials*, 228, 116763.
- Luo, M., & Qian, C.** (2016). Influences of bacteria-based self-healing agents on cementitious materials hydration kinetics and compressive strength. *Construction and Building Materials*, 121, 659-663.
- Luo, M., Qian, C. X., & Li, R. Y.** (2015). Factors affecting crack repairing capacity of bacteria-based self-healing concrete. *Construction and Building Materials*, 87, 1-7.
- Ma, C. K., Awang, A. Z., & Omar, W.** (2018). Structural and material performance of geopolymer concrete: A review. *Construction and Building Materials*, 186, 90-102.
- Madheswaran, C. K., Gnanasundar, G., & Gopalakrishnan, N.** (2013). Effect of molarity in geopolymer concrete. *International Journal of Civil & Structural Engineering*, 4(2), 106-115.
- Mallikarjuna Rao, G., & Gunneswara Rao, T. D.** (2015). Final setting time and compressive strength of fly ash and GGBS-based geopolymer paste and mortar. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 40(11), 3067-3074.
- Mathew, B. J., Sudhakar, M., & Natarajan, C.** (2013). Strength, economic and sustainability characteristics of coal ash–GGBS based geopolymer concrete. *International Journal of Computational Engineering Research*, 3(1), 207-212.
- Meera, C. M., & Subha, V.** (2016). Strength and durability assessment of bacteria based self-healing concrete. *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering*, (IOSR-JMCE), 1-7.
- Mehta, A., & Siddique, R.** (2018). Sustainable geopolymer concrete using ground granulated blast furnace slag and rice husk ash: Strength and permeability properties. *Journal of Cleaner Production*, 205, 49-57.
- Mihashi, H., & Nishiwaki, T.** (2012). Development of engineered self-healing and self-repairing concrete-state-of-the-art report. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 10(5), 170-184.

- Mondal, S., & Ghosh, A. D.** (2018). Investigation into the optimal bacterial concentration for compressive strength enhancement of microbial concrete. *Construction and Building Materials*, 183, 202-214.
- Muñiz-Villarreal, M. S., Manzano-Ramírez, A., Sampieri-Bulbarela, S., Gasca-Tirado, J. R., Reyes-Araiza, J. L., Rubio-Ávalos, J. C., ... & Amigó-Borrás, V.** (2011). The effect of temperature on the geopolymerization process of a metakaolin-based geopolymer. *Materials Letters*, 65(6), 995-998.
- Nematollahi, B., & Sanjayan, J.** (2014). Effect of different superplasticizers and activator combinations on workability and strength of fly ash based geopolymer. *Materials & Design*, 57, 667-672.
- Nguyen, T. H., Ghorbel, E., Fares, H., & Cousture, A.** (2019). Bacterial self-healing of concrete and durability assessment. *Cement and Concrete Composites*, 104, 103340.
- Nosouhian, F., Mostofinejad, D., & Hasheminejad, H.** (2016). Concrete durability improvement in a sulfate environment using bacteria. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 28(1), 04015064.
- Olivia, M., & Nikraz, H.** (2012). Properties of fly ash geopolymer concrete designed by Taguchi method. *Materials & Design* (1980-2015), 36, 191-198.
- Ouellet-Plamondon, C., & Habert, G.** (2015). Life cycle assessment (LCA) of alkali-activated cements and concretes. In *Handbook of alkali-activated cements, mortars and concretes* (pp. 663-686). Woodhead Publishing.
- Palin, D., Wiktor, V., & Jonkers, H. M.** (2017). A bacteria-based self-healing cementitious composite for application in low-temperature marine environments. *Biomimetics*, 2(3), 13.
- Parastegari, N., Mostofinejad, D., & Poursina, D.** (2019). Use of bacteria to improve electrical resistivity and chloride penetration of air-entrained concrete. *Construction and Building Materials*, 210, 588-595.
- Pavithra, P. E., Reddy, M. S., Dinakar, P., Rao, B. H., Satpathy, B. K., & Mohanty, A. N.** (2016). A mix design procedure for geopolymer concrete with fly ash. *Journal of Cleaner Production*, 133, 117-125.

- Polat, B.** (2019). Geopolimer harcın mikro organizmalar yardımıyla kendiliğinden iyileşmesinin araştırılması (Doktora Tezi). İstanbul Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Polat, R.** (2013). Genleştirilmiş perlit agregası, nano ve mikro boyutta CaO ve MgO ve kil'in yüksek mukavemetli betonların otojen rötreleri üzerindeki etkisi. Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.
- Polat, R., Demirboğa, R., & Karagöl, F.** (2017). The effect of nano-MgO on the setting time, autogenous shrinkage, microstructure and mechanical properties of high performance cement paste and mortar. *Construction and Building Materials*, 156, 208-218.
- Porsche PCT Patent**, 2004.
- Post, K. W.** (2019). Overview of bacteria. *Diseases of Swine*, 743-748.
- Pouhet, R., & Cyr, M.** (2016). Formulation and performance of flash metakaolin geopolymer concretes. *Construction and Building Materials*, 120, 150-160.
- Prošek, Z., Ryparová, P., & Tesárek, P.** (2020). Application of Bacteria as Self-Healing Agent for the Concrete and Microscopic Analysis of the Microbial Calcium Precipitation Process. In *Key Engineering Materials* (Vol. 846, pp. 237-242). Trans Tech Publications Ltd.
- Rajczakowska, M., Habermehl-Cwirzen, K., Hedlund, H., & Cwirzen, A.** (2019). Autogenous self-healing: a better solution for concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 31(9), 03119001.
- Ramakrishnan, V., Panchalan, R. K., Bang, S. S., & City, R.** (2005). Improvement of concrete durability by bacterial mineral precipitation. In Proc. ICF (Vol. 11, pp. 357-67).
- Rangan, B. V.** (2014). Geopolymer concrete for environmental protection. *The Indian Concrete Journal*, 88(4), 41-59.
- Rangan, B. V.** (2008). "Low-Calcium, Fly-Ash-Based Geopolymer Concrete." Concrete Construction Engineering Handbook. Taylor and Francis Group, Boca Raton, FL.

- Rattanasak, U., & Chindaprasirt, P.** (2009). Influence of NaOH solution on the synthesis of fly ash geopolymer. *Minerals Engineering*, 22(12), 1073-1078.
- Rauf, M., Khaliq, W., Khushnood, R. A., & Ahmed, I.** (2020). Comparative performance of different bacteria immobilized in natural fibers for self-healing in concrete. *Construction and Building Materials*, 258, 119578.
- Rong, H., Wei, G., Ma, G., Zhang, Y., Zheng, X., Zhang, L., & Xu, R.** (2020). Influence of bacterial concentration on crack self-healing of cement-based materials. *Construction and Building Materials*, 244, 118372.
- Ryparová, P., Prošek, Z., Schreiberova, H., Bílý, P., & Tesarek, P.** (2021). The role of bacterially induced calcite precipitation in self-healing of cement paste. *Journal of Building Engineering*, 39, 102299.
- Sahithi, K., & Priyanka, G. S.** (2015). The Effect of Addition of Limestone powder and Granulated Blast Slag in Concrete. *Int. J. Comput. Eng. Res. Trends*, 2.
- Saloma, Hanafiah, Elysandi, D. O., & Meykan, D. G.** (2017). Effect of Na₂SiO₃/NaOH on mechanical properties and microstructure of geopolymer mortar using fly ash and rice husk ash as precursor. In AIP Conference Proceedings (Vol. 1903, No. 1, p. 050013). AIP Publishing LLC.
- Schlangen, E., & Joseph, C.** (2009). Self-healing processes in concrete. *Self-healing materials: Fundamentals, design strategies, and applications*.
- Schlegel, H. G., & Zaborosch, C.** (1993). *General microbiology*. Cambridge university press.
- Schleifer, K. H.** (2009). Classification of Bacteria and Archaea: past, present and future. *Systematic and Applied Microbiology*, 32(8), 533-542.
- Seifan, M., Sarmah, A. K., Samani, A. K., Ebrahimezhad, A., Ghasemi, Y., & Berenjian, A.** (2018). Mechanical properties of bio self-healing concrete containing immobilized bacteria with iron oxide nanoparticles. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 102(10), 4489-4498.
- Shalini, A., Gurunarayanan, G., & Sakthivel, S.** (2016). Performance of rice husk ash in geopolymer concrete. *Int J Innov Res Sci Tech*, 2, 73-77.

- Siddique, R., Nanda, V., Kadri, E. H., Khan, M. I., Singh, M., & Rajor, A.** (2016). Influence of bacteria on compressive strength and permeation properties of concrete made with cement baghouse filter dust. *Construction and Building Materials*, 106, 461-469.
- Silva, G., Castañeda, D., Kim, S., Castañeda, A., Bertolotti, B., Ortega-San-Martin, L., ... & Aguilar, R.** (2019). Analysis of the production conditions of geopolymer matrices from natural pozzolana and fired clay brick wastes. *Construction and Building Materials*, 215, 633-643.
- Singh, B., Ishwarya, G., Gupta, M., & Bhattacharyya, S. K.** (2015). Geopolymer concrete: A review of some recent developments. *Construction and Building Materials*, 85, 78-90.
- Singh, N. B., & Middendorf, B.** (2020). Geopolymers as an alternative to Portland cement: An overview. *Construction and Building Materials*, 237, 117455.
- Sobolev, K., & Gutiérrez, M. F.** (2005). How nanotechnology can change the concrete world. *American Ceramic Society Bulletin*, 84(10), 14.
- Su, Y., Feng, J., Jin, P., & Qian, C.** (2019). Influence of bacterial self-healing agent on early age performance of cement-based materials. *Construction and Building Materials*, 218, 224-234.
- Su, Y., Qian, C., Rui, Y., & Feng, J.** (2021). Exploring the coupled mechanism of fibers and bacteria on self-healing concrete from bacterial extracellular polymeric substances (EPS). *Cement and Concrete Composites*, 116, 103896.
- Suresh, D., & Nagaraju, K.** (2015). Ground granulated blast slag (GGBS) in concrete—a review. *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering*, 12(4), 76-82.
- Tayebani, B., & Mostofinejad, D.** (2019). Penetrability, corrosion potential, and electrical resistivity of bacterial concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 31(3), 04019002.
- Tayebani, B., & Mostofinejad, D.** (2019). Self-healing bacterial mortar with improved chloride permeability and electrical resistance. *Construction and Building Materials*, 208, 75-86.
- Tech, J. E. T.** (2015). Geo-polymer bacterial concrete using microorganism. *Journal of Environmental Treatment Techniques*, 3(4), 212-214.

- Türker, H. T., Balçikanlı, M., Durmuş, İ. H., Özbay, E., & Erdemir, M.** (2016). Microstructural alteration of alkali activated slag mortars depend on exposed high temperature level. *Construction and Building Materials*, *104*, 169-180.
- Tziviloglou, E., Wiktor, V., Jonkers, H. M., & Schlangen, E.** (2016). Bacteria-based self-healing concrete to increase liquid tightness of cracks. *Construction and Building Materials*, *122*, 118-125.
- United States, Environmental Protection Agency, Office of Policy.** (1999). Inventory of US greenhouse gas emissions and sinks: 1990-1997. The Agency.
- URL 1.** <https://www.greenspec.co.uk/building-design/environmental-impacts-of-concrete>.(Erişim Tarihi:06.05.2022).
- URL 2.** <https://www.statista.com/statistics/1087115/global-cement-production-volume/>_(Erişim Tarihi:06.05.2022).
- URL 3.** <https://www.geopolymer.org/applications/geopolymer-cement/>. (Erişim Tarihi:06.05.2022)
- US Geological Survey (USGS).** (2020). Mineral Commodity Summaries 2020.
- Van Deventer, J. S., Provis, J. L., & Duxson, P.** (2012). Technical and commercial progress in the adoption of geopolymer cement. *Minerals Engineering*, *29*, 89-104.
- Van Tittelboom, K., & De Belie, N.** (2013). Self-healing in cementitious materials—A review. *Materials*, *6*(6), 2182-2217.
- Van Tittelboom, K., De Belie, N., De Muynck, W., & Verstraete, W.** (2010). Use of bacteria to repair cracks in concrete. *Cement and Concrete Research*, *40*(1), 157-166.
- Van Tittelboom, K., De Belie, N., Van Loo, D., & Jacobs, P.** (2011). Self-healing efficiency of cementitious materials containing tubular capsules filled with healing agent. *Cement and Concrete Composites*, *33*(4), 497-505.
- Vijay, K., & Murmu, M.** (2019). Effect of calcium lactate on compressive strength and self-healing of cracks in microbial concrete. *Frontiers of Structural and Civil Engineering*, *13*(3), 515-525.

- Vijay, K., Murmu, M., & Deo, S. V.** (2017). Bacteria based self healing concrete—A review. *Construction and Building Materials*, 152, 1008-1014.
- Wang, J. Y., Soens, H., Verstraete, W., & De Belie, N.** (2014). Self-healing concrete by use of microencapsulated bacterial spores. *Cement and Concrete Research*, 56, 139-152.
- Wang, J., Dewanckele, J., Cnudde, V., Van Vlierberghe, S., Verstraete, W., & De Belie, N.** (2014). X-ray computed tomography proof of bacterial-based self-healing in concrete. *Cement and Concrete Composites*, 53, 289-304.
- Wiktor, V., & Jonkers, H. M.** (2011). Quantification of crack-healing in novel bacteria-based self-healing concrete. *Cement and Concrete Composites*, 33(7), 763-770.
- Woods, H.** (1968). Durability of concrete construction.
- Wulandari, K. D., Ekaputri, J. J., Kurniawan, S. B., Primaningtyas, W. E., Abdullah, S. R. S., Ismail, N. I., & Imron, M. F.** (2021). Effect of microbes addition on the properties and surface morphology of fly ash-based geopolymer paste. *Journal of Building Engineering*, 33, 101596.
- Xu, J., Tang, Y., Wang, X., Wang, Z., & Yao, W.** (2020). Application of ureolysis-based microbial CaCO₃ precipitation in self-healing of concrete and inhibition of reinforcement corrosion. *Construction and Building Materials*, 265, 120364.
- Zakka, W. P., Lim, N. H. A. S., & Khun, M. C.** (2021). A scientometric review of geopolymer concrete. *Journal of Cleaner Production*, 280, 124353.
- Zhao, R., & Sanjayan, J. G.** (2011). Geopolymer and Portland cement concretes in simulated fire. *Magazine of Concrete research*, 63(3), 163-173.

ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : Enes EKİNCİ

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** :2014, İnönü Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü
- **Yüksek Lisans** : 2017, İnönü Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği, Yapı

MESLEKİ DENEYİM:

- 2014-2015 yılları arasında Malatya Büyükşehir Belediyesi MASKİ Genel Müdürlüğü'nde İnşaat Mühendisi olarak görev yapmıştır.
- 2016 yılından bu güne İnönü Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'nde Araştırma Görevlisi olarak görev yapmaktadır.

YÜKSEK LİSANS VEYA DOKTORA TEZİNDEN TÜRETİLEN ÇALIŞMALAR (Makaleler, Bildiriler, Patentler v.b.)

- **Ekinci, E.**, Türkmen, İ., Kantarci, F., & Karakoç, M. B. (2019). The improvement of mechanical, physical and durability characteristics of volcanic tuff based geopolymer concrete by using nano silica, micro silica and Styrene-Butadiene Latex additives at different ratios. *Construction and Building Materials*, 201, 257-267.
- **Ekinci, E.**, Türkmen, İ., & Birhanli, E. (2022). Performance of self-healing geopolymer paste produced using *Bacillus subtilis*. *Construction and Building Materials*, 325, 126837.