



T.C.
İSTANBUL ÜNİVERSİTESİ-CERRAHPAŞA
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ



YÜKSEK LİSANS TEZİ

MAĞARA BAKTERİLERİNİN KENDİLİĞİNDEN İYİLEŞEN HARÇ ÜRETİMİNDE
KULLANIMININ İNCELENMESİ

Elif Burcu ŞENER

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

İnşaat Mühendisliği Programı

DANIŞMAN

Doç. Dr. Mücteba UYSAL


II. DANIŞMAN


Doç. Dr. Nihal DOĞRUÖZ GÜNGÖR

Ocak-2020

Bu çalışma, 21.01.2020 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı İnşaat Mühendisliği Programı Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

Tez Jürisi


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


Doç. Dr. Savaş ERDEM
İstanbul Üniversitesi Cerrahpaşa
Mühendislik Fakültesi


Dr. Öğr. Üyesi Aral NİŞ
İstanbul Gelişim Üniversitesi
Mühendislik Fakültesi



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

ÖNSÖZ

Yüksek lisans tez çalışmamda engin bilgi, tecrübe ve deneyimleriyle bana yol gösteren tez danışmanlarım Sayın Doç. Dr. Mücteba UYSAL'a ve Doç. Dr. Nihal DOĞRUÖZ GÜNGÖR'e,

Değerli görüş ve önerileriyle büyük katkı sağlayan tez jürisinde bulunan değerli hocalarım Sayın Doç. Dr. Savaş ERDEM'e ve Dr. Öğr. Üyesi Anıl NİŞ'e,

Çalışmamda yardımlarını gördüğüm Araş. Gör. Yurdakul AYGÖRMEZ'e,

Bakteri üretimleri sırasında yardımlarını eksik etmeyen sevgili Nahdhoit AHAMADA RACHID'e,

Analizlerde emeği geçen Öğr. Gör. Melih Beşir ARVAS'a,

Bugünlere gelmemde en büyük pay sahibi olan ve hiçbir konuda desteklerini esirgemeyen aileme sonsuz teşekkürlerimi borç bilirim.

Ocak 2020

[Elif Burcu ŞENER]

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ÖNSÖZ	iv
İÇİNDEKİLER.....	v
ŞEKİL LİSTESİ	vi
TABLO LİSTESİ.....	vii
SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ.....	viii
ÖZET	ix
SUMMARY	xi
1. GİRİŞ.....	1
2. GENEL KISIMLAR	3
2.1. KENDİ KENDİNE İYİLEŞME.....	4
2.2. TARİHÇE	5
2.3. OTOJEN VE OTONOM İYİLEŞME.....	5
2.4. KENDİLİĞİNDEN İYİLEŞEBİLEN BETON / HARÇ	7
2.4.1. Otonom İyileşme Ajanı: Bakteriler	8
2.4.2. Kendiliğinden İyileşebilen (Bakteriyel) Betonun/Harcın Avantaj ve Dezavantajları.....	9
2.4.3. Kendiliğinden İyileşebilen Beton Mekanizması.....	10
2.4.4. Bakteriyel Beton/Harç ile İlgili Yapılan Diğer Çalışmalar	11
3. MALZEME VE YÖNTEM	16
3.1. KENDİLİĞİNDEN İYİLEŞEBİLEN HARÇ BİLEŞENLERİ.....	16
3.1.1. Çimento.....	16
3.1.2. Agregası (Kum).....	19
3.1.3. Mineral Katkılar.....	19
3.1.3.1. Uçucu Kül (Pulvarize Yakıt Küli).....	19
3.1.3.2. Yüksek Fırın Cürufu	20
3.1.3.3. Metakaolin.....	21
3.1.4. Karışım Suyu	23

3.2. BAKTERİLER VE BAKTERİLERİN KRİSTALİZASYON OLUŞTURMA YETENEKLERİNİN İNCELENMESİ.....	23
3.3. HARÇ ÜRETİMİ.....	25
3.3.1. Numune Kodları	25
3.3.2. Üretim	26
3.3.3. Numunelerin Boyutları	27
3.3.4. Harç Deneyleri.....	28
3.3.4.1. Su Emme Deneyi.....	28
3.3.4.2. Ultrasonik Ses Geçiş Hızı Testi (UPV)	28
3.3.4.3. Eğilme Dayanımı Testi.....	29
3.3.4.4. Basınç Dayanımı Testi	30
3.3.4.5. SEM ve EDS Analizi.....	31
3.3.4.6. XRD Analizi.....	32
4. BULGULAR	33
4.1. HARÇ DENEYLERİ.....	33
4.1.1. Su Emme Deneyi Sonuçları.....	33
4.1.2. Ultrasonik Ses Geçiş Hızı Testi (UPV) Sonuçları.....	38
4.1.3. Eğilme Dayanımı Test Sonuçları.....	38
4.1.4. Basınç Dayanımı Test Sonuçları	39
4.1.5. SEM ve EDS Analizi	46
5. TARTIŞMA VE SONUÇ	62
KAYNAKLAR.....	66
ÖZGEÇMİŞ	76

ŞEKİL LİSTESİ

	Sayfa No
Şekil 3.1: Çimento üretim şeması	17
Şekil 3.2: Uçucu kül.....	20
Şekil 3.3: Demir üretiminde kullanılan yüksek fırın.....	21
Şekil 3.4: Yüksek fırın cürufu.....	21
Şekil 3.5: Metakaolin.....	22
Şekil 3.6: Bakterili karışım suyu.....	23
Şekil 3.7: Numunelerin kalıplara yerleştirilmesi.....	27
Şekil 3.8: Numune şekil ve boyutları.....	28
Şekil 3.9: Ultrasonik ses geçiş hızı deneyi.....	29
Şekil 3.10: Eğilme deneyi.....	30
Şekil 3.11: Basınç dayanımı deneyi.....	30
Şekil 3.12: Au-Pd kaplama cihazı.....	31
Şekil 3.13: Au-Pd kaplamadan önce (a)/sonra (b).....	32
Şekil 4.1: 0,4 S/Ç Su emme-UPV grafiği.....	35
Şekil 4.2: 0,5 S/Ç Su emme-UPV grafiği.....	36
Şekil 4.3: 0,6 S/Ç Su emme-UPV grafiği.....	37
Şekil 4.4: 0,4 S/Ç Su emme-Basınç DayanımıGrafiği.....	40
Şekil 4.5: 0,5 S/Ç Su emme-Basınç DayanımıGrafiği.....	41
Şekil 4.6: 0,6 S/Ç Su emme-Basınç DayanımıGrafiği.....	42
Şekil 4.7: UK içeren numunelerin su emme yüzdeleri basınç dayanımları.....	43
Şekil 4.8: YFC içeren numunelerin su emme yüzdeleri ve basınç dayanımları.....	44
Şekil 4.9: Metakaolin içeren numunelerin su emme yüzdeleri ve basınç dayanımları.....	45

Şekil 4.10: Kontrol numunesi (BRO) SEM mikrografları	47
Şekil 4.11: B3 numunesi SEM mikrografları.....	50
Şekil 4.12: B2O numunesi SEM mikrografları.....	53
Şekil 4.13: C2 numunesi SEM mikrografları.....	56
Şekil 4.14: XRD analiz sonuçları.....	59



TABLO LİSTESİ

	Sayfa No
Tablo 3.1: Çimentonun fiziksel ve kimyasal özellikleri.....	18
Tablo 3.2: Rilem standart kumunun granülometrisi.....	22
Tablo 3.3: Metakaolin ve yüksek fırın cürufunun kimyasal özellikleri.....	23
Tablo 3.4: Uçucu külün kimyasal özellikleri.....	23
Tablo 3.5: Bakterilerin özellikleri.....	24
Tablo 3.6: Numune kodlaması.....	25
Tablo 3.7: Açıklamalarıyla birlikte numuneler ve kodları.....	25
Tablo 3.8: Harç karışım oranları (gr).....	27
Tablo 4.1: 7 ve 28 günlük numunelerin su emme yüzdeleri.....	33
Tablo 4.2: 28 günlük UPV deneyi sonuçları.....	38
Tablo 4.3: Numunelerin eğilme dayanımı sonuçları.....	38
Tablo 4.4: Numunelerin basınç dayanımı sonuçları.....	39

SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ

Simgeler Açıklama

μm : Mikrometre

MPa : Megapaskal

Kısaltmalar Açıklama

ECC : Tasarlanmış Çimentolu Kompozit (Engineered Cementitious Composites)

PÇ : Portland Çimentosu

PVA : Polivinil Alkol

S/Ç : Su/Çimento

SAP : Süper Emici Polimer

THBB : Türkiye Hazır Beton Birliği

UK : Uçucu Kül

UPV : Ultrasonik Hızı (Ultrasonic pulse velocity)

Y151 : *Sphingomonas mucosissima*

Y214 : *Bacillus thuringiensis*

Y234 : *Pseudomonas putida*

YFC : Yüksek Fırın Cürufu

ÖZET

[YÜKSEK LİSANS TEZİ]

[MAĞARA BAKTERİLERİNİN KENDİLİĞİNDEN İYİLEŞEN HARÇ ÜRETİMİNDE
KULLANILMASI]

Elif Burcu ŞENER

İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Mücteba UYSAL

[II. Danışman: Doç. Dr. Nihal DOĞRUÖZ GÜNGÖR]

[Kendiliğinden iyileşen beton, matriks içinde bulunan ve çatlaklardan sızan suyun çimento parçacıklarıyla oluşturduğu gecikmeli veya ikincil hidrasyon ve çatlak yüzeyinde bulunan kalsiyum hidroksit ile karbondioksitin tepkimeye girmesiyle oluşan kalsiyum karbonatın (kireçtaşı) çatlaklardan meydana gelebilecek sızmalara karşı koruma sağlamasıyla meydana gelen bir beton türüdür. Son zamanlarda yapılan araştırmalarda, bakterilerin kalsiyum karbonat bazlı minerallerin üretimini sağlamasıyla kendi kendini onarabilen bir beton türü daha geliştirildiği görülmüştür. Böylelikle çatlak onarım genişliğinin 0,2 mm'den 0,8 mm'ye kadar arttırılabileceği tespit edilmiştir. Bu çatlak onarımı sayesinde betonda sızdırmaya karşı koruma, gözenek geçirimsizliği ve zararlı maddelerin iç yapıya sızması azaltılarak su geçirgenliği, dona karşı dayanıklılık, çelik donatılarda korozyona karşı koruma artışı sağlandığı görülmüştür. Bu sayede yapının veya yapı parçasının kullanım ömrü artarken aynı zamanda tamir ihtiyacı da azaltılmıştır. Bu projelerde kendini onarabilen beton üretiminin

yanı sıra aynı teknolojiyle kendini onaran harç ve sıvı sistemi de geliştirilmiştir. Bu sayede çatlak veya hasarlı yapı parçalarının su geçirimsizliği yeniden düzenlenebilmektedir [1].

Bu çalışmada 3 farklı su/çimento oranı ve 3 farklı mineral katkı ile geleneksel yöntemlerle hazırlanan harç karışımlarında, *Bacillus thuringiensis*, *Pseudomonas putida* ve *Sphingomonas mucosissima* bakterilerinin de kullanılmasıyla 48 farklı seri numune üretilmiştir. Kullanılan bakteriler, kalsiyum karbonat oluşumunu sağlayan mağara izolatları olup bu izolatlar uygun besi ortamında çoğaltılarak, hazırlanan harç numunelerine karışım suyuyla dahil edilmiştir. Üretilen numuneler 28 gün boyunca şebeke suyuyla kürlendikten sonra sırasıyla su emme, ultrases, eğilme ve basınç dayanımı testlerine maruz bırakılmıştır. Testler sonucunda bakterili numunelerde boşluklu yapının azaldığı ve buna bağlı olarak su emme yüzdelерinin referans numunelerine kıyasla düşüş gösterdiği görülmüştür.

Ocak 2020, [77] sayfa.

Anahtar kelimeler: Otonom iyileşme, otojen iyileşme, biyo-onarım, biyomineralizasyon, mikrobiyal CaCO₃

SUMMARY

M.Sc. THESIS

INVESTIGATION OF USING CAVE BACTERIA ON THE PRODUCTION OF SELF-HEALING MORTARS

Elif Burcu ŞENER

Istanbul University-Cerrahpasa

Institute of Graduate Studies

[Department of Civil Engineering]

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Mücteba UYSAL

[Co-Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Nihal DOĞRUÖZ GÜNGÖR]

Self-healing concrete is a kind of concrete which comes into existence thanks to the protection against the potential leaks through the cracks as a benefit of the calcium carbonate (limestone) produced as a result of the reaction between the carbon dioxide and the calcium hydroxide existing on the surface of the crack and the delayed or secondary hydration developed by the water contained in the matrix and leaking through the cracks with the cement particles. Recent research has revealed that bacteria develops a further kind of concrete which is able to repair itself by ensuring the production of the calcium carbonate based minerals. It has been detected that the crack reparation range could be increased from 0.2 mm up to 0.8 mm. The water permeability, frost resistance, and mesh reinforcement corrosion protection performances have been shown to be enhanced through the leak protection, pore permeability, and reduced leakage of harmful substances into the internal structure thanks to such crack reparation feature. This has led to both longer life of the structure or the structural element and less need of repair. A mortar and plaster system, too,

has been developed under these projects, besides the self-repairing concrete production. Thus the water permeability of cracked or damaged structural elements can be reorganized [1].

In this study, 48 different series of specimens were produced, by using *Bacillus thuringiensis*, *Pseudomonas putida* and *Sphingomonas mucosissima* bacteria as well, in the mortar mixes prepared by conventional methods with 3 different water/cement ratios and 3 different mineral additives. The bacteria used were cave isolates providing for the formation of calcium carbonate, and these isolates were reproduced in appropriate growth culture then introduced with the mixing water into the mortar specimens prepared. Having been cured with the tap water for 28 days, the specimens produced were subjected to absorption, ultrasonic, bending and compressive strength tests. Results of the tests revealed a diminution in cellular structure in the bacteria-containing specimens, which in turn resulted in lower water absorption rates compared to the reference specimens.

January 2020, [77] pages.

Keywords: | Self-healing, otogenous-healing, bio-repair, biomineralization, microbial CaCO₃ |

1. GİRİŞ

Nüfus artışıyla doğru orantılı olarak gelişen inşaat sektörü sayesinde, çimento ve kireç gibi malzemelerin üretim ve tüketiminde artış olmaktadır. Özellikle de ülkemizde, kentsel dönüşüm etkisiyle bu üretim ve tüketim döngüsünde daha fazla artış görülmektedir [2]. Ancak, çimento üretimi yapan tesislerde yeterli önlemler alınmadığından, üretim sürecinde açığa çıkan yüksek sıcaklık, toz, toksik ve alerjik kimyasallar, ağır metaller ve baca emisyonlarındaki atık gazlar çevreye zarar vermektedir. Üretim sürecinde gerçekleşen yüksek miktardaki CO₂ emisyonuyla da günümüzün en önemli çevre sorunlarından olan küresel ısınmayla karşı karşıya kalınmaktadır. Ayrıca toprak yapısının bozulmasıyla da elde edilebilecek verim düşmekte, toprak içerisinde madde döngülerini sağlayan mikrobiyal yapının bozulmasıyla da canlı çeşitliliğinin etkilenmesine yol açmaktadır [3,4]. Karşılaşılan bu olumsuzluklar sebebiyle, çimento üretimi ve çimento bazlı onarımda atık oluşumunun önlenmesi amacıyla çevre dostu bir üretim şekli geliştirilmeye yönelilmiştir. Yapılan araştırmalar, çimento esaslı harç ve beton gibi malzemelerin kimyasal ve biyokimyasal yollarla da iyileştirilebileceğini göstermiştir. Bu amaçla, özellikle son yıllarda, çimentoyla onarımda mikroorganizmaların biyokimyasal aktiviteleri sonucunda oluşan CaCO₃ ün kullanımıyla ilgili çalışmalar yapılmaktadır [5, 6].

Beton, üretim süreci, hammadde varlığı ve basınç dayanımı özellikleri nedeniyle yaygın olarak kullanılan bir yapı malzemesi olmakla birlikte çatlamaya oldukça eğilimlidir [7]. Beton yapısındaki çatlak oluşumu, yapılardaki gerilme ve büzülme reaksiyonları nedeniyle meydana gelmekte olup birçok beton yapısındaki tipik bir dayanıklılık olgusudur. Betonun servis ömrü boyunca herhangi bir zamanda bu çatlak oluşumları meydana gelebilmektedir. Bu tür mikro çatlaklar, meydana geldikleri yapıların mukavemet özelliklerini etkilemese de, malzemenin gözenekliliğine ve geçirgenliğine sebep olurlar. Klorürler, sülfatlar ve asitler gibi agresif kimyasalların çatlaklardan içeri girmesi, uzun vadede beton matrisi bozunmasına ve gömülü çelik donatının erken aşınmasına neden olabilir ve böylece yapıların uzun vadede dayanıklılığını engelleyebilir.

Beton yapılarındaki çatlakların tamiri ise önemli fakat zaman alan ve maliyetli bir iştir. Klasik yöntemlerle bu bakım ve onarımın maliyet fazlalığı hatta bazı durumlarda müdahale

edilmesinin mümkün olamamasından dolayı bilim insanları, kendiliğinden iyileşebilen beton kavramları üzerinde çalışmışlardır [8]. En popüler kavramlar arasında fiberleri kullanarak çatlak genişliğini sınırlamak [9], hidrojel kullanımıyla suyla temasta çimento matrisinin genişletilmesi [10, 11], kırılma üzerine serbest kalan aktif bir iyileştirici ajan takviyesi (biyomineralizasyon) ve daha önceki yöntemler olduğu görülmüştür [12, 13].

Bu çalışmada, yapılarda oluşabilecek mikro çatlakların giderilebilmesi amacıyla, literatürde daha önceleri kullanımına rastlanmamış üç farklı tür bakterinin ve üç farklı mineral katkı maddesinin kullanıldığı kendiliğinden iyileşebilen harç çubuğu numuneleri üretilerek bakterilerin gözeneklilik üzerindeki etkisi incelenmiştir.



2. GENEL KISIMLAR

Beton, mikro gözenekli bir yapıya sahip olması sebebiyle dışarıdan zararlı sıvıların, kimyasal vb. maddelerin girmesi dolayısıyla düşük dayanıklılığa sahip olmasına karşın işlenebilirliği, ekonomikliği, fiziksel ve mekanik etkilere karşı dayanıklılığı sebebiyle günümüzde en çok kullanılan yapı malzemesidir [14]. Beton, bileşiminde agrega, çimento ve suyun, ihtiyaç durumuna göre de katkıların ilave edilip homojen olarak karıştırılmasıyla elde edilen bir yapı malzemesidir [15]. Harç ise, bileşiminde çimento, su ve ihtiyaç halinde eklenen katkı maddelerinin yanı sıra ince daneli malzeme olan kumun karıştırılmasıyla elde edilen bir yapı malzemesidir.

Beton, çimentonun suyla hidrate olmasıyla dayanım kazanır ve plastik halden katı halde geçer. Betonun içeriğinde bulunan iri daneli agregaların arasında kalan boşluklar da nispeten daha ince daneli malzeme olan kum ile doldurularak boşluk durumu azaltılır. Kullanılan çimento da agrega danelerini bir arada tutar. Doğru tasarlanmış ve geçirimsiz bir beton, bünyesinde bulunan donatıyı korozyondan koruyarak yapının dayanıklılığının devamlılığını sağlar. Fakat betonun yeterli geçirimsizlik koşulunu sağlamamasıyla dışarıdan gelebilecek zararlı iyonlar ya da karbonatlaşma, zaman içerisinde betonun alkalinitesini kaybettirerek donatı korozyonuna sebebiyet vermektedir [16].

Betonda dayanıklılık olgusu yapısındaki boşlukların özellikleriyle yakından ilgilidir. Betonun içindeki boşluk oranının fazla olması ve bu boşlukların birbiriyle bağlantısının bulunması, betona zarar verebilecek maddelerin iç yapıya nüfuz etmesini ve taşınımını kolaylaştırır. Sonucunda da beton daha hızlı ve kolay bir şekilde bozunmaya uğrar [16].

Nispeten düşük çekme dayanımı ve farklı yük ve yük olmayan faktörlerin etkisinden dolayı betonda çatlama olması kaçınılmazdır. Plastik rötre, kuruma rötresi, ısıl gerilmeler, dış yüklemeler, donatı korozyonu veya çoklu faktörlerin birleşik etkisi çatlama kaynakları olarak değişkenlik gösterebilir. Örneğin, rötre nedeniyle oluşabilen mikro çatlaklar herhangi bir dış yüklemenin uygulanmasıyla çatlak ağına neden olabilir, daha düşük stres seviyesinde yayılabilir. Bu tür çatlaklar, nem ve kimyasalların yapıya sızmasını kolaylaştırır. Tropikal iklimlerde bu tip problemler, havadaki yüksek nem içeriği ve yüksek yağış oranı sebebiyle

daha kötü etkilere sahip olabilmektedir. Oluşan bu çatlaklar manuel olarak tamir edilebilir ancak çatlaklara erişilebilirlik, çevreye etki ve maliyet gibi bakım ve onarım işlemleri sorun oluşturabilmektedir [17].

Çatlak onarım işlemleri için, inşaat sektöründe en çok tercih edilen bağlayıcı malzeme olan çimento, çimento esaslı malzemeler ve farklı kimyasal maddeler kullanılmaktadır [18]. Çimento üretimi, dünya üzerinde insan kaynaklı CO₂ emisyonunun yaklaşık %7'sini oluşturmaktadır. 2017 yılında yayınlanan istatistik sonuçlarına göre, çimento üretimi yapan ülkelerin çoğunda çimento üretiminin Avustralya'da %0,21, Amerika'da %2,5, Hindistan'da %8,4 ve Çin'de %8,4 ile 4,6 milyar metrik ton olduğu görülmüştür. Üretim aşamasında fosil yakıt kullanıldıysa ve iyileştirici herhangi bir yöntemle başvurulmadıysa 1 ton klinker üretebilmek için 1 ton CO₂ açığa çıktığı kabul edilmiştir [19]. İlaveten, çimento üretimi yaklaşık 1400-1500 °C gibi yüksek sıcaklıklarda yapıldığından dolayı yüksek enerji tüketimi ve buna bağlı olarak yüksek maliyet söz konusudur. Çimento üretimi, küresel antropojenik CO₂ emisyonuyla ilişkili olduğundan, kimyasal iyileştiriciler, malzeme uyumsuzluğu, sağlık ve çevresel tehlikeler dahil olmak üzere çeşitli tehditler oluşturmaktadır [20, 21]. Gelişen teknolojiyle birlikte çimento üretimini, az enerji tüketir ve doğaya daha az zarar verir hale getirmeye çalışılmaktadır. Bununla birlikte, artan çimento ihtiyacı ve zamanla tükenen hammaddeler de göz önüne alındığında, çimentonun sürdürülebilir bir malzeme olup olmadığı tartışılır hale gelecektir [22]. Yapılan gözlemlerde, dünyadaki yıllık tüketimi 130 milyon tonu bulan Portland çimentosuna duyulan gereksinimin her yıl %5 arttığı, betonun diğer bileşenleri olan agrega ve su kaynaklarının da göz önünde bulundurulmasıyla dünyada 1 milyar ton/yıl beton tüketildiği gözlemlenmektedir.

2.1. KENDİ KENDİNE İYİLEŞME

Mikro çatlaklar, inşaatın hemen sonra veya ileri aşamalarda büyük dayanıklılık ve yapısal sorunlara yol açana kadar genellikle farkedilmezler. Aynı zamanda, yapılar üzerinde rutin tamir işlemleri yapmak da maddi bir yük oluşturmaktadır. Bu nedenle, daha az maliyetli ve manuel müdahale ihtiyacını ortadan kaldıracak sürdürülebilir bir çatlak iyileştirme yöntemine ihtiyaç duyulmaktadır.

Kendi kendine iyileşme, zararları iyileştirebilme yeteneği ile birlikte yüksek kaliteli malzemeler sunma konusunda ortaya çıkan bir kavram olup son on yılda bina yapılarında

kullanımı için büyük ilgi görmüştür. Bu nedenle, etkili bir kendi kendini iyileştirebilme mekanizması, bakım ve onarım işlerini ve buna bağlı olarak gelişen çevresel ve ekonomik etkileri önemli bir oranda azaltabilir. Son zamanlarda, mikrobiyal kaynaklı CaCO_3 'ün çökeltilmesi yöntemiyle sürdürülebilir bir kendini iyileştirme mekanizması oluşturarak çatlakları kapatmak ve iyileştirebilmek için çalışılmaktadır.

2.2. TARİHÇE

Beton iyileşme olgusu, son on yılda kapsamlı bir şekilde çalışılmıştır ancak 1836'da, Fransız Bilimler Akademisi, bu konudaki ilk araştırmayı yapmış olup betondaki kalsiyum hidroksit ile hava (atmosfer) arasında veya sudaki kalsiyum hidrojen ile betondaki kalsiyum hidroksit arasında gerçekleşen karbonatlaşma nedeniyle çatlaklar üzerinde beyaz kristal tabakaların oluştuğunu fark etmiştir [23].

1913 yılında Abrams [24], betonarme üzerine yapılan çekme testi sırasında betonda çatlak iyileşmesini güçlendirmiştir.

Kendi kendini iyileştirme olgusu 1926'da Soroker ve Denson, 1937'de Brandeis tarafından incelenmiştir [25,26]. 1956'da Lauer ve Slate, kalsiyum karbonat ve kalsiyum hidroksitten kristallerin oluşumu sonucu çatlak iyileşmesini gözlemlemiş [27], 1973 yılında Dhir ve arkadaşları düşük su/çimento oranına sahip ve azami gerilme yükü uygulayarak harçta üstün otojen iyileştirme geliştirmiştir [28].

1973 yılında ise Malinskii, polimerik malzemelerle çatlak iyileşmesinin gelişimini ilk inceleyen kişi olmuştur [29].

2.3. OTOJEN VE OTONOM İYİLEŞME

Betonun kendi kendini iyileştirmesi otojen ve otonom olmak üzere ikiye ayrılır [30]. Otojen iyileşme, kimyasal reaksiyon oluşumuna ve suyun tutulumuna dayanan kendiliğinden çatlak iyileşme olgusudur. Çatlak genişliğinin daralması aynı zamanda otojen iyileşmeyi kolaylaştırdığı için otojen iyileşme kategorisinde değerlendirilir. Otojen çatlak iyileşmesi, suya yakın olan çimento parçacıklarının daha fazla hidrate olması ve kalsiyum karbonatların (CaCO_3) kristalleşmesiyle ilişkilidir [31, 32]. Araştırmacılar, matris içindeki partiküllerin hidrasyonuna suyun eklenmesiyle önemli yerlere geldiği hususunda hemfikir olmaktadırlar

[33]. Su, çimentolaşmış plakalarla bir araya geldiğinde çözünme ve $\text{Ca}(\text{OH})_2$ gibi hidratların birikmesi gerçekleşmektedir [30].

Çimento ağırlığının yaklaşık % 75'i dikalsiyum silikat (C_2S) ve trikalsiyum silikattır (C_3S); bu, çimentolu bir matristeki su ile birleştirildiğinde, çözünmemiş haldeki kalsiyum hidroksit ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) parçacıkları silika ile reaksiyona girer ve kalsiyum karbonat çökmesi meydana gelir. Bu sayede de çatlak iyileşmesi gerçekleşir [35]. Hidratasyonla çatlağın kendiliğinden iyileşmesinin ancak 7,5 ve üzeri pH seviyesinde gerçekleşmekte olduğu gözlemlenmiştir [36]. Neville ise bu konudaki çalışmasında, temelde erken yaştaki beton için hidrate olmamış partiküllerin hidratasyonunu ve sonraki aşamada çatlatılmasını amaçlamıştır [31].

Otonom iyileşme ise, iyileşmeyi sağlayan reaksiyon ve mekanizmaların beton içerisine bu amaçla eklenen malzemelerin aktifleşmesiyle gerçekleşir [37]. Yapılan çeşitli çalışmalarda, beton yapıların bu tür mikro çatlakların otonom iyileşmesi için belirli bir kapasiteye sahip olduğu belirtilmiştir [31, 38-40]. Mikro çatlak iyileşmesinin gerçek kapasitesi, esas olarak beton karışımlarının bileşimi ile ilişkili görünmektedir. Özellikle yüksek bağlayıcı içeriğine sahip karışımların, matrise gömülü hidrate olmamış çimentoların gecikmiş (ikincil) hidratasyonu ve çatlak giriş suyu ile reaksiyona giren parçacıklar sayesinde olağanüstü çatlak iyileştirme özellikleri olduğu görülmüştür [40]. Geleneksel fakat aynı zamanda yüksek bağlayıcı içerikli karışımlardaki çatlakların kendiliğinden iyileşmesi 0,2 mm'den küçük bir genişliğe sahip çatlaklarla sınırlı görünmektedir [31, 40]. Bu sınırlı etki, büyük ölçüde, çatlak yüzeyinde açığa çıkan küçük, hidrate olmamış çimento parçacıklarının kısıtlı genişleme potansiyeline bağlı olarak ortaya çıkmaktadır. Yüksek bağlayıcı içerik karışımlarının sadece kendi kendini iyileştirme kapasitelerini arttırmak amacıyla uygulanmasına yönelik bir başka sınırlama, mevcut çimento üretiminin, küresel antropojenik CO_2 emisyonlarına yaklaşık % 7 katkıda bulunması sebebiyle sürdürülebilirlik yönünden betonda seyrek çimento kullanımını savunan mevcut politikalar [41].

Çatlak genişliğinin azaltılması, otojen bir işlem olarak kabul edilir [42]. Li ve arkadaşları, çatlak genişliğini kontrol etmek ve matris için mekanik takviye olarak polietilen kullanmak suretiyle "Mikromekanik Olarak Tasarlanmış Çimento Esaslı Kompozit'i" (ECC) ilk kullananlardır ki; iki katkı maddesinin her biri için ortalama çatlak genişliğinde 50 μm ve 30 μm 'ye kadar bir azalma elde edildiği yönünde sonuç buldukları görülmüştür [43]. Daha sonra, Polivinil alkol (PVA) kullanılarak yaptıkları çalışmada, polimerin betonun 100 katı

değerinde olan % 3 ila % 5 arasında değişen gerilme kapasitesi nedeniyle 60 µm 'lık bir çatlak genişliğinde azalma elde edildiği görülmüştür [44]. 2013 yılında yapılan bir çalışmada ise, Herbert ve Li, Ann Arbor'da (Michigan, ABD) 12 ay boyunca doğal çevre koşulları altında ECC kullanarak ortalama 20 µm genişliğindeki çatlakları iyileştirmişlerdir [45].

1960'larda, Süper Emici Polimerler (SAP) geliştirilerek beton karışımlarında otojen çatlak iyileştirici malzeme olarak kullanılmaya başlanmıştır [46]. SAP'ler, sahip oldukları kütlelerine oranla kendilerini çevreleyen ortamda önemli miktarda sıvı emebilen ve bünyesinde tutabilen çapraz bağlı polimerik malzemeler olup, 12 pH seviyelerinde boyutlarının 500 katına kadar genişleyebilir özelliğe sahiptirler [47-49]. Hidrojeller olarak sınıflandırılan su emici polimerler, su molekülü ile hidrojen bağı yoluyla sulu çözeltileri emerler. Bu yüzden de SAP'ın suyu emme kabiliyeti sulu bir çözeltinin iyonik konsantrasyonunun bir faktörü olarak görülebilir. Kim ve Schlangen, çatlak genişliğinin azaltılması ve iyileştirilmesi için harç karışımında PVA (polivinil alkol) bazlı ECC (Tasarlanmış çimentolu kompozit) içeren SAP'ları kullanmış olup, kontrol numunelerine kıyasla çimentonun % 0,5 ve % 1,0 SAP içerdiği görülmüştür [47]. Deney, laboratuvardaki kür koşullarında, ıslak ve kuru döngü altında gerçekleştirilmiştir. Numuneler 28 günlükken, çatlak oluşturmak için dört noktalı eğilme testi tabii tutulmuştur. SAP'ların içeriğine göre ortalama 17.3 mm ve 15.7 mm genişliğinde çatlak oluşumu gözlenirken kontrol numunesinde 22.3mm'lik çatlak oluşumu gözlemlenmiştir. 28 gün sonra, numuneler dört noktalı eğilme testine tabii tutularak maksimum yüklemeye kadar test edilmiş olup araştırmacılar, iyileştirilmiş numunelerin kontrol numunelerine kıyasla ekstra eğilme mukavemeti ve sapma gösterdiği sonucuna varmışlardır.

Son yıllarda kendi kendine iyileşmede biyoteknolojik şifa kaynağı olarak bakterilerle çalışmalar yapılmaktadır. Bakteriye iyileşme için uygulanan yol, uygun bir besin kaynağı sağlamak ve fotosentez, sülfat indirgemesi ve üre hidrolizi üretimi gibi metabolik işlemlerin bir sonucu olarak çökeltilmiş kalsiyum karbonat elde etmekten ibarettir. Bundan dolayı biyo-iyileştirme, gelişen beton iyileştirme yöntemlerinden biridir.

2.4. KENDİLİĞİNDEN İYİLEŞEBİLEN BETON / HARÇ

Kendiliğinden iyileşebilen beton/harç, bünyesinde herhangi bir çatlak oluşması halinde hiçbir dış müdahaleye gereksinim olmadan, beton/harç içerisindeki çözünmüş Ca^{+} iyonları ile CO_2

arasında gerçekleşen reaksiyon sonucunda oluşan CaCO_3 'ın çatlakları doldurmasıyla kendini onarabilen bir beton/harç türüdür. Betonlar, yapıları gereği nispeten kendilerini onarabilmektedir fakat kendiliğinden iyileşebilen betonlarda bu iyileşme ‐otojen iyileşme‐ olarak adlandırılmakta olup gelişigüzel gerçekleşmektedirler. Bu betonları diğer betonlardan en önemli özellik bünyesinde iyileşmeyi sağlayan maddeler bulundurmasıdır. Bu sayede ‐otonom iyileşme‐ öngörülebilir halde sağlanabilir. Bu zamana kadar geliştirilmiş betonlar içinde en popüler durumda olanı, iyileşmeyi sağlayan madde olarak bakterilerin kullanıldığı biyobetonlardır.

Elle yapılan tüm onarımlarda, doğrudan veya dolaylı olarak oluşan maliyetler ve verimlilik kaybı bir yana, bazı çatlakların görünür veya erişilebilir olmadığı ve dolayısıyla onarımlarının mümkün olmadığı durumlar söz konusudur. Bundan dolayı, çatlak içerisinde gömülü halde mevcut bulunan bir iyileştirme mekanizmasının varlığı kendiliğinden iyileşme için çok büyük önem taşımaktadır.

Betonlarda, çeşitli yük faktörleri ve çekme kuvvetleri sebebiyle çatlak oluşumu kaçınılmazdır. Oluşan bu çatlaklardan içeri sızabilecek zararlı iyonlarında betonu hassas hale getirmesiyle dayanım ve dayanıklılık yönünden beton kalitesinde ciddi bir düşüş yaşanmaktadır. Çatlakların varlığı malzemenin/yapıların hizmet ömrünü azaltması nedeniyle bakım ve onarım ihtiyacını doğurmaktadır. Sonradan yapılacak bakım ve onarımlarda sermaye ve işgücünün yanı sıra ihtiyaçtan fazla tamir malzemesinin kullanılabilmesi sebebiyle çevresel kirliliğe de yol açmaktadır. Betonda sağlanan kendiliğinden iyileşme olgusu ise, hem elle onarımı azaltma konusunda, hem de mevcut çatlaklarının genişliğinin artmasının ve yayılmasının kendiliğinden engellenmesi konusunda fayda sağlayabilmektedir.

2.4.1. Otonom İyileşme Ajanı: Bakteriler

Bakteriler prokaryot hücre yapısına sahip tek hücreli mikroorganizmalardır. İlk kez 1676 yılında, Antonie van Leeuwenhoek tarafından tek mercekli mikroskopla görüntülenen bakteriler, birkaç mikrometre uzunluğunda olup küresel, spiral, çubuk, virgül vb. şekilli olabilmektedirler [50]. İkiye bölünerek çoğalırlar. Optimum şartlar sağlandığında ortamdaki bakteri sayısı her 8-9 dakikada iki katına çıkabilir [51, 52]. Bazı bakteriler genellikle ortamdaki gıda maddelerinin azaldığı zaman veya çevresel şartların değiştiği yani kendileri için uygun olmadığı anda endospor oluştururlar. Ortam şartları normale döndüğünde yeniden vejetatif yani hücre formuna dönerler. Spor formları çoğalma aracı değildir. Ancak spor

formlar ısı, ışık, radyasyon, pH gibi çeşitli fiziksel faktörlere ve kimyasal maddelere karşı vegetatif hücrelerden daha dayanıklıdır [53]. Bakteriler Gram boyanma özelliğine göre Gram pozitif ve Gram negatif bakteriler olmak üzere ikiye ayrılırlar. Gram boyanmadaki bu farklılık bakterilerin hücre duvarındaki farklılıktan dolayıdır [54]. Bakteriler, laboratuvar koşullarında, katı veya sıvı besiyerlerinde çoğaltılırlar. Katı besiyerinde belirli bir bakteri suşunun saf kültürü elde edilebilir [55].

Dünyada yüksek organizasyonlu canlıların ortaya çıkışından milyarlarca yıl önce oluşan bakterileri de içeren mikroorganizmalar, dünyadaki biyokütlenin esas kısmını oluşturmakta ve diğer organizmaların yaşamını sürdürebilmesi için gerekli olan çok sayıda kimyasal reaksiyonları gerçekleştirmektedir [53]. Mikroorganizmalar toprakta, denizde, yer kabuğunda, yeraltında, deride, hayvan bağırsaklarında, buzullarda, hidrotermal bacalarda, kimi zaman asitli sıcak su kaynaklarında ve bazen de radyoaktif atıklarda bulunup çoğalabilirler [56].

Ekstrem koşullarda yaşayan mikroorganizmaların insanlık adına faydalı işlerde kullanılabileceğinin keşfi ile bu alanda yapılan çalışmalar hız kazanmıştır. Giderek artan antibiyotik dirençliliğine karşı yeni antibiyotik üretmek, çevre kirliliğinin giderilmesi, yeni enzimlerin keşfedilmesi için özellikle ekstrem ortamlardaki mikroorganizmaların izolasyonu yapılmaktadır [53]. Mağaralar da ekstrem ortamlardan biridir. Buradaki mikroorganizmaların mağara yüzey oluşumlarında rol oynamalarını sağlayan CaCO_3 oluşturma yetenekleri, bu bakterilerin kendi kendini iyileştiren betonlarda kullanılarak etkin sonuçlar alınabileceği fikrini doğurmuştur.

2.4.2. Kendiliğinden İyileşebilen (Bakteriyel) Betonun/Harcın Avantaj ve Dezavantajları

Avantajları [57];

- 1) Mikrobiyal beton çatlakların iyileşmesine yardımcı olur.
- 2) Betonun basınç dayanımında iyileşme sağlar.
- 3) Donma - çözülme çatlağı azaltılmasında daha iyi direnç gösterir.
- 4) Beton geçirgenliğinde azalma sağlar.
- 5) Betonarme korozyonunun azaltılmasını sağlar.

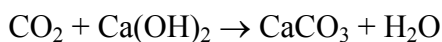
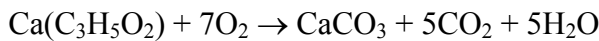
- 6) Kendi kendini iyileştiren bakteriler, bakım ve onarımın insan eliyle zor yapılabileceği yerlerde kullanılabilirler. Bu sayede tehlikeli alanlarda insan hayatı riski azaltılır ve ayrıca yapının dayanıklılığı artırılır.
- 7) Çatlak oluşumu daha ilk aşamada iyileşebilecek ve bu sayede yapının kullanım ömrü beklenenden daha fazla arttırılabilecektir.

Dezavantajları [57];

- 1) Bakteriyel betonun maliyeti geleneksel betonun maliyetinden daha fazladır.
- 2) Bazı atmosfer koşullarında bakteri üremesi iyi olmamaktadır.
- 3) Bakterili karışım betonları için I.S. kodu bulunmamaktadır.

2.4.3. Kendiliğinden İyileşebilen Beton Mekanizması

Hidratasyon için yetersiz kalan su vb. birçok nedenden dolayı beton yüzeyinde çatlaklar oluşur. Kendiliğinden iyileşen bakteriyel betonlarda ise, betonun genetik olarak çatlak iyileştirme kapasitesi, son zamanlarda yapılan çalışmalardandır. En temelde, tipik olarak 0,05 ila 0,1 µm genişliğinde mikro çatlakların, özellikle tekrarlayan kuru / ıslak döngülerde tamamen kapandığı gözlenmiştir. Bu otojen iyileşme, esas olarak, beton matriksinde bulunan ve kısmen reaksiyona giren çimento parçacıklarının ikincil hidratasyonundan kaynaklanmaktadır. Kılcal kuvvetlerden dolayı su, değişen ıslak ve kuru döngüler altında tekrar tekrar mikro çatlaklara doğru çekilir, bu da kalsiyum silikat hidratlar (C-S-H) ve kalsiyum hidroksit (CaOH) oluşumuna bağlı olarak sulu çimento parçacıklarının genişlemesine neden olur. Bu reaksiyon ürünleri, çatlak genişliğinin küçük olması şartıyla çatlakları tamamen kapatabilirler. Daha büyük boyutlu çatlaklar, sınırlı miktarda reaksiyona girmemiş çimento parçacıkları nedeniyle kısmen doldurulabilir, böylece çatlak yüzeyinde sadece ince bir hidratasyon ürünü tabakası oluşur. Çatlak sızdırmazlık kapasitesine gelince, çimento parçacıklarının ikincil hidratasyonuna homolog olan bir işlem karbonatlaşma işlemidir. Su kasıtlı olarak çatlağa zorlanır ve öncül aktifleştirilir [57]. Aktive edilmiş bu öncüller ile bakterilerin reaksiyona girmesiyle kireçtaşı olarak adlandırılan kalsiyum karbonat birikimi oluşur. Bu reaksiyonların kimyasal denklemi aşağıda verilmiştir.



Denklem 2.1

Bu kimyasal reaksiyonlar sonunda bakteriler kalsiti çökelterek betondaki gözenekleri ve çatlakları tıkeyabilirler. Bu mikrobiyolojik olarak indüklenen kalsiyum karbonat çökeltmesi (MICCP), bir dizi karmaşık biyokimyasal reaksiyondan oluşur. Yapılan bir çalışmada görüldüğü üzere metabolizmanın bir parçası olarak, *Bacillus subtilus*, CO₂ ve amonyak üretmek için üreyi katalize eden üreaz enzimini üretir. Bu enzim, Ca₂⁺ ve CO₃⁽⁻²⁾ iyonlarının CaCO₃ olarak çökeldiği ortamda pH artışına neden olur. Bunlar, bakteriler kalsiyum laktatlı besinleri kullanarak, daha da genişleyen ve büyüyen kalsiyum karbonat kristalleri oluşturur. Tüm boşluklar dolana kadar kristaller genişlemeye devam ederler [57].

Standart betonun hala kullanıldığı yerlerde, standart betonun yerine bakterili kendiliğinden iyileşebilen betonun kullanımı için bir potansiyel vardır. Kendi kendini iyileştirme özelliklerine sahip olmanın avantajı, her bir betonun doğası nedeniyle yapısında meydana gelebilecek çatlakların, insan eli değmeden kontrol edilip azaltılarak tamir edilebilmesidir. Kendi kendini iyileştiren beton formu, beton yapı üzerinde veya içinde oluşan hasarları sürekli olarak iyileştirmek için tasarlanmıştır. Herhangi bir boyut, şekil veya projenin beton yapısının ömrünü uzatmak ve elemanlardan çelik takviyelere ekstra koruma sağlamak için çalışılmıştır. Bu süreçte para tasarrufu sağlanabilir, yapıların dayanıklılığı çok daha uzun süre devam ettirilebilir ve beton endüstrisi çok daha sürdürülebilir bir ürün ortaya çıkartmış olarak CO₂ salınımı etkili bir şekilde azaltılabilir [57].

2.4.4. Bakteriyel Beton/Harç ile İlgili Yapılan Diğer Çalışmalar

Mikroplarla kendiliğinden iyileşme kalsiyum karbonatın, kalsiyum laktat gibi kalsiyum bileşiği üzerine *Bacillus subtilis* dahil bakteri türlerinin doğrudan etkisi ile veya *Bacillus sphaericus* [58-60] gibi üreolitik bakteriler tarafından üre yapılmasıyla çatlaklarda çökmesini içerir. Kalsiyum karbonatın mikroplarla çökertilmesi betonla uyumludur ve oluşum süreci çevre dostudur [61]. *Bacillus sphaericus*'un insana zararsız olduğu bilinmektedir [62]. Ek olarak, CaCO₃ üretimi sırasında oksijen tüketilir ve dolayısıyla donatı korozyon riskini azaltır. *Bacillus* türü, yüksek alkali çevreye tolerans ve nem ve ayrıca betonda kendi kendini iyileştirme ajanı olarak kullanılmasını uygun kılan sporlar oluşturma kapasitesini içeren niteliklere sahiptir. Bu nedenle, *Bacillus* en çok kalsit çöktürme için biyo-ajan olarak araştırma çalışmalarında kullanılmıştır [58- 60, 63- 65].

Kendiliğinden iyileşen ajanlar olarak aerobik mikroorganizmaların (*Pseudomonas aeruginosa* ve *Bacillus pasteurii*) kullanımı, çimento harcının basınç dayanımında % 18 iyileşme

göstermiştir. Jonkers yaptığı çalışmada, betonda meydana gelen çatlakların iyileşmesinde kendi kendini iyileştirme ajanı olarak bakteri kullanımını araştırmıştır [66]. De Muynck ve arkadaşları, *Bacillus sphaericus* bakterileriyle yüzeyde karbonat birikimi ile çimentolu malzemelerin dayanıklılığının geliştirilebileceğini göstermiştir [67]. Ramachandran ve arkadaşları, alkali reaksiyonu, donma - çözülme saldırısı, sülfat etkisi, kuruma ve büzülme karşı direnç gösterecek şekilde betonun dayanıklılığını arttırmak için bakteri kullanımını bildirmiştir [68]. Achalet ve arkadaşları, betondaki su emme ve basınç dayanımına olan etkisini görebilmek için *Bacillus sp.* CT-5 bakterilerini karışıma ekleyerek basınç dayanımında %36'ya varan bir artış ve kalsit birikimi nedeniyle de mikrobiyal numunelerin kontrol numunelerine oranla daha az su emdiğini tespit etmiştir. Bu durumda, “ mikrobiyal beton” üretimi için *Bacillus* türlerini kullanarak inşaat malzemelerinin dayanıklılığının artırabileceğini göstermektedir [69]. Ghosh ve arkadaşlarının yapmış olduğu bir çalışmada, çimentoda dayanımı arttırmaya yönelik mikrobiyal kaynaklı bir mineral çökeltme yöntemi tanımlanmıştır [70]. Karışım suyuna 10^5 hücre/ml aralığında, termofilik ve anaerobik bakteri ilavesi ile 28. günde çimento harcının basınç dayanımında % 25 artış gözlenmiştir. Dayanım artışı, kum-çimento matrisinin gözenekleri içindeki dolgu malzemesinin artmasından kaynaklanmıştır. Jonkers ve Schlangen, kendi kendini iyileştiren beton gelişimi için bakteri sporlarının uygulanmasının uygulanabilirliğini test etmiştir [71]. Çalışmada üç farklı bakteri türü olan *Bacillus cohnii*, *Bacillus halodurans* ve *Bacillus pseudofirmus* çimentoyla karıştırılarak karışıma eklenmiştir. Çimento taşı parçacıkları, maya ekstraktı ve pepton bazlı ortamda sertleştirildikten sonra basınç ve gerilme mukavemeti açısından testler yapılmıştır. Alınan sonuçlar kontrol numuneleriyle kıyaslandığında aralarında anlamlı bir fark tespit edilememiştir. Taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntülerinde ise, 12 günlük inkübasyondan sonra kalsiyum karbonat kristallerinin çökeldiği görülmüştür. Bununla birlikte, bu ön araştırmada organik karbon kaynakları veya bakteri için gıda dışarıdan sağlanmış ve numuneler, ortam içinde kürlendikten sonra çimlenme gözlenebilmiştir.

Öncü mineral bileşiği ile birlikte maya özü ve pepton ilavesinin muhtemel etkisiyle ilgili bir çalışma Jonkers ve arkadaşları [63] tarafından yapılmıştır. Kendi kendini iyileştirmenin gerçekleşebilmesi için birincil zorluk, bakterilerin betonun son derece alkali olan ortamında hayatta kalmasıdır. Jonkers ve arkadaşları da, betona doğrudan dahil edilirken canlı kalabilen bakteri türleri tarafından üretilen karbonat presipitasyonunun potansiyelini araştırmış olup bu araştırma için iki tür spor oluşturan alkalifilik bakteri türü olan *Bacillus pseudofirmus* ve

Bacillus cohnii'yi kullanmışlardır. Öncü bileşik olarak da kalsiyum asetat ve kalsiyum laktat kullanılmıştır. Yalnızca kalsiyum laktatın basınç dayanımını etkilemediği, sadece çok hafif bir artışa neden olduğu görülmüştür. Örneklerde 20-80 µm büyüklüğünde kalsiyum karbonat kristalleri gözlenmiştir fakat bu kristaller yalnızca 7 günlük genç örneklerde gözlenmiş olup 28 günlük örneklerde gözlenememiştir. Bu durum, betonun alkali ortamına bağlı olarak yaşayabilir bakteri sporlarındaki azalma ve Luo ve arkadaşları tarafından da desteklenen küçültülmüş gözenek büyüklüğünden de kaynaklanıyor olabilir [72]. Bununla birlikte, bu mekanizmanın üreazlı yaklaşımdan daha iyi olduğu ileri sürülmektedir. Çünkü, donatı korozyonuna neden olabilecek fazla miktarda amonyak veya beton matrisini bozabilecek başka metabolizmalarla nitrik asit üretilmeyecektir. Luo ve arkadaşları, alkali dirençli spor oluşturabilen bakterileri doğrudan substrat ile birlikte betona ekleyerek çatlak genişliğinin, küre koşullarının ve çatlama yaşının etkilerini araştırdılar [72]. 0,1 ve 0,5 µm'lik çatlaklar oluşturulmuş olup çatlama sonrası 25 °C'de üç farklı inkübasyon koşulu olan ıslak küreleme, su kürelemesi (suya batırma) ve ıslak-kuru döngüleri denenmiştir. 7, 14, 28, 60 ve 90 günlük numunelerde farklı yaşlardaki çatlamların iyileşme oranı ölçülmüştür. Suda kürlenmede 0,3 µm'ye kadar iyileşme gözlenmiş olup 0,1 ile 0,3 µm arasındaki çatlaklarda iyileşme oranının yaklaşık %85 olduğu tespit edilmiştir. Kürlenme koşulları içinde suda kürlenme ve ıslak-kuru döngüleri en iyi sonuçları vermiş olmasına rağmen ıslak-kuru döngülerde onarım hızı daha yavaş gerçekleşmiştir. Erken yaştaki çatlaklarda onarım etkili bir şekilde sağlanabilirken, ileriki yaş çatlaklarında etkili bir sonuç alınamamıştır. Bu duruma bakterilerin etrafında koruyucu bir kabuk olmaması sebebiyle hayatta kalmalarının düşük olmaları sebep gösterilmiştir [72].

Bir araştırmada, bakteri bazlı karışımlar hasarlı yüzeylere püskürtüldüğünde veya çatlaklara el ile uygulandığında, oluşan mineral çöküntüsü (CaCO₃) ile yüzey çatlaklarının etkin bir şekilde kapandığı gözlemlenmiştir [73]. Diğer bir çalışmada da, benzer sonuçlar elde edilmiş olup yapılan SEM ve XRD incelemelerinde çatlakların büyük oranda kapandığı, aynı zamanda betonlarda su geçirgenliğinde de azalma olduğu tespit edilmiştir [74]. Bu çalışmalarda olduğu gibi, bakterilerin elle ve dışarıdan, mevcut yapılara uygulanmasıyla, bu onarım tarzı gerçek anlamda kendi kendini iyileştirme olarak kategorize edilemediğinden, çeşitli takip çalışmalarında, canlı bakterilerin sürdürülebilir ve betona gömülü kendi kendini iyileştirici ajan olarak kullanma olasılığı araştırılmıştır [63, 66].

CaCO₃ çökmesi, ürenin, alkalifilik mikroorganizma tarafından üretilen üreaz enzimi ile biyokimyasal reaksiyona girmesi ve reaksiyon sonucunda ortamda bulunan Ca⁺² iyonlarının HCO⁻³ iyonlarıyla birleşmesiyle meydana gelmektedir [75, 76]. Üre hidrolizi için yapılan çalışmalarda genellikle *Bacillus* türü bakteriler kullanılmıştır. Yapılan bir çalışmada, *Bacillus* türü bakterilerin en bilinenlerinden olan *B.sphaericus* ve *S.pasteurii* model organizmaları (suşları) kullanılarak CaCO₃ oluşturma durumları ve dayanıklılık farkları belirlenmeye çalışılmıştır. Üretilen beton numuneleri bu bakterileri içeren süspansiyonlara maruz bırakılarak ortamdaki CaCO₃ miktarı XRD ve SEM ile görüntülenmiştir. Çalışmanın sonucunda, *B. sphaericus* bakterisinin *S. pasteurii* bakterisine göre daha fazla CaCO₃ çökeltisi oluşturduğu tespit edilmiştir. Ayrıca bu organizmaların üreaz aktivitesi sonucunda oluşan CaCO₃ çökeltilerinin, beton numunelerinde su geçirgenliğini önemli oranla azalttığı görülmüştür [77].

2015 yılında, Amerikan Tip Kültür Koleksiyonu'ndan alınan bir bakteri suşu ile harç numuneleri üzerinde biyomineralizasyon testi yapılmıştır. *Sporosarcina pasteurii* adlı bakteri hücrelerinin kültürlenmesi için, steril şartlar altında, tris bazı, üre, maya özütü ve deiyonize saf su kullanılarak pH'ı 9 olan bir besi yeri hazırlanmıştır. Bakteri hücrelerinin aerobik ortamda büyümesi sağlanarak, periyodik olarak alınan örneklerle petri kaplarına yerleştirilip inkübe edilmelerinden 24 saat sonra hücre konsantrasyonları belirlenmiştir. Bakteri hücreleri üssel büyüme safhasına eriştiklerinde, karışım suyuyla birlikte çimento hamuruna dahil edilip kürlenerek harç numuneleri oluşturulmuştur. Yapılan deneyler sonucunda, test numunelerinde belirgin bir oranda CaCO₃ artışı gözlemlenmiş olup çimento hamuruna dahil edilen bakterilerin biyomineralizasyon sağlayabildikleri belirlenmiştir. Bununla birlikte, harç numuneleri içindeki boşluk oranlarının azalarak numunelerin basınç dayanımlarının arttığı görülmüştür [78].

Harshaki ve arkadaşlarının yaptığı bir çalışmada, basınç dayanımı test sonuçlarında, bakterili numunelerdeki dayanımın geleneksel beton numunelerine kıyasla daha fazla olduğu görülmüştür [79]. Sırasıyla 3,7 ve 28 günlük numunelerde ml başına 10¹⁰ hücre konsantrasyonunda %1,15, %3,05 ve %15,08 oranında önemli bir basınç artışı görülmüştür. Eğilme testi 28. gün sonunda yapılmış olup bakteriyel betonda %5,18 oranında bir mukavemet artışı tespit edilmiştir. 28. gün sonunda yapılan su emme testleri, etüvde kurutulan numuneler üzerinde gerçekleştirilmiş olup bakteriyel betonlarda su emiliminin geleneksel betona oranla daha az olduğu görülmüştür. Bakterilerin kullanımıyla birlikte, taze beton

gözeneklerinde kalsitlerin oluşumuyla betonun basınç dayanımı, dolayısıyla da yapının dayanıklılığının geleneksel betona göre daha iyi olduğu görülmüştür. Kendi kendine iyileşme sürecinde çatlakları tıkararak onarımlarını sağlayan maddenin kalsiyum karbonat kristalleri olduğu da bu çalışma sonucunda tespit edilmiştir.

Yapılan bir başka çalışmada, *B. sphaericus* cinsi bakterinin, kireç taşları üzerinde, farklı üre ve CaCl_2 konsantrasyonlarındaki etkisi belirlenmeye çalışılarak en fazla CaCO_3 çökmesinin 20 g/lit üre ve 50 g/lit CaCl_2 içerikli solüsyonlarda gerçekleştiği görülmüştür [80]. Farklı bölgelerden alınan toprakların, üre ve Ca kaynağı içeren solüsyon ve bakteri süspansiyonuna maruz bırakılmasıyla su geçirgenliklerinde yüksek oranda azalma olduğu görülmüştür [81].

28 gün boyunca farklı konsantrasyonlardaki *B. pasteurii* bakterileriyle bir arada tutulan çimento numuneleri ile hiçbir işlem uygulanmayan numuneler karşılaştırıldığında, betonda yaklaşık %33 oranında bir mukavemet artışı olduğu gözlemlenmiştir [82]. Beton ve harçlarla yapılan deneylerde, ürolitik bakterilerin üreaz aktivitesi sonucu ürettiği CaCO_3 'ın numunelerde sıkıştırılabilirliği arttırdığı ve yapılan SEM analizlerinde bakteri hücreleriyle karbonat kristallerinin birleşik hale geldiği görülmüştür [83].

Bir başka çalışmada, *Bacillus* cinsi ile ilgili spesifik alkali dirençli bakterilerin sporları, kendiliğinden iyileştirici ajan olarak beton karışımına eklenmiştir. Bu sporlar, çatlak giriş suyu ile aktivasyondan sonra çimlendirilmiş ve aynı zamanda, beton karışımına ilave edilmiş olan öncül organik bileşiklerin dönüştürülmesi yoluyla, çatlak dolgulu kalsiyum karbonatlı minerallerin bol miktarda üretilmesini sağlamıştır. Bununla birlikte, bu çalışmada, bakteri bazlı kendi kendine iyileşme potansiyelinin, sadece 7 gün kürlenmiş nispeten genç beton ile sınırlı olduğu bulunmuştur. Çünkü, beton matrikse doğrudan gömülü (korunmasız) bakteriyel sporların canlılığı ve ilgili aktivitesi yaklaşık iki ay sınırlandırılmıştır [63, 66] .

Yapılan bir diğer çalışmada, bakteri sporları ve organik mineral öncü bileşikleri, beton karışımına ilave edilmeden önce gözenekleri genişletilmiş kil parçacıklarına doldurulmuştur [58] . Gözenekli hafif agregalar içindeki bakteriyel sporların korunmasının, canlılık süresini ve dolayısıyla malzeme matriksine gömüldüğünde betonun kendiliğinden kapanma işlevselliğini arttırdığı görülmüştür.

Kendini iyileştiren beton üretimi konusunda yapılan başka bir çalışmada, bakteri bazlı iyileştirici ajanlar (bakteri sporları ve beton matrisine dahil edilen organik bileşikler) yani

iyileştirme maddeleri, karışıma karıştırılması sırasında ve çimento matrisinin yüksek alkalitesinden dolayı hareket etmesini ve kırılmasını engellemek amacıyla kapsüllenerek hafif agrega (LWA) içine gömülmüştür [84]. Çatlak oluşumu üzerinde, zayıf kapsüllerin kırılmasıyla iyileştirici ajanlar CaCO_3 'ü çökelterek açık çatlağı doldurmuştur. Çatlama ve iyileşme sonrasında su geçirmezliğin ve dayanımın geri kazanımının sağlandığı tespit edilmiştir [38, 39, 85,86]. |



3. MALZEME VE YÖNTEM

Bu tez çalışmasında, İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa İnşaat Mühendisliği Bölümü Yapı Anabilim Dalı Laboratuvarı'nda mevcut bulunan ekipmanlar kullanılarak, 0,40-0,50-0,60 su/çimento oranlı 48 farklı seri kendiliğinden iyileşen harç çubuğu numunesi üretimi yapılmıştır. Üretilen numunelerde 3 farklı tip mağara bakterisi ve 3 farklı tip mineral katkı kullanılmıştır.

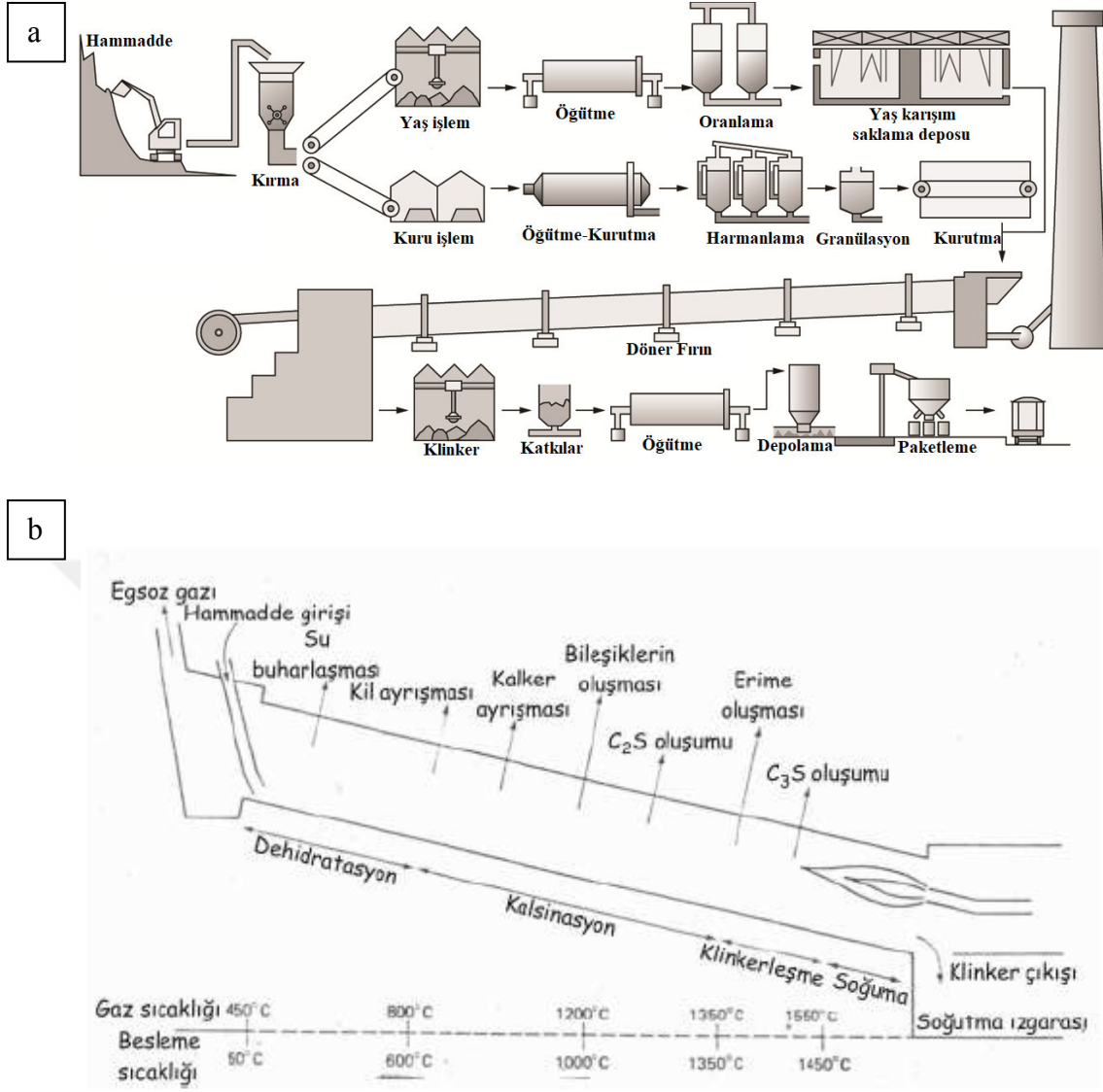
3.1. KENDİLİĞİNDEN İYİLEŞEBİLEN HARÇ BİLEŞENLERİ

Biyobeton, çeşitli işlemlere tabi tutulduktan sonra beton/harç karışımının içerisine eklenen bakterilerin, çatlak arayüzlerini CaCO_3 (kalsiyum karbonat, kireçtaşı) üreterek doldurmasıyla tamir olunan yeni nesil bir beton türüdür. Geleneksel beton/harç üretiminde kullanılmış olan TS EN 206-1 standartlarına uygun olan malzemeler, kendiliğinden iyileşen harç üretiminde de kullanılabilir [87].

Bu çalışmada, üretilen harç çubuğu numunelerinde aşağıda belirtilen çimento, mineral katkılar, kum ve bakterili karışım suyu kullanılmıştır.

3.1.1. Çimento

Çimento; kum, çakıl, tuğla vb. minerallerin bir arada tutulup yapıştırılması amacıyla kullanılan, ana ham maddeleri kalker, marn ve kil olan bağlayıcı bir yapı malzemesidir. Su ile reaksiyona girdiğinde sertleşmektedir. Öğütülmüş kil ve kalkerin (farin), $\sim 1400-1500$ °C'de döner fırınlarda pişirilmesiyle klinker elde edilir. Elde edilen bu klinkere, $\sim\%3-6$ oranında alçı taşı ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) ilave edilip toz halinde öğütülmesiyle Portland Çimentosu üretilmiş olunur (Şekil 3.1).



Şekil 3.1: Çimento üretim şeması (a) [88] / Döner fırında gerçekleşen reaksiyonlar (b).

Üretilen harç çubuğu numunelerinde, AKÇANSA Çimento A.Ş.'den temin edilen CEM I 42.5 R çimento tipi kullanılmıştır. TS EN 197-1 standardına uygun olarak kullanılan bu çimentoya ait fiziksel ve kimyasal özellikleri Tablo 3.1'de verilmiştir.

Tablo 3.1: Çimentonun fiziksel ve kimyasal özellikleri

Kimyasal Özellikler % Test Metodu: TS EN 196-2	Standartlar	CEM I 42,5 R	Fiziksel Özellikler Test Metodu: TS EN 196-3 ve TS EN 196-6	Standartlar	CEM I 42,5 R
MgO		1,38	Özgül Ağırlık Specific Gravity (gr/cm ³)		3,13
SO ₃ ⁻²	≤4,0	3,39	Priz Süresi Setting Time (Vicat-dk)	≥60	Başlangıç: 165 / Bitiş: 199
CaO		62,51	Hacim Genleşmesi Soundness (Le Chatelier-mm)	≤10	1
Fe ₂ O ₃		3,73	Özgül Yüzey-Blaine Specific Surface		3300
Al ₂ O ₃		5,20	45 µm elek kalıntısı Residue on 45 µm sieve		4,9
Çözünen SiO ₂ Soluble		19,97	90 µm elek kalıntısı Residue on 90µm sieve		0,3
Çözünmez kalıntı Insoluble Residue	≤5,0	1,08			
Tayin Edilemeyen		0,48	Mekanik Özellikler Test Metodu: TS EN 196-1	Standartlar	CEM I 42.5 R
Kızdırma Kaybı Loss on Ignition	≤5,0	2,06	*Erken Dayanım 2 gün	≥20,0 MPa	32,4
Serbest CaO Free Lime		1,51	*Erken Dayanım 7 gün		45,5
Cl ⁻	≤0,10	0,0400	*Standart Dayanım 28 gün	≥42,5 MPa <62,5 MPa	57,7
Na ₂ O/K ₂ O		0,37 / 0,87	* 40x40x160 mm kalıplar Karışım: 1 kısım çimento, 3 kısım CEN ref. kumu, 0,50 S/Ç ölçeği kullanılarak hazırlanan numuneler için		

3.1.2. Agregada (Kum)

Agregada, beton/harç üretim aşamasında kullanılan kum, çakıl ve kırmataş gibi malzemelere verilen genel addır [89, 90]. Betonda hacimce %60-75 oranında yer işgal ederler. Oluşumlarında göre, tane boyutlarına göre (ince-kaba) ve birim ağırlıklarına göre sınıflandırılırlar. İnce agregalar kum, kırma kum vb. iken kaba agregalar çakıl, kırmataş vb. malzemelerdir.

Harç çubuklarının üretiminde TS EN 196-1 (2016)'e uygun çapında Rilem kumu kullanılmıştır (Tablo 3.2).

Tablo 3.2: Rilem standart kumunun granülometrisi.

Elek Açıklığı (mm)	Kümülatif Elekte Kalan (%)
2,00	0
1,60	7(±2)
1,00	33(±2)
0,50	67(±2)
0,16	87(±2)
0,08	99(±1)

3.1.3. Mineral Katkılar

Çimento kütlelerinin %15 ile %60'ı oranında karışıma ilave edilerek kullanılabilen mineral katkıları, beton/harç karışımına eklendiklerinde dayanım ve dayanıklılıkta artış sağlayabildikleri gibi ekonominin sağlanmasına da yardımcı olurlar. Mineral katkıları, çimento gibi öğütülmüş olarak toz halinde depolanan yüksek fırın cürufu, silis dumanı, uçucu kül vb. maddeler olup tek başlarına bağlayıcılık özelliğine sahip değildirler fakat çimentoyla birlikte kullanıldıklarında, çimentoyla benzer şekilde görev yaparak çimento ekonomisine de katkıda bulunurlar [91].

Bu çalışmada harç üretimi yapılırken 3 farklı firmanın üretimi olan uçucu kül, yüksek fırın cürufu ve metakaolin kullanıldı.

3.1.3.1. Uçucu Kül (Pulvarize Yakıt Küllü)

Termik santrallerde elektrik üretimi için enerji sağlayabilmek amacıyla yakıt olarak pulvarize kömür kullanılmaktadır. Kömürün yanmasıyla ocak tabanında biriken küllerin ~%75-80'i gazlarla birlikte bacadan dışarıya yayılmaktadır. Yayılan bu küllere uçucu kül (pulvarize yakıt küllü) adı verilmektedir. Uçucu küller (UK) F ve C tipi olmak üzere iki tiptir. F tipi uçucu kül

puzolanik özelliğe sahip iken C tipi uçucu kül puzolanik özelliğine ek olarak belirli oranda bağlayıcı özelliğe de sahiptir [92].

Uçucu külün beton üretiminde kullanılmasının iki ana nedeni vardır. Bunlar beton maliyetinde azalma sağlaması ve taze ve sert betonu iyileştirmesidir. UK, hidrasyon ısısını düşürerek ve küresel partiküllerin oluşmasını sağlayarak, taze betonun kolayca karıştırılıp yerleştirilerek sıkıştırılmasını sağlar ve dolayısıyla stabilitesini artırır [93, 94].

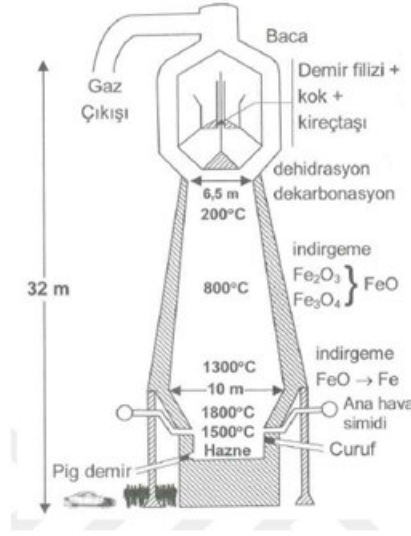
Bu çalışmada kullanılan uçucu kül, Türkiye'nin kuzeyinde, Çatalağzı/Zonguldak'taki termik santralden temin edilmiştir. İçeriğinin %70'ini 3 ana oksit olan Fe_2O_3 , Al_2O_3 ve SiO_2 oluşturmaktadır. Özgül ağırlığı 1,96 gr/cm³ olup 45 mikronluk elek analizi üzerinde kalan miktarı %25,09'dur (Şekil 3.2).



Şekil 3.2: Uçucu kül.

3.1.3.2. Yüksek Fırın Cürufu

Yüksek fırın cürufu (YFC), ham demirin üretimi sırasında oluşan atık maddelerden ya da yan ürünlerden biri olarak tanımlanabilir [95]. Demirin üretiminde, üretim kapasitelerine göre yüksekliği 30-90 m arasında değişen fırınlarda, demir filizi gangi, kok ve kireçtaşının yanması sonrası oluşan artıklar YFC'yi oluşturur (Şekil 3.3). YFC, hafif olması sebebiyle 1400-1600°C 'de ergimiş ham demirin üzerinde bulunur. Ana bileşenleri Portland klinkeri gibi kireç, silika, alümin ve kısmen demir oksitten oluşan ergimiş cüruf, uygun hızda suyun üzerine püskürtülmesiyle soğutularak amorf yapılı hale getirilir. Amorf hale getirilen ürün ince halde öğütülerek (400 ~ 800 m²/kg Blaine inceliğinde) tek başına ya da uygun aktivatörlerle birlikte kullanılarak hidrolik bağlayıcı niteliği kazanırlar [96].



Şekil 3.3: Demir üretiminde kullanılan yüksek fırın [97].

Bu çalışmada kullanılan yüksek fırın cürufu, Bolu Çimento Sanayi A.Ş firmasından temin edilmiştir. Cürufun özgül ağırlığı 2,91 gr/cm³'tür. Yapılmış analizlerde 45 mikronluk elek üzerinde %1,4'lük miktarı kalmaktadır. 28 ve 90 günlük deneylerde aktiflik oranları sırasıyla %77,6 ve %90,2'dir (Şekil 3.4).



Şekil 3.4: Yüksek fırın cürufu.

3.1.3.3. Metakaolin

Metakaolin, yakın dönemde yüksek mukavemetli ve yüksek performanslı beton ve harçların üretiminde, tamir harçlarında, su izolasyonu amacıyla yapılan sıvalarda, cam lifli betonların üretiminde kullanılmaya başlanan mineral bir katkı malzemesidir [98-100]. Saf kaolin kilinin 650-800 °C gibi yüksek sıcaklıklarda termal aktivasyonu ile elde edilir. Metakaolinin çimento bazlı malzemeler üzerinde dayanım ve durabilite özellikleri yönünden üç önemli etki mekanizması vardır. Bunlar filler etkisi, puzolanik reaksiyona girebilmesi ve PÇ'nin hidratasyon hızını arttırması olarak sıralanabilir. İçeriğinde yüksek oranda SiO₂ ve Al₂O₃ bulunması nedeniyle Ca(OH)₂ ile reaksiyona girerek kalsiyum silikat hidrat (C-S-H) yapısını

ve alümina içeren fazları (C_4AH_{13} , C_2ASH_8 , C_3AH_6) oluşturur. Bu oluşumlar sayesinde de üretilen betonlarda/harçlarda mekanik ve dayanım yönünden artışlar görülür [98-101].

Metakaolinin kullanıldığı betonlarda/harçlarda basınç, yarmada çekme ve eğilme dayanımlarında artış, donma-çözünmeye karşı yüksek direnç, azalan büzülme, düşük geçirgenlik, kimyasal etkilere karşı dayanıklılık, alkali-silika reaksiyonlarının (ASR) azalması, beton yapısının daha yoğun olması gibi durumlar tespit edilmiştir [98-100, 102-104]. Bazı çalışmalarda ise metakaolinin işlenebilirliği arttırdığı ve sonucunda daha düzgün bir yüzey elde edilebilmesine imkan sağladığı ve çiçeklenmeyi azalttığı görülmüştür [100, 104].

Bu çalışmada kullanılan metakaolin, Kaolin Endüstriyel Mineraller Sanayi ve Ticaret A.Ş. firmasından temin edilmiştir. Metakaolinin özgül ağırlığı $2,52 \text{ g/cm}^3$ 'tür. silis+alümin+demiroksit oranı %97,18 olup %70 oranından fazla olması sebebiyle mineral aktivitesi yüksektir (Şekil 3.5).



Şekil 3.5: Metakaolin.

Kullanılan bu mineral katkıların teknik özellikleri Tablo 3.3 ve Tablo 3.4'te verilmiştir.

Tablo 3.3: Metakaolin ve yüksek fırın cürufunun kimyasal özellikleri

Kimyasal Özellikleri (%)	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	B ₂ O ₃	Kızdırma Kaybı
Metakaolin	56.10	40.23	0.85	0.55	0.19	0.16	0.51	0.24	-	1.10
YFC	40,55	12,83	1,10	0,75	35,58	5,87	0,68	0,79	-	0,03

Tablo 3.4: Uçucu külün kimyasal özellikleri

Kimyasal Özellikleri (%)	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SO ₃	CaO	MgO	Serbest CaO	Na ₂ O	Cl	LOI
UK	54,08	26,08	6,681	0,735	2,002	2,676	0,11	0,79	0,092	1,36

3.1. 4. Karışım Suyu

Beton/harç üretiminde, içilebilir nitelikte olan bütün suların kullanımı uygundur [90,96]. Kullanılacak karışım suyu, TS EN 1008 standartlarını da sağlamalıdır. Beton/harç üretiminde karışım suyu kullanmanın temel sebepleri işlenebilirliği arttırmak ve çimentonun hidrasyonu ile oluşturulan karışımın sertleşmesini sağlamaktır.

Bu çalışmada, harç üretiminde ve üretilen numunelerin kürlenmesinde şehir şebeke suyu kullanılmıştır. Bakterili karışım suyunun kullanıldığı durumlarda, 24 saatlik Tryptic Soy Agar (TSA) besiyeri üzerinde çoğaltılan bakteri kültürlerinden bakteri sayısı mililitrede yaklaşık 10^9 hücre olacak şekilde süspansiyon hazırlanmıştır (Şekil 3.6).


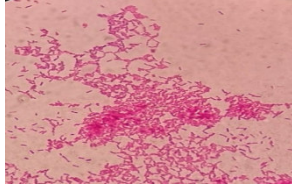
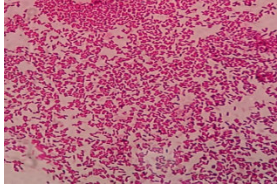


Şekil 3.6: Bakterili karışım suyu.

3.2. BAKTERİLER VE BAKTERİLERİN KRİSTALİZASYON OLUŞTURMA YETENEKLERİNİN İNCELENMESİ

Bu çalışmada, harç numuneleri üretilirken karışım sularında, daha önce bu konuda kullanıldığına literatürde rastlanılmamış olan kalsiyum karbonat presipitasyonu sağlayan mağara izolatları kullanılmıştır (Tablo 3.5). Bu izolatlar, yeni keşfedilmiş olan Yarık Düdeni Mağarası'ndan izole edilen *Bacillus thrungiensis*, *Pseudomonas putida* ve *Sphingomonas mucosissima* bakteri türleridir.

Tablo 3.5: Bakterilerin özellikleri

Kullanılan Bakteri	<i>Bacillus thuringiensis</i>	<i>Pseudomonas putida</i>	<i>Sphingomonas mucosissima</i>
Bakteri Kodu	Y214	Y234	Y151
Gram Özelliği			
Kristal Oluşumu	Pozitif	Pozitif	Pozitif

Daha önceden mağaradan izole edilerek -20°C ve -86°C 'de korumaya alınmış stok kültürleri olan Y214, Y234 ve Y151 kodlu bakterilerin kristal oluşturma yeteneklerini belirlemek amacıyla önceden otoklavda sterilize edilen ve 90 mm'lik petri kaplarına dökümü yapılan B4 besiyerine ekimleri yapılmıştır. Ekim işleminin ardından petri kutuları 28°C lik etüve kaldırılarak bekletilmiştir. Ekimden sonra her gün bakteri ekimi yapılan petri kutuları mikroskop altında incelenerek CaCO_3 yapısında kristal oluşturup oluşturmadığı kontrol edilmiştir. Kristalizasyon yaptığı tespit edilen bu bakteriler harç karışım suyuna eklenmesi gerektiğinde, 24 saat TSA besiyerine ekilerek çoğaltılmış ve bakteri sayısı mililitrede yaklaşık 10^9 hücre olacak şekilde süspansiyon hazırlanmıştır.

B4 Besi Yeri İçeriği (1000 ml için):

Kalsiyum asetat	2,5 gr
Maya özütü	4 gr
Glukoz	10 gr
Agar	18 gr

TSA besiyeri oluşturmak için; 1000 ml distile suya agar dışındaki maddeler eklenir ve su içinde çözündürülerek pH'ı 8.7 olarak ayarlanır. Agarın eklenmesinden sonra besiyeri ısıtılarak agarın erimesi sağlanır ve ardından otoklavda 15 dk 121°C 'de steril edilir. Otoklavdan çıkarılıp sonra uygun sıcaklığa ulaştıktan sonra steril koşullarda steril petri kutularına dökülür.

TSA İçeriği (1000 ml için):

Kazein pepton	15 gr
Soya Pepton	5 gr
NaCl	5 gr
Agar	15 gr

3.3. HARÇ ÜRETİMİ

Bu çalışmada tek tip çimento, 3 farklı su/çimento oranı, 3 farklı tip bakteri suşu ve 3 farklı mineral katkı kullanılarak 12 seri referans numunesi, 36 seri bakterili numune olmak üzere toplamda 48 seri numune üretimi yapılmıştır. Karışımda kullanılan ince agrega granülometrisi sabit tutulmuştur. Mineral katkı miktarları ise, çimentonun kütlece %20 'si oranında olacak şekilde seçilmiştir.

3.3.1. Numune Kodları

Harç çubuklarının üretimi yapılırken kullanılan kodlamalar aşağıdaki tablolarda görüldüğü şekildedir (Tablo 3.6). Burada 0,40- 0,50- 0,60 S/Ç oranları sırasıyla A-B-C olarak kodlanmıştır. Bakterilerden *Bacillus thuringiensis* (Y214), *Pseudomonas putida* (Y234) ve *Sphingomonas mucosissima* (Y151) sırayla 1-2-3 olarak kodlanmış olup bakterisiz yani referans numuneleri ise “ R” ile belirtilmiştir. Kullanılan mineral katkılar metakaolin “ M” ile, uçucu kül (UK) “ U” ile, yüksek fırın cürufu (YFC) ise “ O” ile gösterilmiştir (Tablo 3.7).

Tablo 3.6: Numune kodlaması

S/Ç	AD	Tür	Katkı Türü ve Kısaltmaları
0,4	A	Bakterili (1-2-3) Referans	Metakaolin (M)
0,5	B		Uçucu Kül (U)
0,6	C		Yüksek Fırın Cürufu (O)

Tablo 3.7: Açıklamalarıyla birlikte numuneler ve kodları

S/Ç Oranı	Kod	Referans (R)	Bakteri		Bakteri Türü			Mineral Katkılar		
			Var	Yok	1	2	3	M	O	UK
0,4	AR	✓		✓						
	ARO	✓		✓					✓	
	ARM	✓		✓				✓		
	ARU	✓		✓						✓
	A1		✓		✓					
	A1O		✓		✓				✓	
	A1M		✓		✓			✓		
	A1U		✓		✓					✓
	A2		✓				✓			
	A2O		✓				✓		✓	
	A2M		✓				✓		✓	
	A2U		✓				✓			✓
	A3		✓					✓		
	A3O		✓					✓	✓	
	A3M		✓					✓	✓	
	A3U		✓					✓		✓

Tablo 3.7 (devam): Açıklamalarıyla birlikte numuneler ve kodları.

S/Ç Oranı	Kod	Referans (R)	Bakteri		Bakteri Türü			Mineral Katkılar		
			Var	Yok	1	2	3	M	O	UK
0,5	BR	✓		✓						
	BRO	✓		✓					✓	
	BRM	✓		✓				✓		
	BRU	✓		✓						✓
	B1		✓		✓					
	B1O		✓		✓				✓	
	B1M		✓		✓			✓		
	B1U		✓		✓					✓
	B2		✓				✓			
	B2O		✓				✓		✓	
	B2M		✓				✓		✓	
	B2U		✓				✓			✓
	B3		✓					✓		
	B3O		✓					✓	✓	
	B3M		✓					✓		
B3U		✓					✓		✓	
0,6	CRO	✓		✓					✓	
	CRM	✓		✓				✓		
	CRU	✓		✓						✓
	C1		✓		✓					
	C1O		✓		✓				✓	
	C1M		✓		✓			✓		
	C1U		✓		✓					✓
	C2		✓				✓			
	C2O		✓				✓		✓	
	C2M		✓				✓		✓	
	C2U		✓				✓			✓
	C3		✓					✓		
	C3O		✓					✓	✓	
	C3M		✓					✓		
	C3U		✓					✓		✓

3.3.2. Üretim

Harç karışımının üretimi sırasında laboratuvarında mevcut bulunan harç mikseri kullanılmıştır. Üretim boyunca izlenen sıra aşağıdaki gibi sıralanmıştır.

1. Kum, çimento ve mineral katkıları mikserde konularak kuru olarak karıştırılmıştır.
2. İstanbul Üniversitesi, Fen Fakültesi, Biyoloji Bölümü, Temel ve Endüstriyel Mikrobiyoloji ABD laboratuvarında üretilen bakterili karışım suyu veya referans numuneleri için kullanılan bakterisiz şebeke suyu kuru, önceden oranları hesaplanan karışıma ilave edilerek mikserde karıştırılmaya devam edilmiştir (Tablo 3.8).
3. Karıştırma işlemi sonunda mikserden alınan numuneler, daha önceden yağlanan demir kalıplara çekiçleme metoduyla yerleştirilmiştir (Şekil 3.7 ve Şekil 3.8).

4. Üretiminden bir gün sonra (24 saat) numuneler kalıplardan çıkarılıp üst yüzeylerine kodları yazılarak etiketlenmiştir.
5. Etiketlenerek gruplanan numuneler kür işlemi için içerisinde şebeke suyunun bulunduğu kür havuzuna konulmuştur.

Tablo 3.8: Harç karışım oranları (gr)

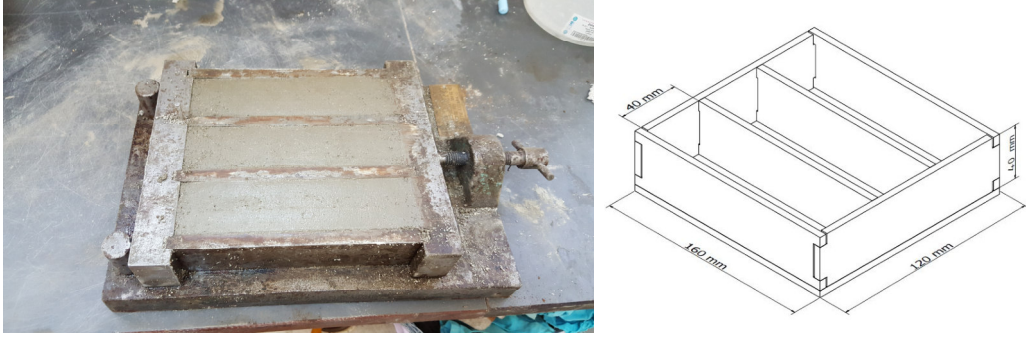
Karışım Kodu	Rilem Kumu (gr)	Karışım Suyu (ml)	Çimento(gr)	Metakaolin (gr)	UK (gr)	YFC (gr)
0,4 S/Ç	Katkılı	1343	225	450		113
	Katkılı	1327	225	450	113	
	Katkılı	1323	225	450		113
	Katkısız	1254	225	563	0	0
0,5 S/Ç	Katkılı	1345	225	360		90
	Katkılı	1332	225	360	90	
	Katkılı	1249	225	360		90
	Katkısız	1350	225	450	0	0
0,6 S/Ç	Katkılı	1346	225	300		75
	Katkılı	1335	225	300	75	
	Katkılı	1332	225	300		75
	Katkısız	1414	225	375	0	0



Şekil 3.7: Numunelerin kalıplara yerleştirilmesi.

3.3.3. Numunelerin Boyutları

Yapılan çalışmada üretilen her bir harç çubuğu numunesi serisi için 40 x 40 x 160 mm boyutlu demirden kalıplar kullanılmıştır.



Şekil 3.8: Numune şekil ve boyutları.

3.3.4. Harç Deneyleri

3.3.4.1. Su Emme Deneyi

Su emme deneyleri, betonun veya harcın içerisinde dış ortamla bağlantısı olan boşluk oranını tespit etmek amacıyla yapılmaktadır. 40x40x160 mm'lik prizma numuneler, kalıba döküldükleri zamanı takiben 24 saat boyunca oda sıcaklığında tutulduktan sonra kalıptan çıkarılarak içerisinde bakteri karışımı bulunmayan kür suyuna bırakılmışlardır. 7. ve 28. günlerin sonunda kürden çıkarılarak 24 saat boyunca etüvde 100 °C sıcaklıkta kurutulmaya bırakılan numuneler, 24 saatin sonunda etüvden çıkarılarak tartılıp, ardından yeniden 24 saat bekletilmek üzere kür havuzuna bırakılmıştır. Tamamlanan sürenin sonunda sudan çıkarılan numunelerin tartımları yeniden yapılarak su emme yüzdeleri belirlenmiştir (Denklem 3.1).

$$\text{Su Emme Oranı \%} = [(\text{Islak ağırlık} - \text{Kuru ağırlık}) / \text{Kuru ağırlık}] \times 100$$

$$\text{SEO \%} = [(m_s - m_k) / m_k] \times 100$$

Denklem (3.1)

3.3.4.2. Ultrasonik Ses Geçiş Hızı Testi (UPV)

Beton veya harç numuneler üzerinde uygulanan tahribatsız muayene yöntemlerinden biri olan ultrasonik ses deneyi, manyetik/elektiriksel ilkeler ışığında geliştirilen deneylerden biridir [105]. Bu deneylerle amaçlanan şey beton veya harç numunelerinin yoğunluklarının belirlenmesidir. Deney, sertleşmiş numune yüzeylerinde yapılır [106]. Numunenin bir yüzeyinden gönderilen ses dalgalarının diğer yüzeye ulaşma süresine bakılarak yoğunluk ve kompasite hakkında fikir edinilebilir. Tespit edilen hızın yüksek olması, numune içerisindeki boşluk oranının az olduğunu gösterir. Bunun nedeni, ses dalgalarının dolu yüzeylerde boşluğa, havaya oranla daha hızlı iletilmesidir (Şekil 3.9).

28 gün kürde bekleyen numunelere kür süresi sonunda TS EN 12504-4'e uygun olarak UPV testi yapılmıştır. Teste başlanmadan önce, numunelerin 40 mm'lik en kesitli alanlarına alıcı ve verici probaların karışıklı olarak boşluksuz oturabilmesi için prob yüzeyleri ultrason jeli ile kaplanmıştır. Prob başlıklarının harç yüzeylerine bastırılmasıyla elde edilen 3 ölçümün ortalaması baz alınarak numune içerisinde sesin iletiildiği boyun zamana bölünmesiyle dalga hızı tespit edilmiştir (Denklem 3.2). (L: Uzunluk (mm), V: Geçiş hızı (km/sn), T: Zaman (μ s))

$$L = V \times T$$

Denklem (3.2)



Şekil 3.9: Ultrasonik ses geçiş hızı deneyi.

3.3.4.3. Eğilme Dayanımı Testi

Eğilme deneyi, malzemenin mukavemetini, eğilmeye karşı direncini tespit etmek amacıyla yapılan tahribatlı bir deneydir. Deneyde, numune mesnet noktalarından altında bulunan iki desteğe serbest halde oturtularak tam ortasından bir eğme kuvvetinin uygulanmasıyla gerçekleştirilir. Numuneye kuvvet etki etmeye başladığı anda kesitin orta bölümünde basma gerilmeleri, diğer bölümlerinde çekme gerilmeleri meydana gelir. Yükleme numune çatlayana kadar devam ettirilir. Amaç, tek yönde eğilme sağlanarak numunenin maruz kalabileceği gerilmelerin büyüklüğünü tespit edebilmektir [107].

28 gün boyunca şebeke suyunda kür edilen numunelere TS EN 12390-5'e uygun olarak 3 noktalı eğilme testi yapılmıştır. 0,005 kN/sn yükleme hızına ayarlanan cihazla numunelerin ortalama eğilme yükleri tespit edilerek her seride var olan 3 numunenin ortalaması eğilme dayanımı olarak belirlenmiştir (Şekil 3.10).



Şekil 3.10: Eğilme deneyi

3.3.4.4. Basınç Dayanımı Testi

Basınç dayanımı deneyinde, ebatları belli olan kübik veya silindirik numune üzerine basınç pres aygıtıyla darbesiz, değişmeyen değerlerde yük uygulanır. Numune kırılana kadar devam edilen yükleme, numune kırıldığı anda sonlandırılır. Daha öncesinde hesaplanmış olan kesit alanıyla kuvvet miktarı oranlanarak basınç mukavemeti tespiti sağlanır.

28 gün boyunca şebeke suyunda kür edilen numunelere su emme deneyi, ultrases hızı ölçümü, eğilme testi deneylerinin ardından basınç dayanımı testi yapılmıştır. Eğilme deneyinde ikiye bölünen numune parçalarından her biri, 2 kN/sn yükleme hızına ayarlanan cihazla kırılma yüküne maruz bırakılmıştır. Kırılma yükleri tespit edilen her seride var olan 3 numunenin ortalaması basınç dayanımı olarak belirlenmiştir (Şekil 3.11).



Şekil 3.11: Basınç dayanımı deneyi

3.3.4.5. SEM ve EDS Analizi

Taramalı elektron mikroskobu (SEM), odaklandırılmış elektron demetinin numuneyi taramasıyla görüntülemelerin yapılması işlemidir. Gönderilen elektronların numunedeki atomlarla etkileşime girmesi sonucu, incelenen yüzeydeki yapı hakkında bilgileri yansıtan sinyaller verir. Bu sayede, yansıtılan sinyallerle gönderilen elektron demetinin konumunun eşleşmesi yoluyla görüntü oluşturulur [108].

Üretimi İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği, Yapı Anabilim Dalı Laboratuvarı'nda yapılan numunelerin SEM ve EDS analizleri Yıldız Teknik Üniversitesi Merkez Laboratuvarı'nda Zeiss EVO LS 10 cihazıyla gerçekleştirilmiştir. 10 mA'de 120 sn boyunca Au-Pd kaplaması yapılan numune parçacıkları daha sonra SEM-EDS için analize tabi tutulmuştur (Şekil 3.12 ve Şekil 3.13). SEM görüntülemeleri 2-10-100 μm boyutlarında yapılan incelemeler sonucunda elde edilmiş olup hemen ardından yapılan EDS analizleriyle de elementer dağılım sonucu alınmıştır.



Şekil 3.12: Au-Pd kaplama cihazı.



Şekil 3.13: Au-Pd kaplamadan önce (a)/sonra (b).

3.3.4.6. XRD Analizi

X-ışını difraksiyonu (XRD), x-ışını ile teta malzemelerin kristal yapılarının analizi yöntemidir. Üretimi İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği, Yapı Anabilim Dalı Laboratuvarı'nda yapılan numunelerin XRD analizleri Yıldız Teknik Üniversitesi Merkez Laboratuvarı'nda PANalytical X'Pert PRO cihazıyla gerçekleştirilmiştir.



4. BULGULAR

4.1. HARÇ DENEYLERİ

Üretilen harç çubuğu numunelerinden her birine 7. ve 28. günlerde su emme deneyleri yapılmıştır. 28. gün sonunda tüm numunelere ultrases geçiş hızı, eğilme ve basınç deneyleri yapılmıştır. Basınç deneylerinden kalan parçalar üzerinde de XRD, SEM ve EDS analizleri yapılmıştır.

4.1.1. Su Emme Deneyi Sonuçları

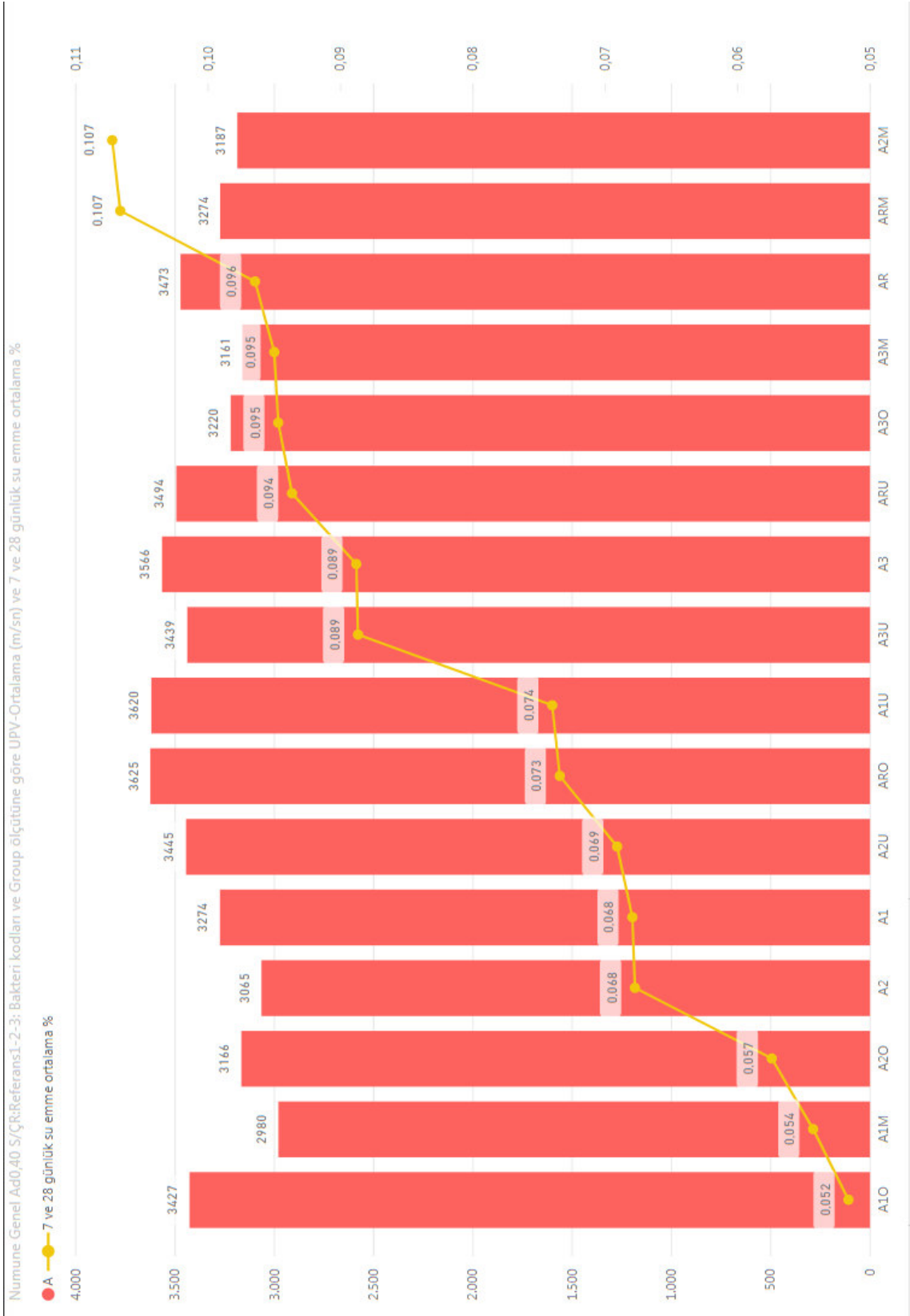
Numunelerin 28 günlük kür süresinin sonunda yapılan su emme analizleri incelendiğinde, bakteri karışımı harç numunelerinde genel durumda su emme kapasitesinde bir düşüş olduğu görülmüştür (Şekil 4.1, Şekil 4.2, Şekil 4.3). 0,4 s/ç oranlı numunelerde bu oran referans numunelerine kıyasla ortalama %30-35, 0,5 s/ç oranlı numunelerde yaklaşık %20 ve 0,6 s/ç oranlı numunelerde ise %10 olarak görülmüştür (Tablo 4.1).

Tablo 4.1: 7 ve 28 günlük numunelerin su emme yüzdeleri

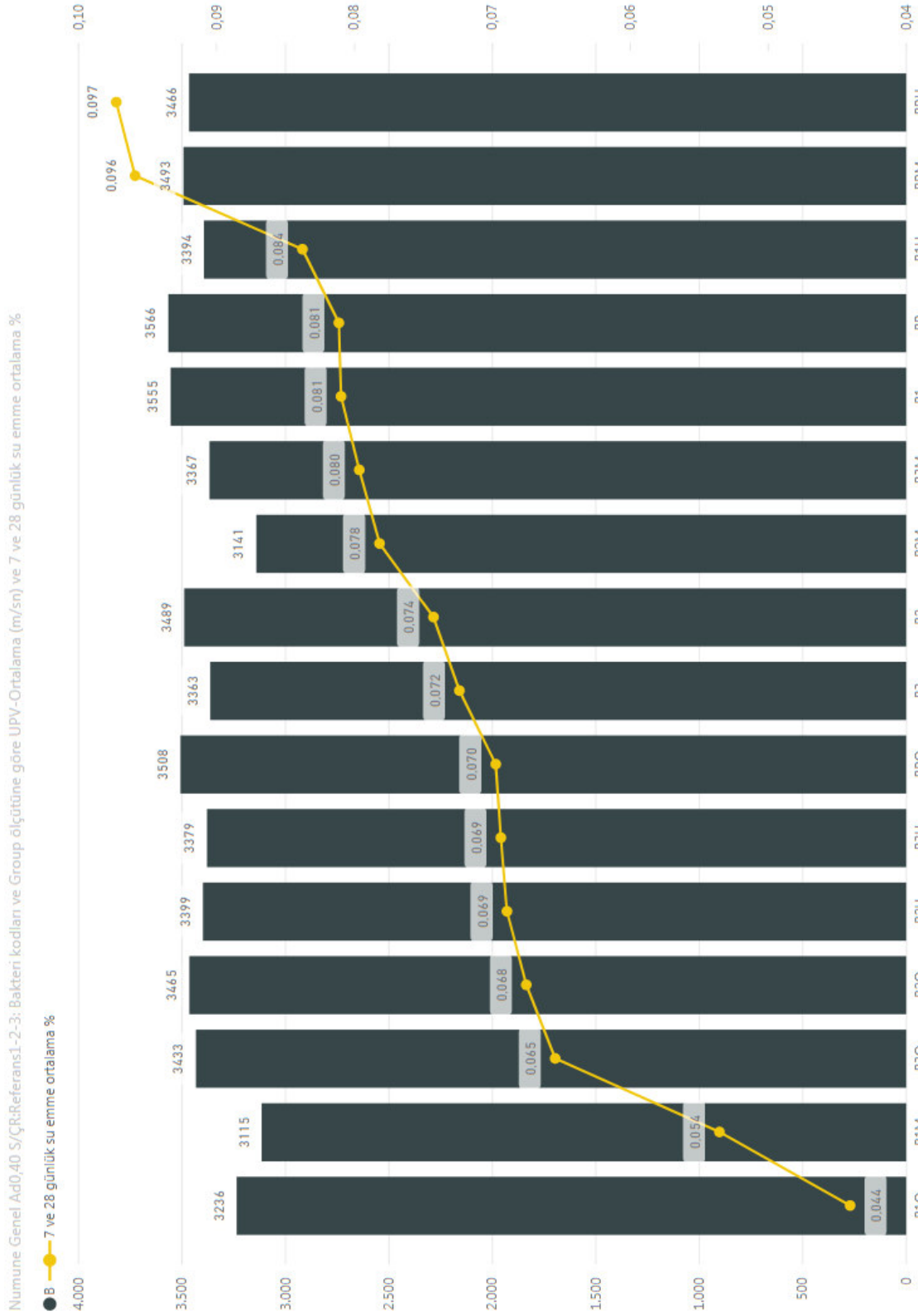
<i>Numune Genel Ad 0,40 S/Ç R:Referans 1-2-3: Bakteri kodları</i>	<i>Su Emme 7 Günlük % Ortalama</i>	<i>Su Emme 28 Günlük % Ortalama</i>	<i>Su Emme 28.Gün- 7.Gün % Fark</i>	<i>7 ve 28 Günlük Su Emme Ortalama %</i>
AR	0,1138	0,0791	-0,0347	0,0965
A1	0,0832	0,0527	-0,0305	0,0680
A2	0,0872	0,0484	-0,0388	0,0678
A3	0,1061	0,0715	-0,0347	0,0888
ARU	0,1062	0,0811	-0,0250	0,0937
A1U	0,0888	0,0592	-0,0295	0,0740
A2U	0,0787	0,0595	-0,0191	0,0691
A3U	0,1019	0,0755	-0,0265	0,0887
ARO	0,0891	0,0578	-0,0313	0,0734
A1O	0,0687	0,0345	-0,0342	0,0516
A2O	0,0755	0,0393	-0,0362	0,0574
A3O	0,1065	0,0829	-0,0235	0,0947
ARM	0,1177	0,0956	-0,0220	0,1066
A1M	0,0543	0,0543	0,0001	0,0543
A2M	0,1183	0,0962	-0,0220	0,1073
A3M	0,1171	0,0729	-0,0441	0,0950
BR	0,0889	0,0734	-0,0155	0,0811
B1	0,0854	0,0765	-0,0089	0,0810
B2	0,0796	0,0689	-0,0107	0,0743
B3	0,0859	0,0589	-0,0270	0,0724

Tablo 4.1 (devam): 7 ve 28 günlük numunelerin su emme yüzdeleri

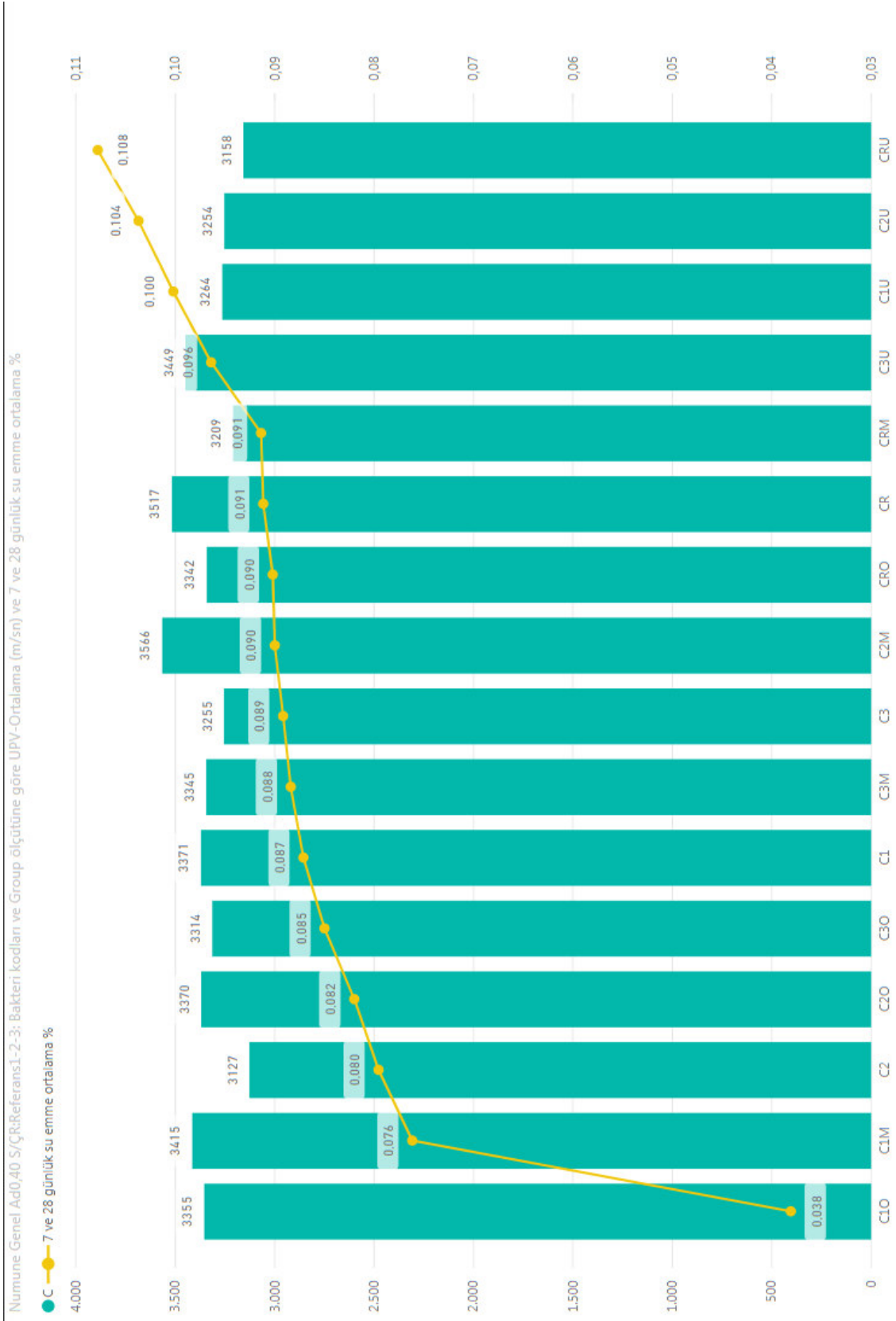
<i>Numune Genel Ad 0,40 S/Ç R:Referans 1-2-3: Bakteri kodları</i>	<i>Su Emme 7 Günlük % Ortalama</i>	<i>Su Emme 28 Günlük % Ortalama</i>	<i>Su Emme 28.Gün- 7.Gün % Fark</i>	<i>7 ve 28 Günlük Su Emme Ortalama %</i>
BRU	0,1134	0,0811	-0,0323	0,0973
B1U	0,1022	0,0653	-0,0369	0,0838
B2U	0,0838	0,0541	-0,0298	0,0689
B3U	0,0845	0,0543	-0,0302	0,0694
BRO	0,0736	0,0660	-0,0076	0,0698
B1O	0,0251	0,0630	0,0379	0,0441
B2O	0,0835	0,0516	-0,0319	0,0675
B3O	0,0799	0,0510	-0,0288	0,0655
BRM	0,1101	0,0817	-0,0283	0,0959
B1M	0,0627	0,0444	-0,0183	0,0535
B2M	0,0973	0,0590	-0,0383	0,0782
B3M	0,0938	0,0655	-0,0283	0,0796
CR	0,1018	0,0805	-0,0213	0,0911
C1	0,0932	0,0811	-0,0121	0,0871
C2	0,0949	0,0642	-0,0307	0,0796
C3	0,0998	0,0785	-0,0213	0,0891
CRU	0,1184	0,0971	-0,0213	0,1078
C1U	0,1109	0,0896	-0,0213	0,1002
C2U	0,1143	0,0930	-0,0213	0,1037
C3U	0,1071	0,0858	-0,0213	0,0964
CRO	0,1115	0,0902	-0,0213	0,0902
C1O	0,0975	0,0762	-0,0213	0,0762
C2O	0,1033	0,0820	-0,0213	0,0820
C3O	0,1063	0,0850	-0,0213	0,0850
CRM	0,1019	0,0808	-0,0211	0,0914
C1M	0,0867	0,0656	-0,0211	0,0762
C2M	0,1006	0,0794	-0,0211	0,0900
C3M	0,0990	0,0778	-0,0211	0,0884



Şekil 4.1: 0,4 S/Ç Su emme-UPV grafiği



Şekil 4.2: 0,5 S/Ç Su emme-UPV grafiği



Şekil 4.3: 0,6 S/Ç Su emme-UPV grafiği

4.1.2. Ultrasonik Ses Geçiş Hızı Testi (UPV) Sonuçları

Numunelerden alınan ölçümler sonucunda bakterili numunelerdeki geçiş hızlarının genel durumda kontrol numunelerine kıyasla daha fazla olduğu görülmüştür (Tablo 4.2).

Tablo 4.2: 28 günlük UPV deneyi sonuçları

<i>Numune Genel Ad 0,40 S/Ç R:Referans 1-2-3: Bakteri kodları</i>	<i>UPV- Ortalama (m/sn)</i>	<i>Numune Genel Ad 0,50 S/Ç R:Referans 1-2-3: Bakteri kodları</i>	<i>UPV- Ortalama (m/sn)</i>	<i>Numune Genel Ad 0,60 S/Ç R:Referans 1-2-3: Bakteri kodları</i>	<i>UPV- Ortalama (m/sn)</i>
AR	3472,6173	BR	3566,2165	CR	3516,9742
A1	3274,2915	B1	3555,0740	C1	3371,2517
A2	3065,1341	B2	3489,3609	C2	3127,2776
A3	3565,9426	B3	3363,4804	C3	3255,4771
ARU	3493,9793	BRU	3466,0793	CRU	3158,0617
A1U	3619,9348	B1U	3394,4194	C1U	3263,8230
A2U	3444,9744	B2U	3398,9042	C2U	3253,6740
A3U	3438,7458	B3U	3379,2849	C3U	3449,4036
ARO	3624,7537	BRO	3507,6729	CRO	3341,7639
A1O	3427,3073	B1O	3235,8569	C1O	3354,5434
A2O	3166,3288	B2O	3464,9276	C2O	3369,9607
A3O	3219,9743	B3O	3432,9715	C3O	3313,9554
ARM	3273,5182	BRM	3492,9596	CRM	3209,2421
A1M	2979,6880	B1M	3115,4631	C1M	3414,8181
A2M	3186,8843	B2M	3140,9995	C2M	3565,9426
A3M	3161,1277	B3M	3367,3996	C3M	3344,8640

4.1.3. Eğilme Dayanımı Test Sonuçları

Üretilen harç çubuğu numunelerinin üç noktalı eğilme dayanımı test sonuçları Tablo 4.3'de gösterilmiştir (Tablo 4.3).

Tablo 4.3: Numunelerin eğilme dayanımı sonuçları

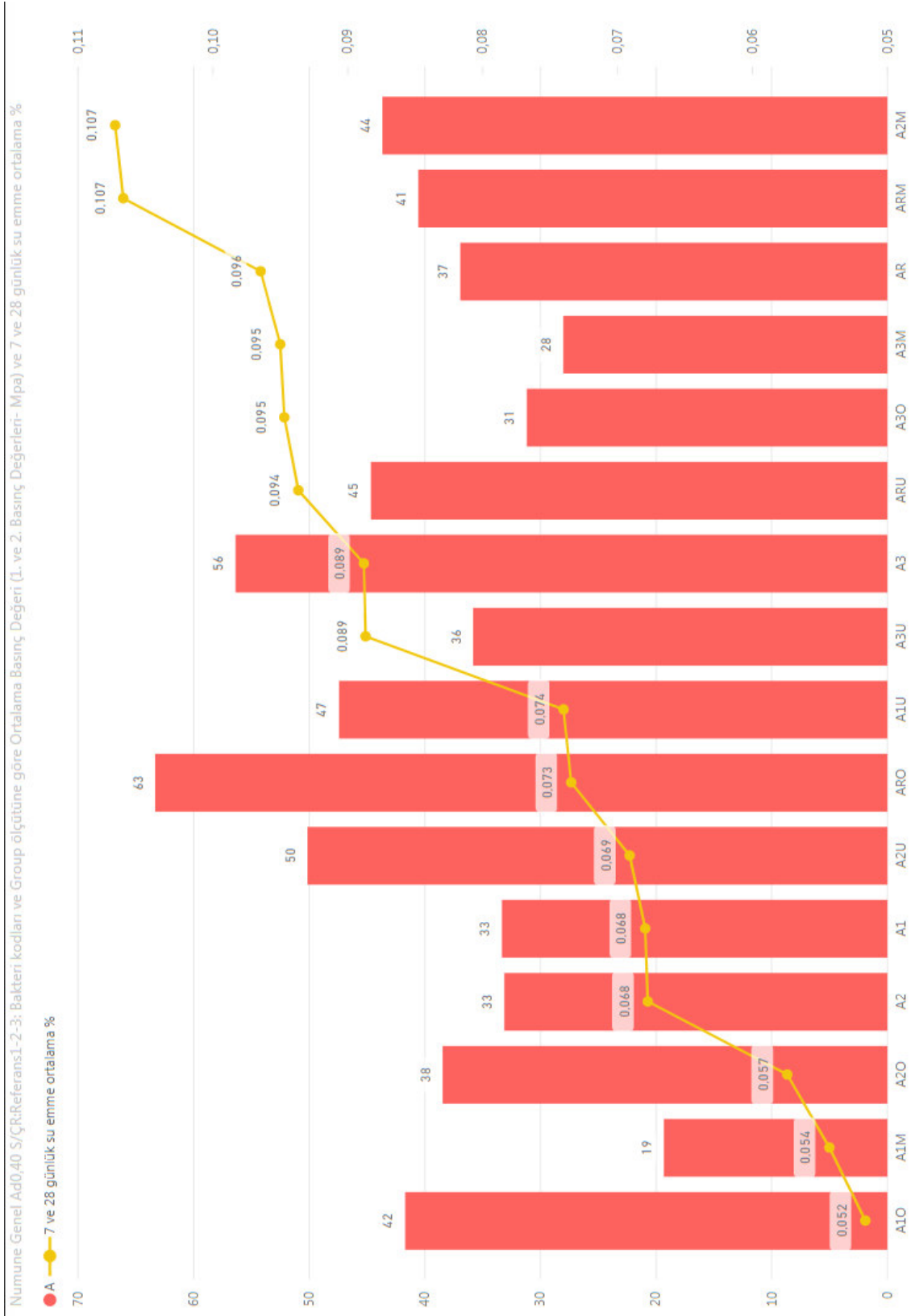
<i>Numune Genel Ad 0,40 S/Ç R:Referans 1-2-3: Bakteri kodları</i>	<i>Eğilme Testi Ortalama Değer (Mpa)</i>	<i>Numune Genel Ad 0,50 S/Ç R:Referans 1-2-3: Bakteri kodları</i>	<i>Eğilme Testi Ortalama Değer (Mpa)</i>	<i>Numune Genel Ad 0,60 S/Ç R:Referans 1-2-3: Bakteri kodları</i>	<i>Eğilme Testi Ortalama Değer (Mpa)</i>
AR	6,8063	BR	5,9141	CR	4,8828
A1	5,1016	B1	8,5938	C1	4,2891
A2	4,9141	B2	5,7266	C2	5,2813
A3	6,6797	B3	6,3984	C3	5,4297
ARU	5,6328	BRU	6,1563	CRU	4,4766
A1U	6,5625	B1U	6,9688	C1U	5,1875
A2U	5,2656	B2U	6,6719	C2U	4,9141
A3U	5,2656	B3U	7,1094	C3U	4,8594
ARO	7,8672	BRO	6,4609	CRO	5,3125
A1O	7,7656	B1O	6,2266	C1O	5,8672
A2O	7,2266	B2O	7,0625	C2O	8,5000
A3O	4,9453	B3O	7,5547	C3O	4,8438
ARM	8,4844	BRM	5,9844	CRM	5,5547
A1M	9,4531	B1M	4,7109	C1M	5,6406
A2M	5,7422	B2M	4,3594	C2M	4,1953
A3M	4,1953	B3M	7,4063	C3M	6,3672

4.1.4. Basınç Dayanımı Test Sonuçları

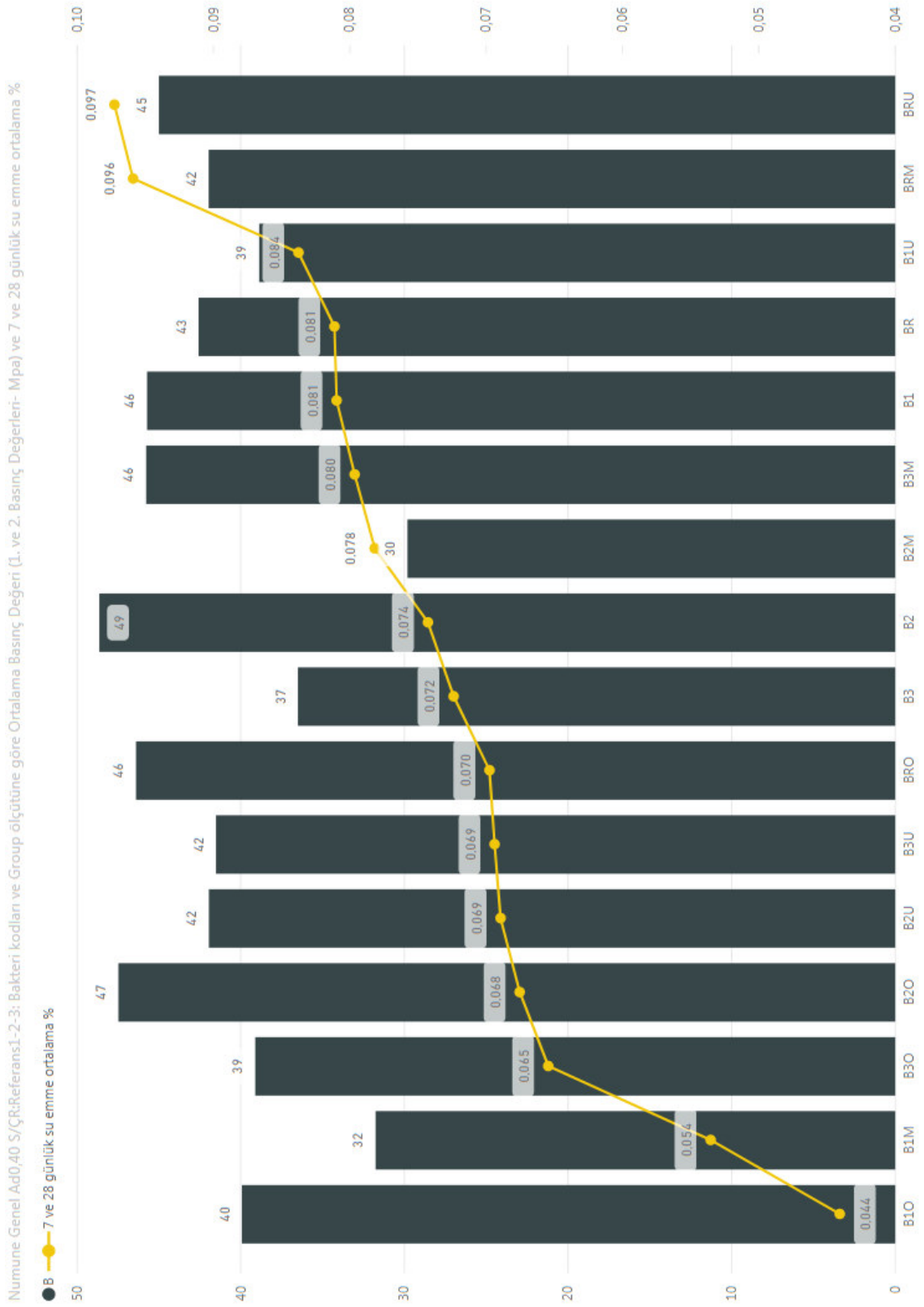
Üretilen harç çubuğu numunelerinin 28 günlük basınç dayanımı deneyi sonuçları Tablo 4.4 'de gösterilmiştir. Bakteri karışimli numunelerde gözenekliliğin azalmış olmasına ve dolayısıyla numunelerin su emme kapasitelerinde düşüş yaşanmasına karşın eğilme ve basınç dayanımlarında genel anlamda kontrol numunelerine kıyasla olumlu yönde kayda değer bir artış olmadığı görülmüştür. Bazı numunelerde eğilme ve dayanım artışı görülürken bazılarında azalma olduğu yönünde sonuçlar elde edilmiştir. Mineral katkılı bakterili ve bakterisiz numunelerde ise yeterli kür süresi sağlanmadığından dolayı dayanıma katkı sağlayamadıkları, katkılı ve katkısız numune eğilme basınç değerleri arasında anlamlı bir fark oluşmadığı görülmüştür (Şekil 4.4-4.9).

Tablo 4.4: Numunelerin basınç dayanımı sonuçları

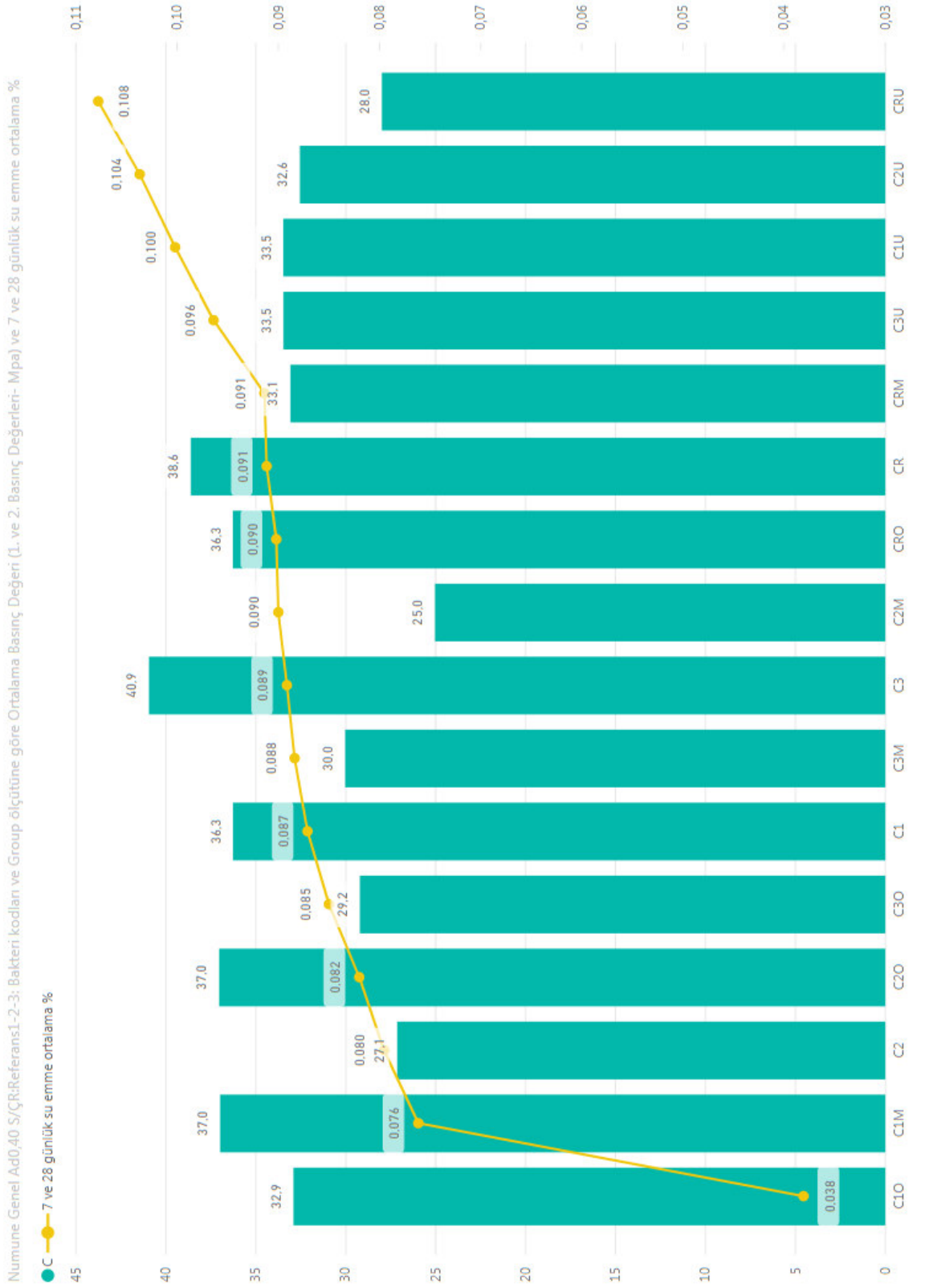
<i>Numune Genel Ad 0,40 S/Ç</i>	<i>Ortalama Basınç Değeri (Mpa)</i>	<i>Numune Genel Ad 0,40 S/Ç</i>	<i>Ortalama Basınç Değeri (Mpa)</i>	<i>Numune Genel Ad 0,60 S/Ç</i>	<i>Ortalama Basınç Değeri (Mpa)</i>
<i>R:Referans 1-2-3: Bakteri kodları</i>		<i>R:Referans 1-2-3: Bakteri kodları</i>		<i>R:Referans 1-2-3: Bakteri kodları</i>	
AR	36,9380	BR	42,5823	CR	38,6172
A1	33,3375	B1	45,7302	C1	36,2708
A2	33,1344	B2	48,6500	C2	27,1396
A3	56,3766	B3	36,5089	C3	40,9427
ARU	44,6740	BRU	45,0073	CRU	27,9927
A1U	47,4229	B1U	38,8771	C1U	33,4703
A2U	50,1547	B2U	41,9500	C2U	32,5516
A3U	35,8313	B3U	41,5146	C3U	33,4640
ARO	63,3333	BRO	46,4063	CRO	36,2802
A1O	41,7083	B1O	39,9328	C1O	32,9073
A2O	38,4656	B2O	47,4813	C2O	37,0427
A3O	31,1844	B3O	39,1188	C3O	29,2146
ARM	40,5688	BRM	41,9625	CRM	33,0781
A1M	19,3323	B1M	31,7594	C1M	36,9865
A2M	43,6760	B2M	29,8141	C2M	25,0385
A3M	28,0344	B3M	45,7869	C3M	30,0313



Şekil 4.4: 0,4 S/Ç Su emme-Basınç Dayanımı Grafiği



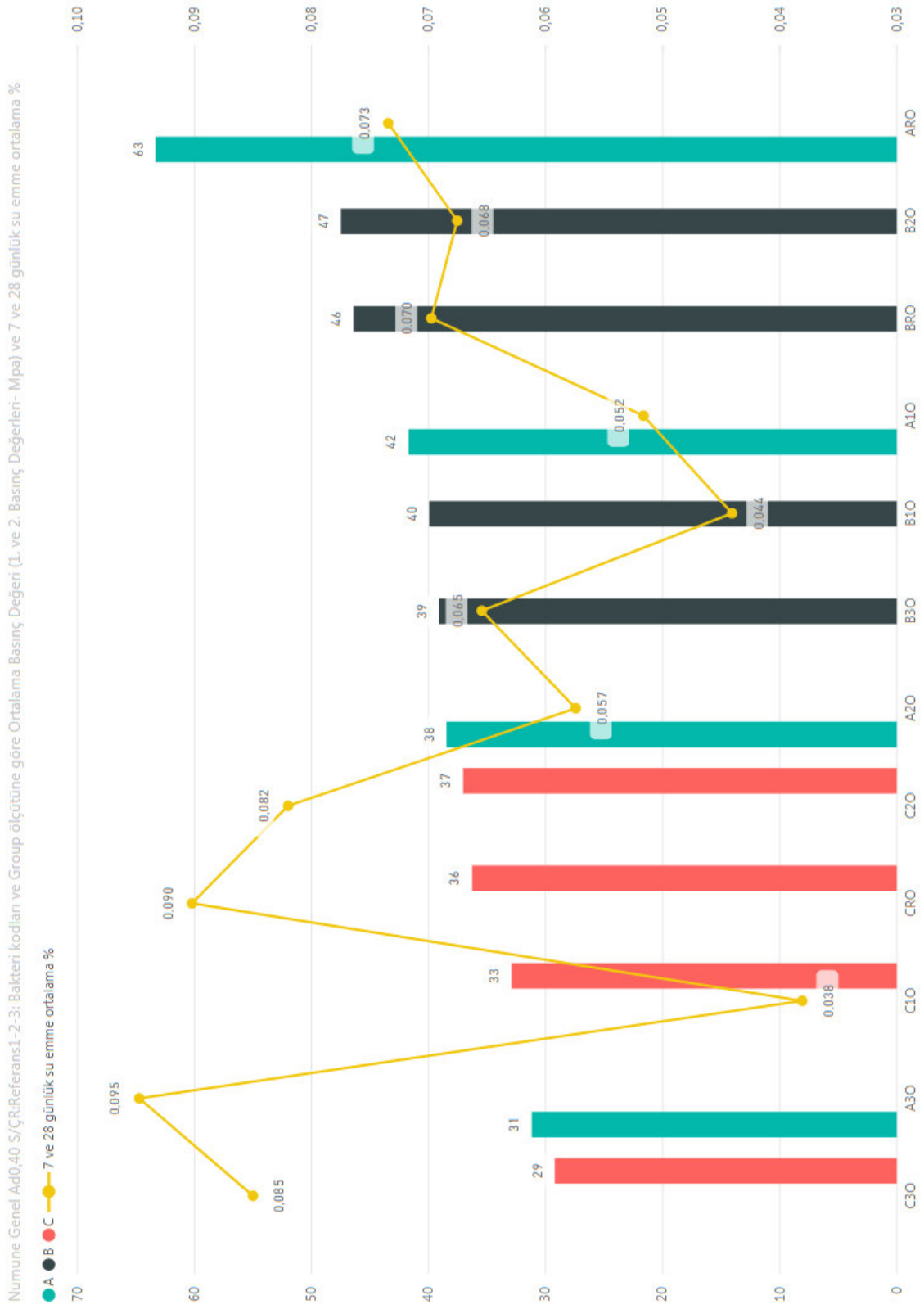
Şekil 4.5: 0,5 S/Ç Su emme-Basınç DayanımıGrafığı



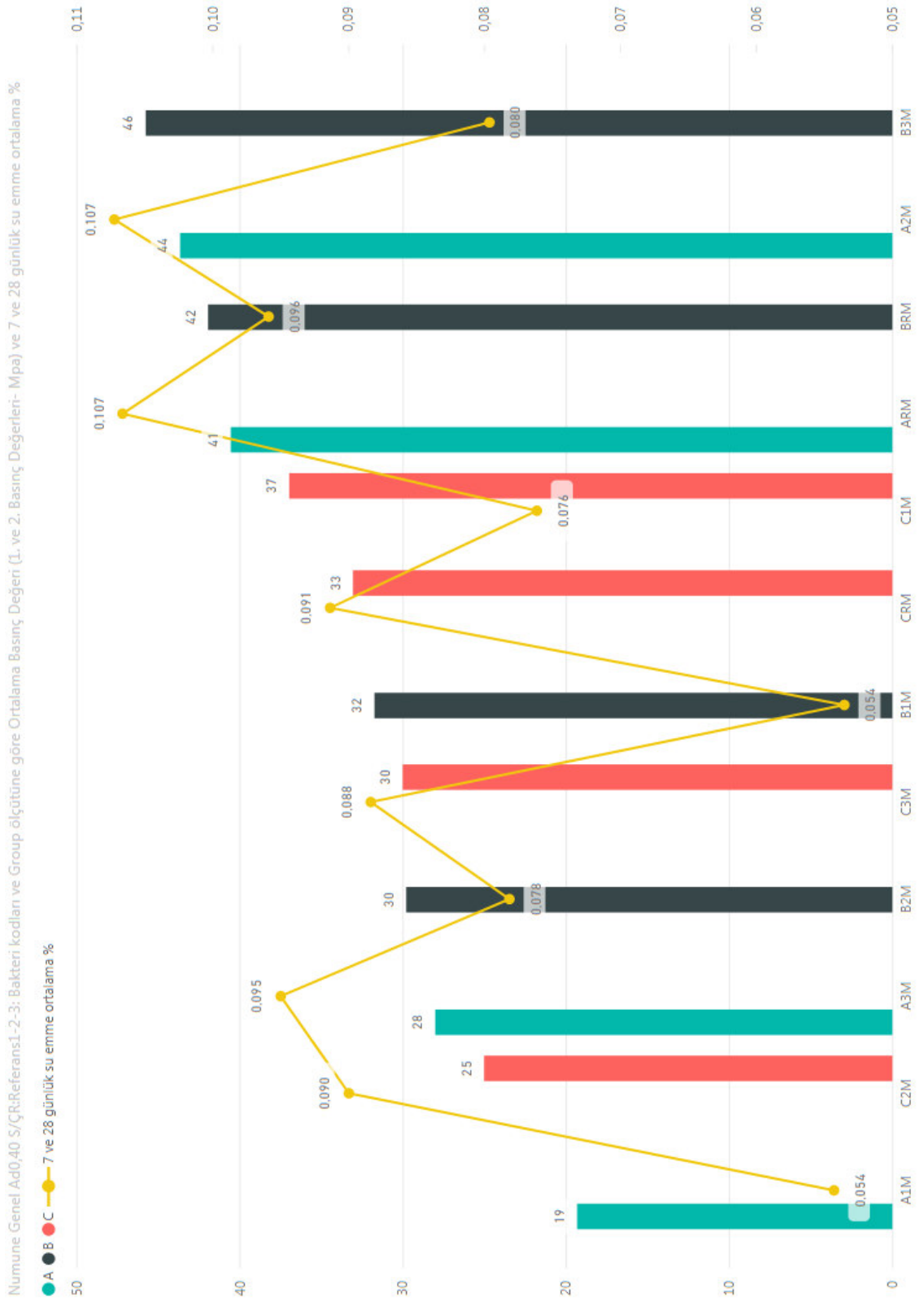
Şekil 4.6: 0,6 S/Ç Su emme-Basınç DayanımıGrafığı



Şekil 4.7: UK içeren numunelerin su emme yüzdeleri basınç dayanımları



Şekil 4.8: YFC içeren numunelerin su emme yüzdeleri ve basınç dayanımları

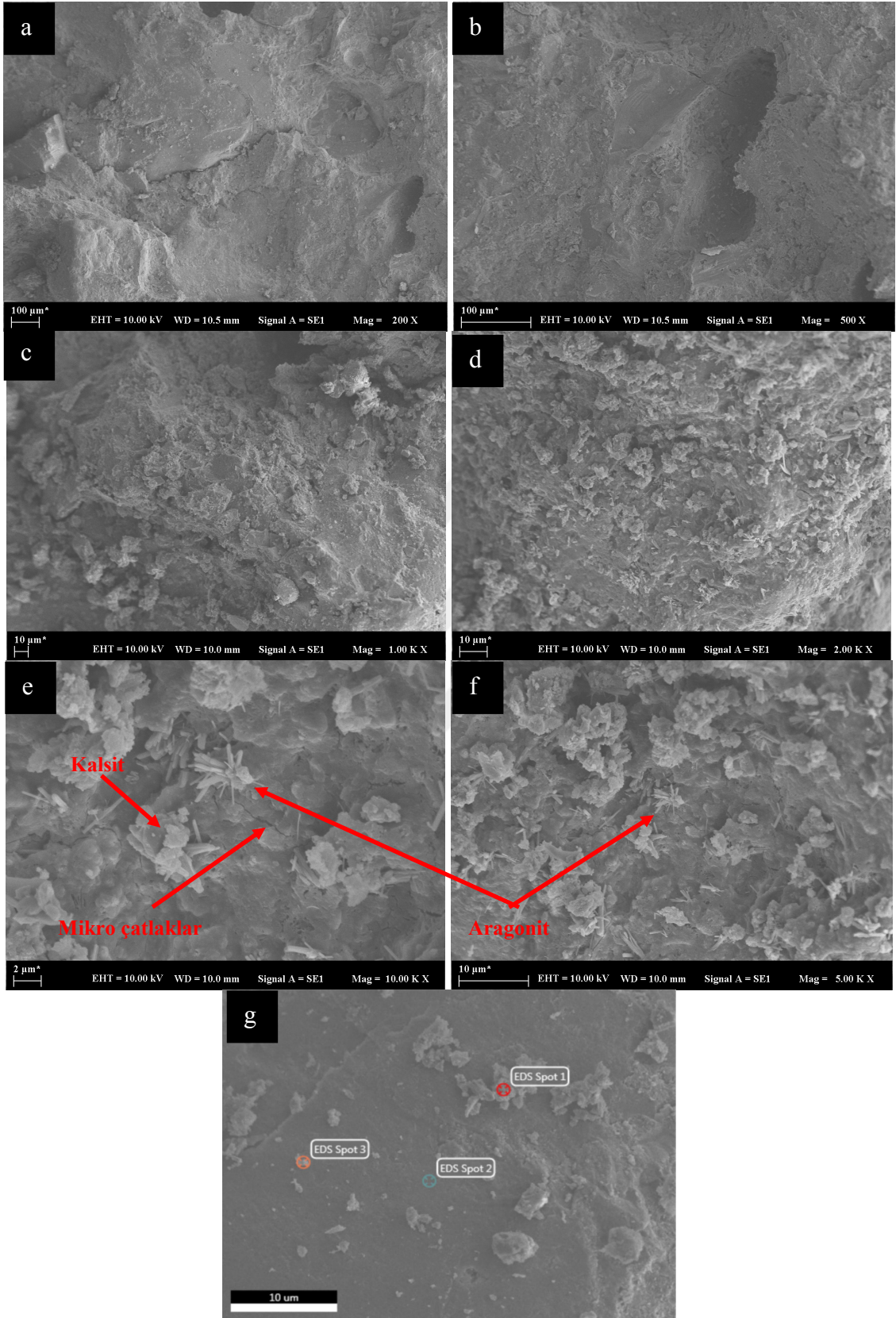


Şekil 4.9: Metakaolin içeren numunelerin su emme yüzdeleri ve basınç dayanımları

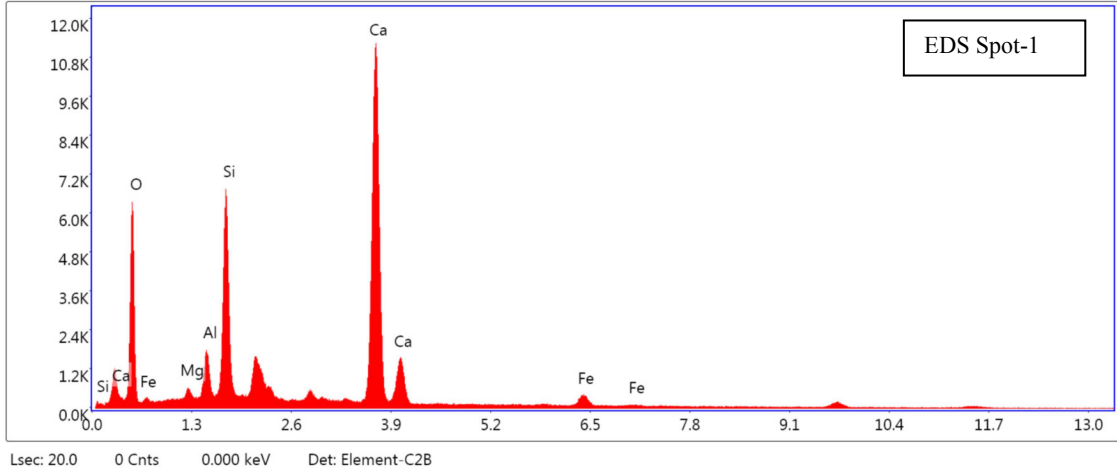
4.1.5. SEM ve EDS Analizi

Bu çalışma kapsamında üretilen geleneksel harç numunelerinin 28 günlük ıslak kür süresinin ardından SEM analizi yapılarak, harç içerisindeki bakteriyel iyileşmenin etkisi görüntülenmiştir. Bir tanesi referans numunesi olmak üzere en iyi su emme kapasitesi azalım sonucunu veren 4 numune için yapılan SEM görüntülemeleri ve bu numunelere ait EDS sonuçları elde edilmiştir. Bu bağlamda en iyi sonuçları *Pseudomonas putida* ve *Sphingomonas mucosissima* bakterileri sağlamış olup görüntülemeler bu iki farklı tür bakteri üzerinden gerçekleştirilmiştir.

Kontrol numunesinin (BRO) (Şekil 4.10) d, e ve f mikrograflarında C-S-H jeli ve CaCO_3 kristallerinin formu olan aragonitin varlığının yanı sıra hidrate olmamış cüruf taneleri görülmektedir. Bu numunelerde bakteri mevcudiyetinin bulunmuyor olmasından dolayı oluşmuş olan CaCO_3 'ün tamamıyla hidratasyon sonucu oluşmuş olduğunu göstermektedir. EDS analizlerinde Ca ve O elementlerinin yüzdece yüksek oranda bulunuyor olması CaCO_3 'ün varlığını desteklemekle birlikte faz analizi sonuçlarında CaCO_3 'ün varlığı kesin olarak tespit edilmiştir.

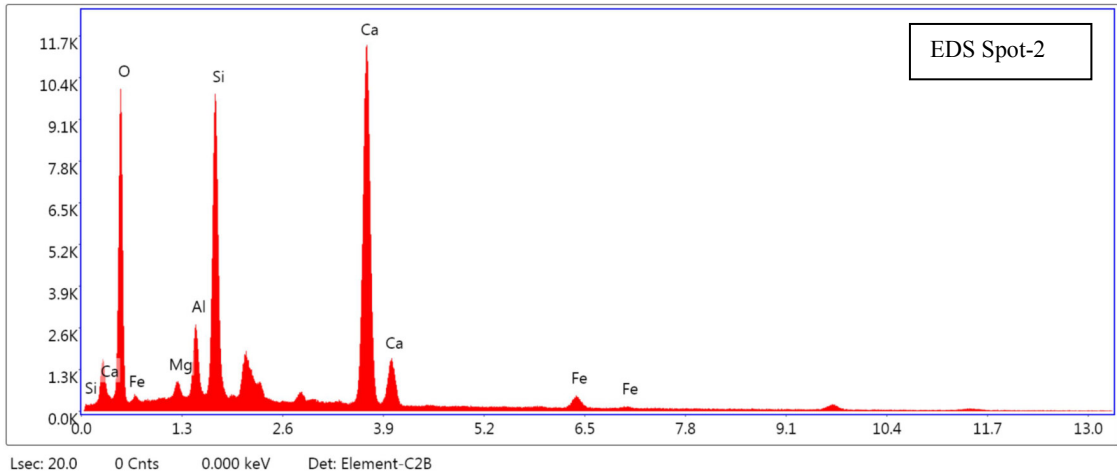


Şekil 4.10: Kontrol numunesi (BRO) SEM mikrograflarında **a)** 200 X SEM **b)** 500 X SEM **c)** 1000 X SEM **d)** 2000 X SEM **e)** 5000 X SEM **f)** 10.000 X SEM **g)** EDS analizi spot alanları



eZAF Smart Quant Results

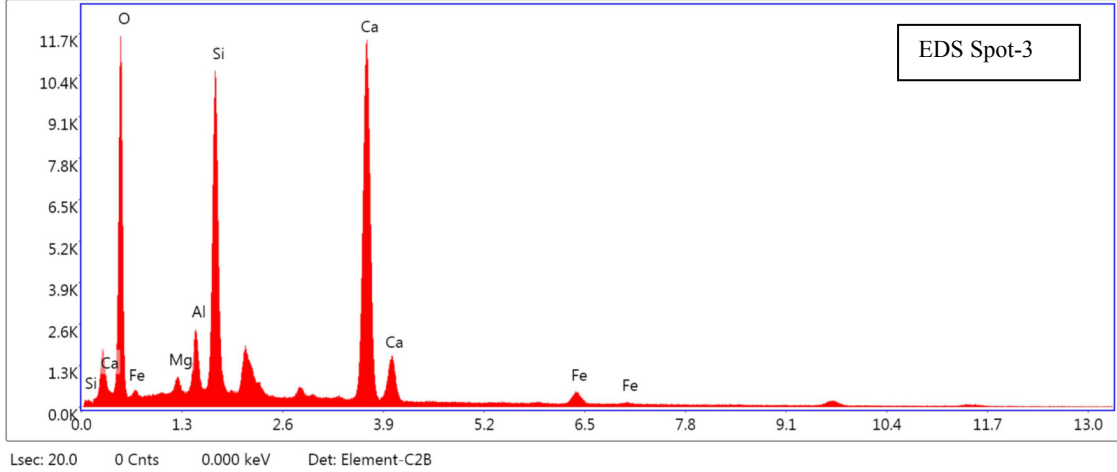
Element	Weight %	Atomic %	Net Int.	Error %	Kratio	Z	A	F
OK	43.92	64.19	2089.31	10.00	0.0707	1.0742	0.1499	1.0000
MgK	0.58	0.56	103.37	12.77	0.0028	0.9953	0.4804	1.0068
AlK	2.66	2.31	594.01	6.43	0.0162	0.9590	0.6256	1.0114
SiK	10.36	8.63	2759.38	4.36	0.0749	0.9805	0.7281	1.0123
CaK	39.68	23.15	6375.63	1.65	0.3630	0.9275	0.9810	1.0051
FeK	2.79	1.17	234.69	7.44	0.0231	0.8283	0.9718	1.0292



eZAF Smart Quant Results

Element	Weight %	Atomic %	Net Int.	Error %	Kratio	Z	A	F
OK	47.56	66.62	3270.30	9.66	0.0878	1.0666	0.1731	1.0000
MgK	1.30	1.20	295.21	8.66	0.0064	0.9878	0.4923	1.0069
AlK	3.51	2.91	987.58	5.74	0.0213	0.9516	0.6313	1.0111
SiK	12.66	10.10	4193.49	4.21	0.0903	0.9729	0.7260	1.0100
CaK	32.56	18.20	6512.15	1.71	0.2940	0.9199	0.9760	1.0060
FeK	2.42	0.97	256.56	6.75	0.0201	0.8212	0.9783	1.0336

Şekil 4.10 (devam): Kontrol numunesi (BRO) SEM mikrograflarında a) 200 X SEM b) 500 X SEM c) 1000 X SEM d) 2000 X SEM e) 5000 X SEM f) 10.000 X SEM g) EDS analizi spot alanları

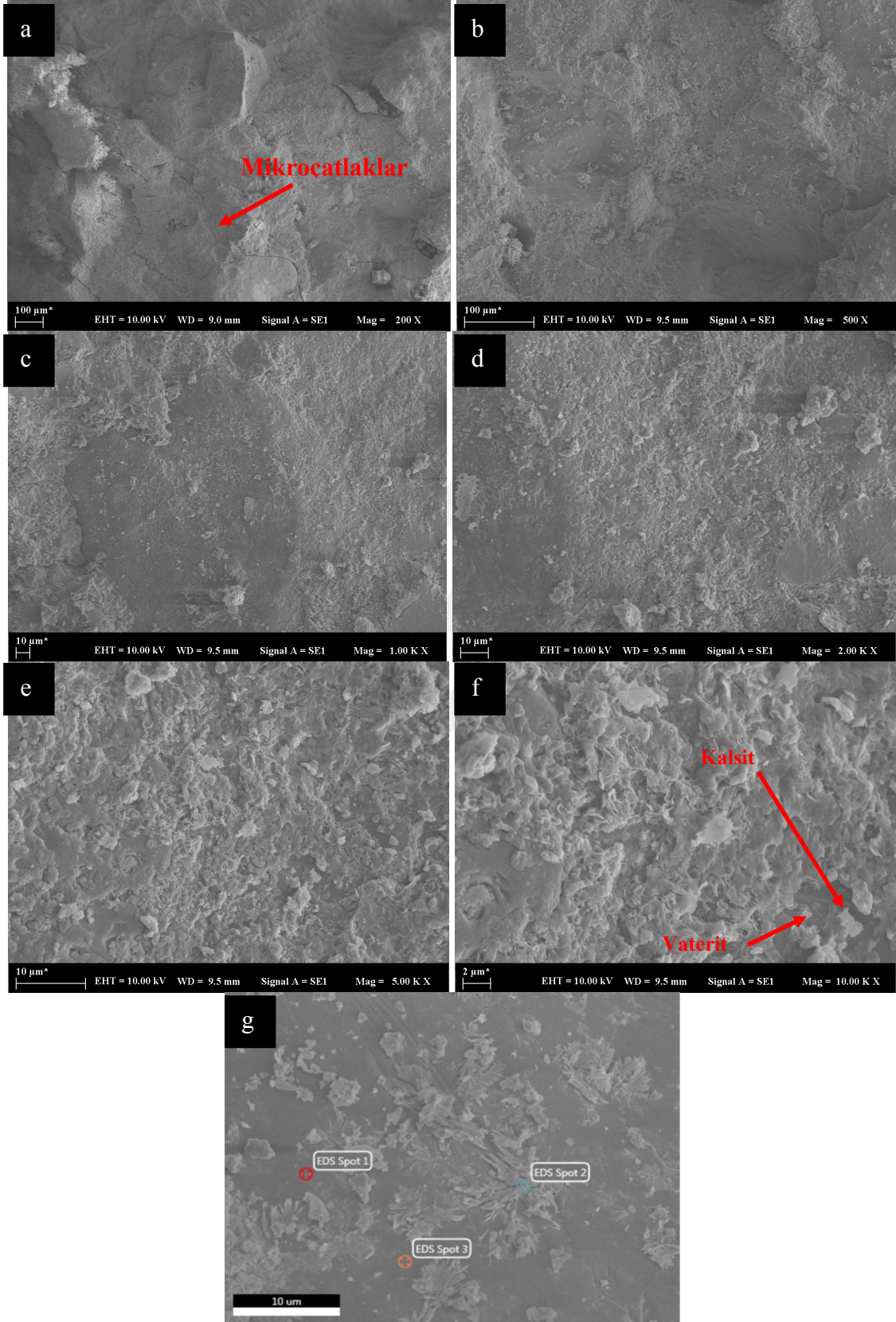


eZAF Smart Quant Results

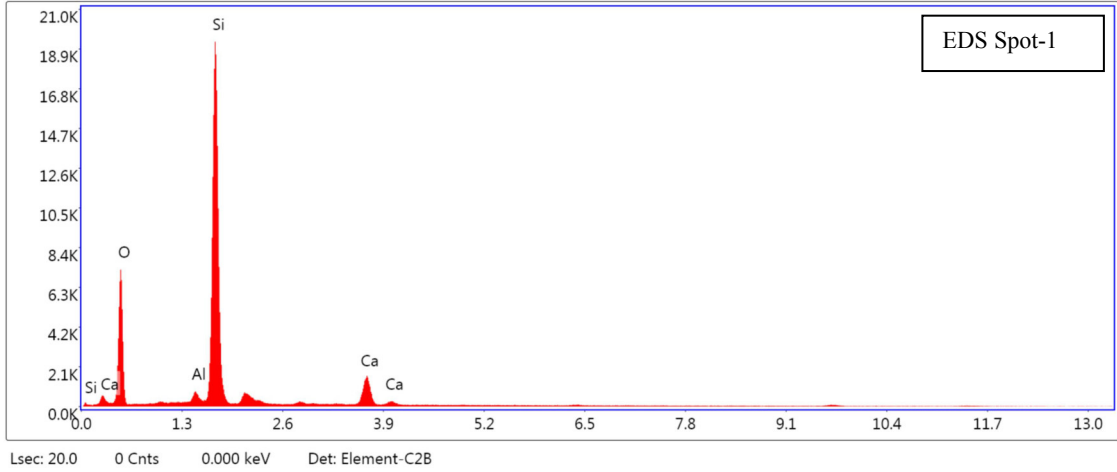
Element	Weight %	Atomic %	Net Int.	Error %	Kratio	Z	A	F
OK	49.67	68.45	3745.93	9.56	0.0952	1.0635	0.1804	1.0000
MgK	1.23	1.12	293.44	8.68	0.0060	0.9848	0.4908	1.0068
AlK	2.99	2.44	885.85	6.12	0.0181	0.9487	0.6308	1.0111
SiK	12.70	9.97	4454.90	4.15	0.0908	0.9699	0.7300	1.0098
CaK	31.09	17.10	6553.23	1.70	0.2801	0.9170	0.9770	1.0062
FeK	2.31	0.91	259.46	6.76	0.0192	0.8185	0.9800	1.0348

Şekil 4.10 (devam): Kontrol numunesi (BRO) SEM mikrograflarında **a)** 200 X SEM **b)** 500 X SEM **c)** 1000 X SEM **d)** 2000 X SEM **e)** 5000 X SEM **f)** 10.000 X SEM **g)** EDS analizi spot alanları

Bakteri içerikli B3 numunesinin (Şekil 4.11) a,b,c,d mikrograflarından da görüldüğü üzere, numune iç yüzeylerinde boşluklu yapının kalmadığı, tüm gözeneklerin dolmuş olduğu görülmektedir. e ve f'de de C-S-H jellerinin varlığı görülmektedir. Yapı içerisinde var olan boşluklarda bakteriler tarafından oluşturulan CaCO_3 'ün formu olan kalsit ve vaterit görülmektedir.

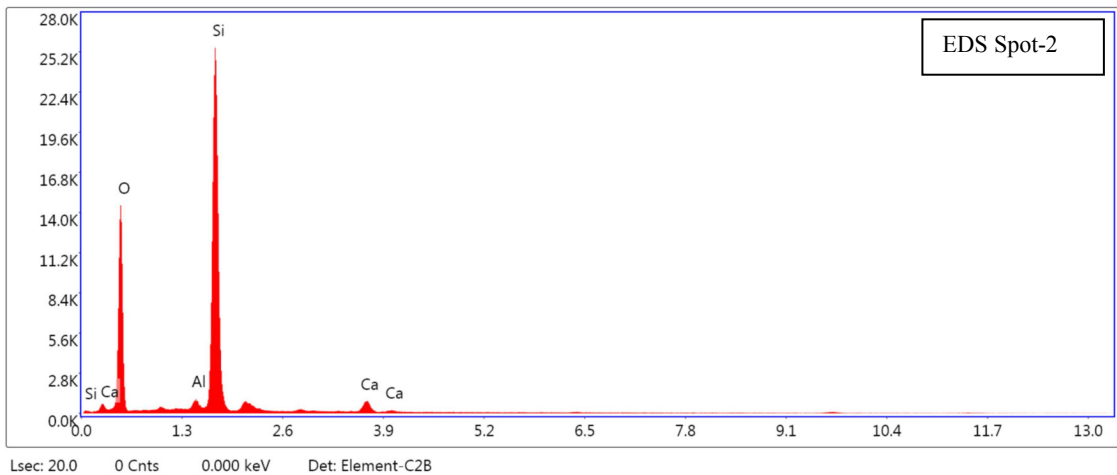


Şekil 4.11: B3 numunesi SEM mikrografları a) 200 X SEM b) 500 X SEM c) 1000 X SEM d) 2000 X SEM e) 5000 X SEM f) 10.000 X SEM g) EDS analizi spot alanları



eZAF Smart Quant Results

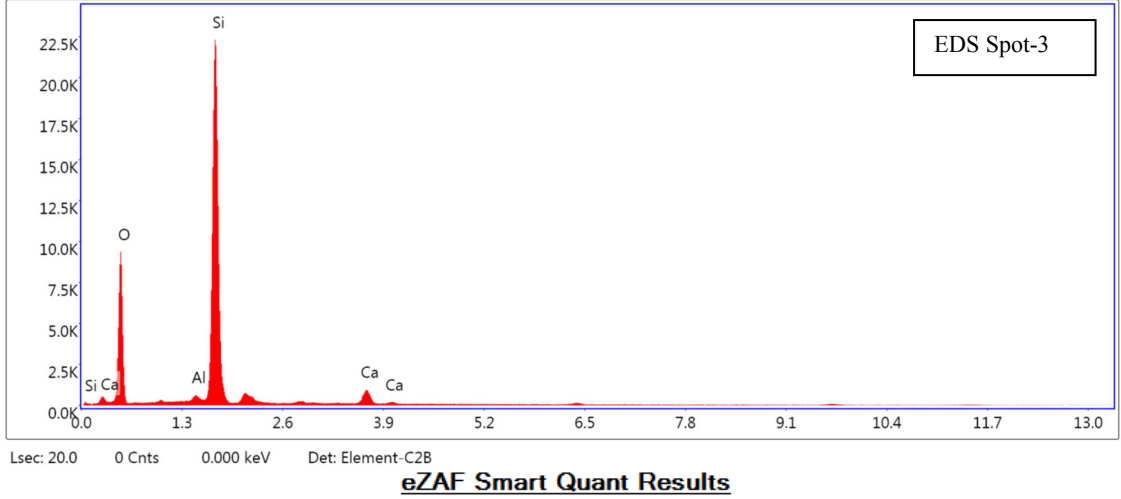
Element	Weight %	Atomic %	Net Int.	Error %	Kratio	Z	A	F
OK	44.15	59.32	2229.32	8.80	0.1242	1.0553	0.2666	1.0000
AlK	1.45	1.16	233.08	6.96	0.0104	0.9405	0.7413	1.0284
SiK	45.18	34.58	8121.06	2.92	0.3624	0.9613	0.8327	1.0022
CaK	9.21	4.94	835.78	3.33	0.0782	0.9081	0.9278	1.0086



eZAF Smart Quant Results

Element	Weight %	Atomic %	Net Int.	Error %	Kratio	Z	A	F
OK	51.24	65.30	4615.26	7.89	0.1828	1.0459	0.3410	1.0000
AlK	1.67	1.26	371.26	5.68	0.0118	0.9315	0.7381	1.0280
SiK	43.63	31.67	10866.99	2.91	0.3446	0.9520	0.8286	1.0013
CaK	3.47	1.76	441.06	4.35	0.0293	0.8990	0.9306	1.0114

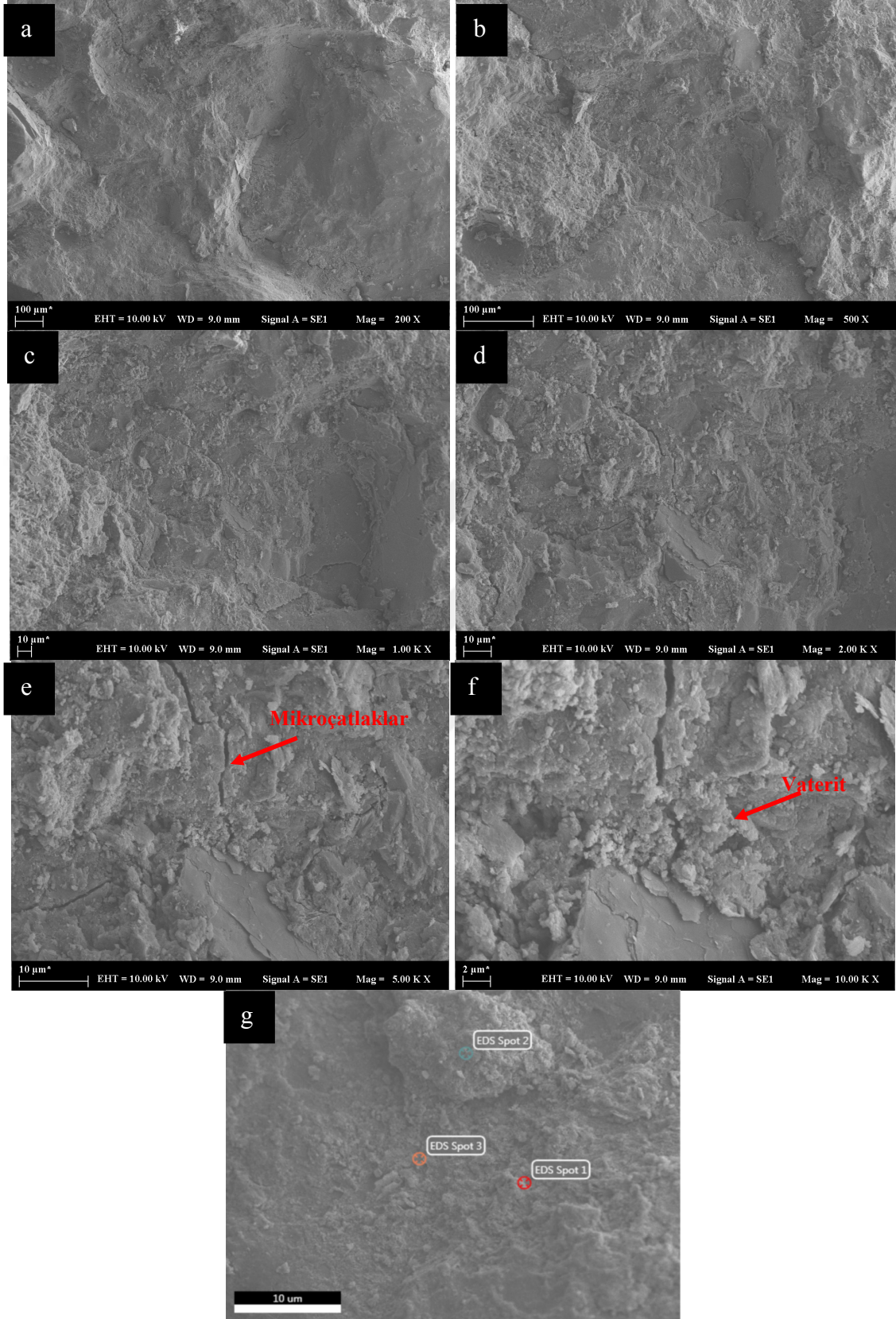
Şekil 4.11 (devam): B3 numunesi SEM mikrografları a) 200 X SEM b) 500 X SEM c) 1000 X SEM d) 2000 X SEM e)5000 X SEM f) 10.000 X SEM g) EDS analizi spot alanları.



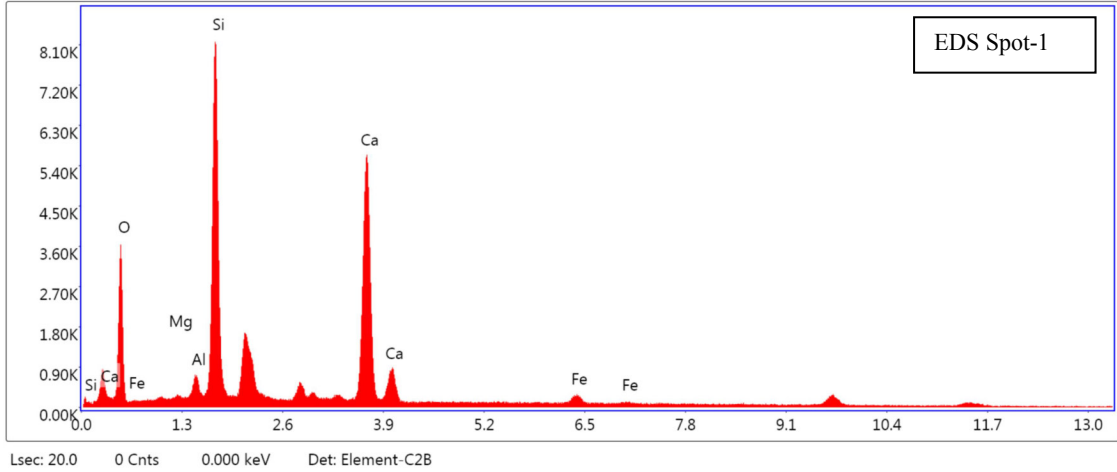
Element	Weight %	Atomic %	Net Int.	Error %	Kratio	Z	A	F
O K	45.94	60.50	2906.63	8.35	0.1476	1.0515	0.3055	1.0000
AlK	1.07	0.84	191.24	7.35	0.0078	0.9368	0.7506	1.0316
SiK	48.15	36.12	9581.95	2.78	0.3897	0.9575	0.8440	1.0014
CaK	4.83	2.54	477.86	4.38	0.0408	0.9043	0.9236	1.0102

Şekil 4.11 (devam): B3 numunesi SEM mikrografları **a)** 200 X SEM **b)** 500 X SEM **c)** 1000 X SEM **d)** 2000 X SEM **e)**5000 X SEM **f)** 10.000 X SEM **g)** EDS analizi spot alanları.

Bakteri içerikli B2O numunesinin mikrograflarında (Şekil 4.12), B3 numunesine kıyasla daha fazla boşluklu yapı olduğu görülmektedir. Numune yapısında hidrate olmamış cüruf tanecikleri, C-S-H jeli, CaCO₃ köprüleri ve vaterit bulunduğu görülmektedir.

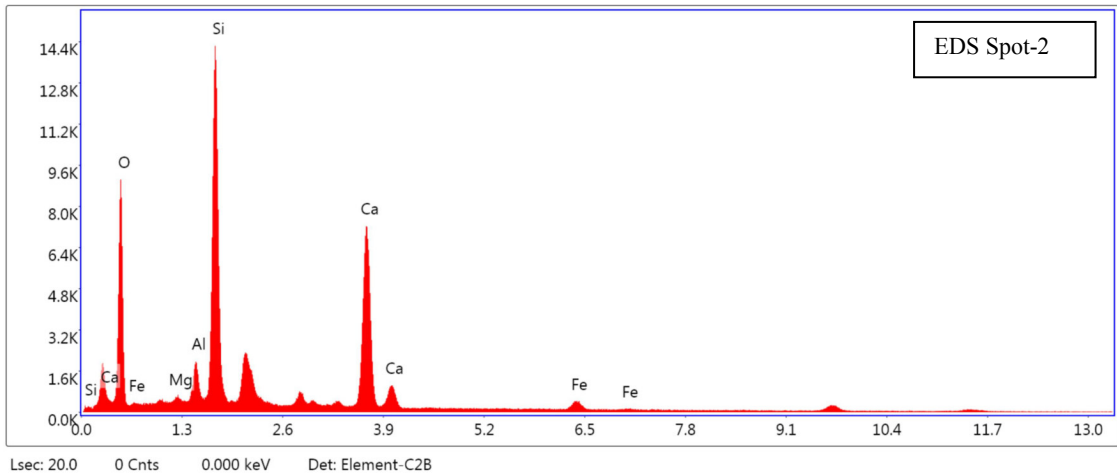


Şekil 4.12: B2O numunesi SEM mikrografları a) 200 X SEM b) 500 X SEM c) 1000 X SEM d) 2000 X SEM e) 5000 X SEM f) 10.000 X SEM g) EDS analizi spot alanları.



eZAF Smart Quant Results

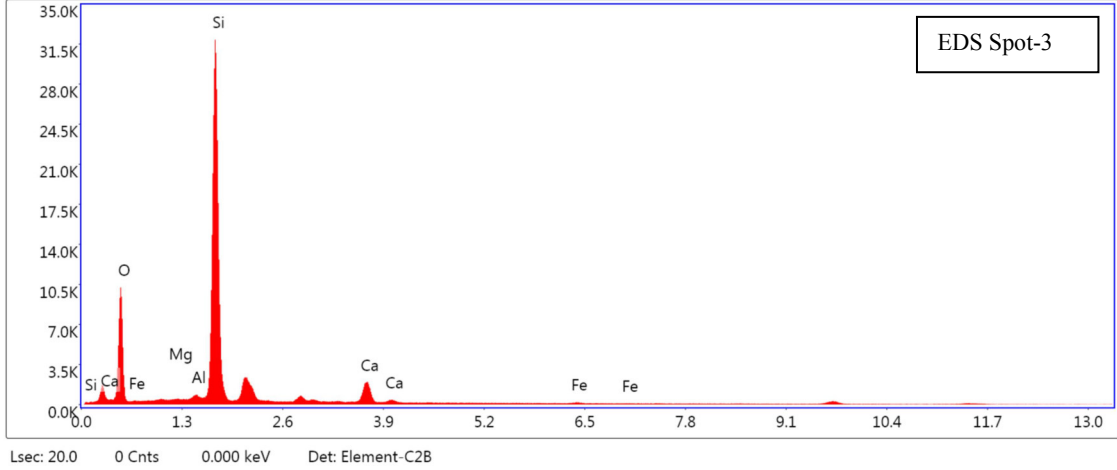
Element	Weight %	Atomic %	Net Int.	Error %	Kratio	Z	A	F
O K	40.37	59.61	1159.35	10.15	0.0674	1.0749	0.1554	1.0000
MgK	0.01	0.01	0.77	99.99	0.0000	0.9959	0.4960	1.0083
AlK	1.13	0.99	153.81	9.19	0.0071	0.9595	0.6461	1.0149
SiK	21.36	17.97	3484.00	3.92	0.1603	0.9810	0.7584	1.0091
CaK	34.34	20.24	3208.68	2.04	0.3087	0.9279	0.9635	1.0057
FeK	2.79	1.18	139.64	10.24	0.0232	0.8286	0.9732	1.0313



eZAF Smart Quant Results

Element	Weight %	Atomic %	Net Int.	Error %	Kratio	Z	A	F
O K	46.75	64.80	2915.80	9.50	0.0958	1.0642	0.1925	1.0000
MgK	0.72	0.66	139.02	10.79	0.0036	0.9854	0.5047	1.0083
AlK	2.83	2.32	677.05	6.08	0.0177	0.9493	0.6486	1.0139
SiK	21.76	17.18	6099.75	3.90	0.1586	0.9704	0.7457	1.0070
CaK	25.24	13.96	4123.38	2.04	0.2242	0.9174	0.9606	1.0074
FeK	2.70	1.07	239.76	7.30	0.0225	0.8188	0.9823	1.0373

Şekil 4.12 (devam): B2O numunesi SEM mikrografları a) 200 X SEM b) 500 X SEM c) 1000 X SEM d) 2000 X SEM e)5000 X SEM f) 10.000 X SEM g) EDS analizi spot alanları.

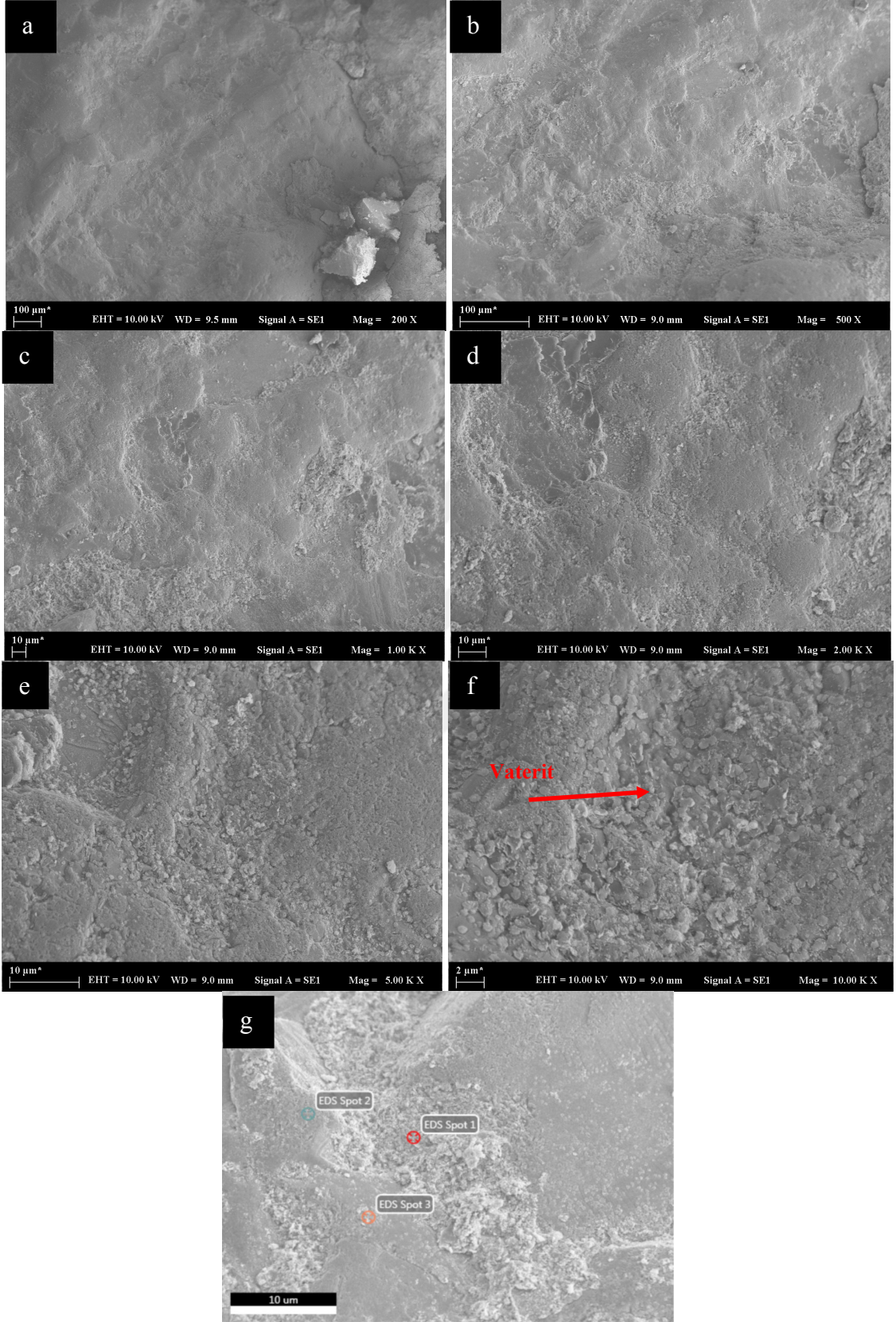


eZAF Smart Quant Results

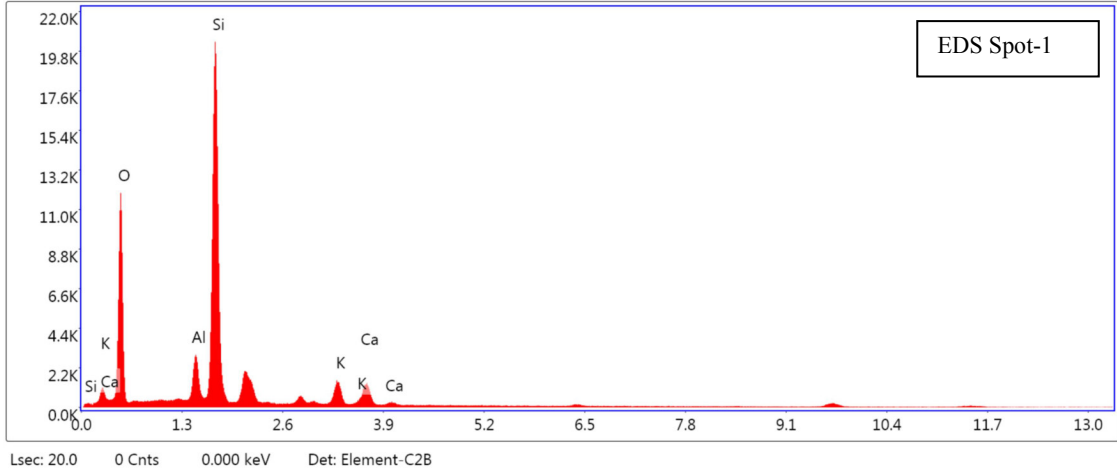
Element	Weight %	Atomic %	Net Int.	Error %	Kratio	Z	A	F
O K	41.68	56.75	3181.71	8.73	0.1174	1.0577	0.2663	1.0000
MgK	0.22	0.19	44.20	22.70	0.0013	0.9787	0.5992	1.0169
AlK	0.89	0.72	218.48	7.59	0.0064	0.9427	0.7408	1.0309
SiK	48.89	37.91	13548.31	2.79	0.3955	0.9636	0.8382	1.0019
CaK	7.67	4.17	1061.83	3.40	0.0648	0.9104	0.9195	1.0096
FeK	0.65	0.25	52.72	20.26	0.0056	0.8120	0.9926	1.0596

Şekil 4.12 (devam): B₂O numunesi SEM mikrografları **a)** 200 X SEM **b)** 500 X SEM **c)** 1000 X SEM **d)** 2000 X SEM **e)** 5000 X SEM **f)** 10.000 X SEM **g)** EDS analizi spot alanları.

Bakteri içerikli C2 numunesinin mikrograflarında (Şekil 4.13) boşluklu yapının neredeyse tamamen kapandığı, CaCO₃'ün formu olan vaterit olduğu görülmektedir. Bakteri içerikli B₃O, B₂O ve C2 numuneleri birbirleriyle kıyaslandığında, kıyaslandığında, en iyi sonucun C2 numunesinden alındığı görülmektedir.

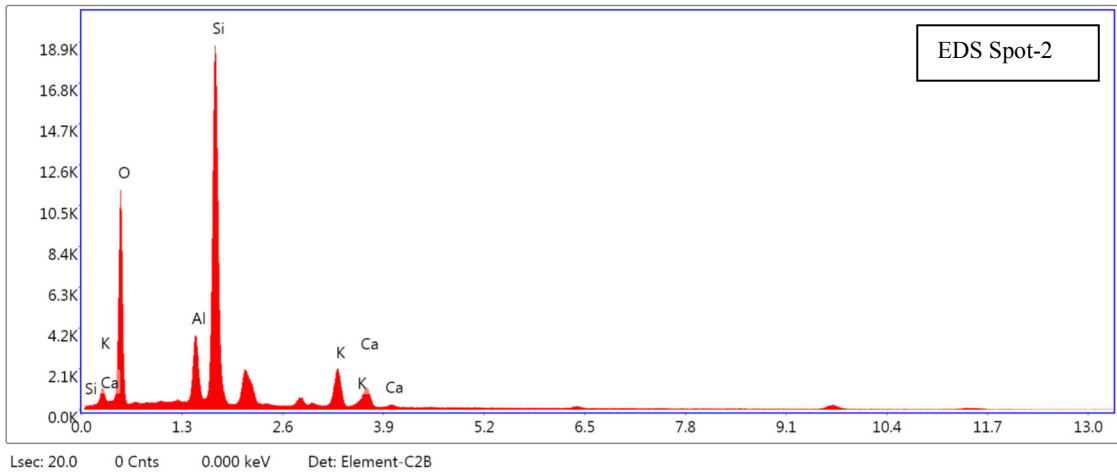


Şekil 4.13: C2 numunesi SEM mikrografları a) 200 X SEM b) 500 X SEM c) 1000 X SEM d) 2000 X SEM e) 5000 X SEM f) 10.000 X SEM g) EDS analizi spot alanları.



eZAF Smart Quant Results

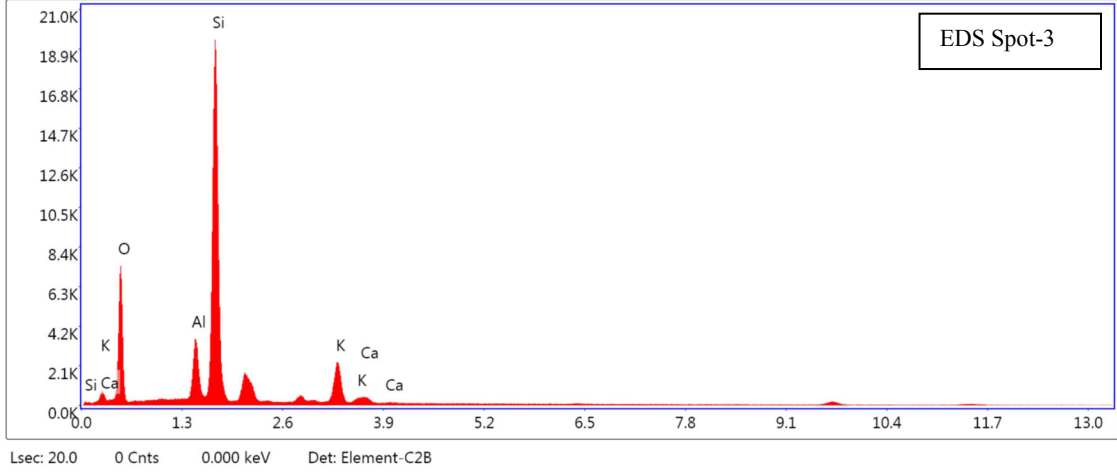
Element	Weight %	Atomic %	Net Int.	Error %	Kratio	Z	A	F
OK	49.43	64.44	3829.86	8.53	0.1469	1.0522	0.2825	1.0000
AlK	5.24	4.05	1183.45	4.83	0.0362	0.9375	0.7226	1.0201
SiK	35.36	26.26	8709.51	3.44	0.2656	0.9582	0.7817	1.0026
KK	4.69	2.50	719.69	4.25	0.0384	0.8888	0.9059	1.0182
CaK	5.28	2.75	695.44	3.84	0.0444	0.9050	0.9201	1.0092



eZAF Smart Quant Results

Element	Weight %	Atomic %	Net Int.	Error %	Kratio	Z	A	F
OK	48.11	63.33	3629.02	8.64	0.1382	1.0549	0.2723	1.0000
AlK	7.05	5.50	1610.31	4.60	0.0489	0.9400	0.7243	1.0182
SiK	33.50	25.12	8168.39	3.61	0.2472	0.9607	0.7662	1.0030
KK	7.00	3.77	1084.51	3.63	0.0575	0.8912	0.9071	1.0151
CaK	4.34	2.28	571.94	4.57	0.0362	0.9075	0.9120	1.0089

Şekil 4.13 (devam): C2 numunesi SEM mikrografları a) 200 X SEM b) 500 X SEM c) 1000 X SEM d) 2000 X SEM e) 5000 X SEM f) 10.000 X SEM g) EDS analizi spot alanları.



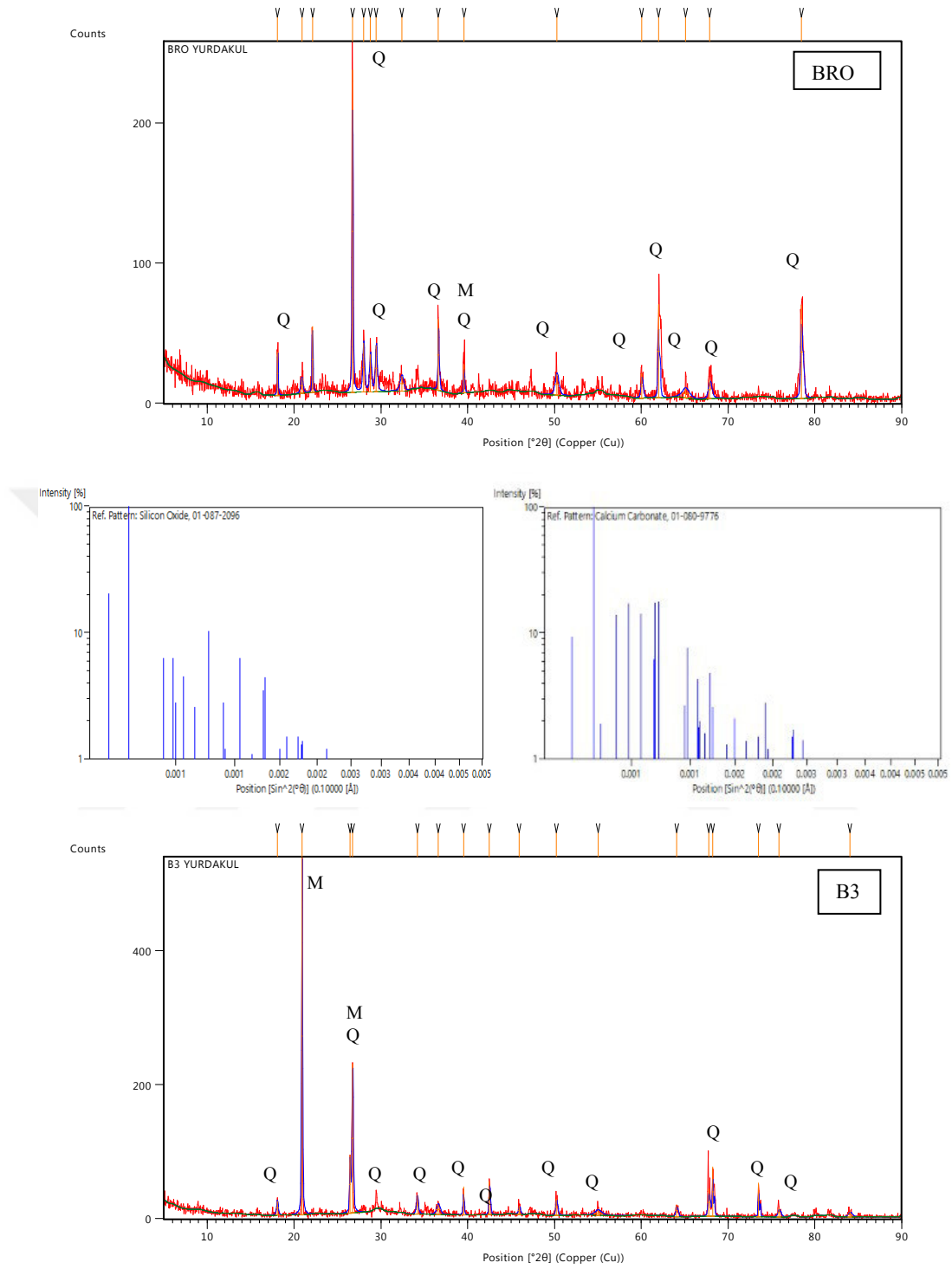
eZAF Smart Quant Results

Element	Weight %	Atomic %	Net Int.	Error %	Kratio	Z	A	F
O K	40.67	55.85	2358.62	8.92	0.1098	1.0629	0.2540	1.0000
AlK	7.36	5.99	1443.68	4.37	0.0536	0.9473	0.7517	1.0218
SiK	40.71	31.85	8356.02	3.44	0.3092	0.9683	0.7822	1.0027
K K	9.56	5.37	1191.83	3.53	0.0772	0.8984	0.8908	1.0087
CaK	1.70	0.93	180.47	9.34	0.0140	0.9149	0.8902	1.0085

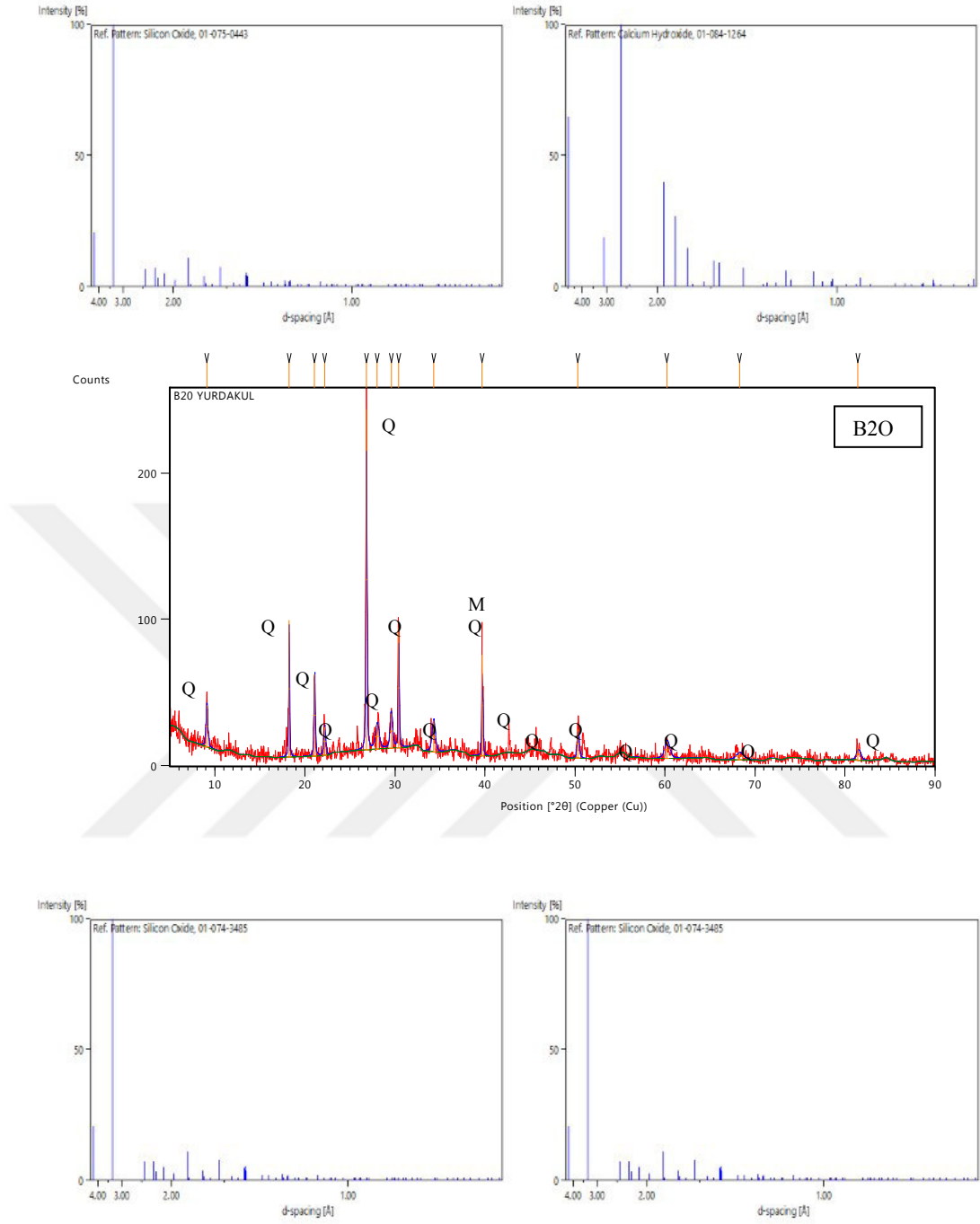
Şekil 4.13 (devam): C2 numunesi SEM mikrografları **a)** 200 X SEM **b)** 500 X SEM **c)** 1000 X SEM **d)** 2000 X SEM **e)** 5000 X SEM **f)** 10.000 X SEM **g)** EDS analizi spot alanları.

4.1.6. XRD Analizi

Bu çalışma kapsamında üretilen geleneksel harç numunelerinin 28 günlük ıslak kür süresinin ardından XRD analizi yapılarak, harç içerisindeki kimyasal bileşenlerin oranları ölçülmüştür. Faz analizi ölçümleri sonucunda difraktomda görülen piklerin çoğunun kuvars ve mulliti temsil ettiği görülmüştür (Şekil 4.14).



Şekil 4.14: XRD analiz sonuçları.



Şekil 4.14 (devam): XRD analiz sonuçları.

5. TARTIŞMA VE SONUÇ

Bütün dünyada, son yıllarda kendiliğinden iyileşebilen beton üretiminin araştırılmasına yönelik çalışmalar giderek artmıştır. Bu çalışmaların artması, mevcut kaynakların sistematik kullanılması ve çevreye zararın önlenmesi yönünde etkilidir. Bu sebeple bu tez çalışmasında, kalsiyum karbonat ürettiği belirlenmiş, daha önceden bu konuda kullanıldığına literatürde rastlanılmamış olan üç farklı bakteri türü kullanılmış olup literatüre kazandırılmaya çalışılmıştır.

Yapılan çalışmada, geleneksel yöntemlerle üretilen harç içerisine katılan kalsiyum karbonat presipitasyonu sağladığı belirlenen mağara izolatları, önce uygun besi yerlerinde kültürlendikten sonra hazırlanan harçların içerisine karışım suyuyla birlikte dahil edilmişlerdir. Deneysel koşulların ve cihaz kalibrasyonlarının üretilen numunelerin özelliklerini etkilemekte olduğu göz önünde bulundurularak çalışmada üretilen numunelerin özellikleri, su emme, ultrasonik ses, eğilme ve basınç deneyleri, SEM ve XRD analizleri ile belirlenmeye çalışılmış olup kullanılan bu yeni bakteri suşlarının beton/harç iyileşmesine katkısının ne yönde olabileceği hakkında çeşitli bulgular elde edilmiştir.

Bu çalışmada, *Bacillus thuringiensis* cinsi bakterilerin yanı sıra *Pseudomonas putida* ve *Sphingomonas mucosissima* cinsi bakteriler kullanılarak kalsiyum karbonat çökeltiminin ne oranda gerçekleştirilebileceği görülmek istenmiştir. Bakterilerin üremesi uygun besi ortamında sağlanmış olup ml'de yaklaşık 10^9 hücre olacak şekilde bakteri süspansiyonları hazırlanmıştır. Daha sonrasında karışım suyuyla harç üretimine dahil edilen bu bakterilerin, yapılan SEM ve XRD analizi sonuçlarına göre numunelerde mevcut bulunan boşluklarda CaCO_3 üretimini gerçekleştirdikleri görülmüştür. En çok CaCO_3 üretiminin *Pseudomonas putida* cinsi bakteri tarafından 0,6 s/ç oranlı harç numunesinde sağlandığı analiz sonuçlarında tespit edilmiştir.

Bacillus thuringiensis, *Pseudomonas putida* ve *Sphingomonas mucosissima* bakterilerinin kullanıldığı bu çalışmada bakterileri TSA besiyerinde üretilmiş ve ml'de yaklaşık 10^9 hücre olacak şekilde bakteri süspansiyonları hazırlanmıştır. Karışım suyu ile birlikte harç karışımına dahil edilmeleriyle harç numuneleri oluşturulmuştur. 28 günlük kürlenme süresinin ardından su emme testleri, ultrases geçirgenliği, eğilme ve basınç dayanımı deneyleri gerçekleştirilmiş

olup bakteri karışımı harçlarda kontrol numunelerine kıyasla daha az su emilimi gerçekleştiği görülmüştür. SEM ve XRD analizleri sonucunda da su emilim kapasitesindeki azalışın bakterilerin CaCO_3 üretimiyle gözenekleri doldurmuş olmasından kaynaklı olduğu görülmüştür. Gözenekli yapının azalmış olması sebebiyle, yapılan ultrases geçirgenliği deneylerinde bakterili harç numunelerinde kontrol numunelerine göre daha hızlı bir ses geçişi olduğu tespit edilmiştir. Fakat boşluklu yapının azalmasına, gözeneklerin CaCO_3 ile dolmasına karşın numunelerin basınç dayanımlarında kontrol numunelerine oranla dikkate değer bir artış gözlenememiş olup yer yer basınç dayanımlarında düşüşler tespit edilmiştir.

Mineral katkı içeren karışımlarda, erken yaş sayılabilecek 28 günlük kür süresinden dolayı numunelerin basınç dayanımlarında olumlu yönde kayda değer bir artış olmadığı görülmüştür. Mineral katkıların kullanımıyla karışımda s/ç oranında artış ihtiyacı ortaya çıkmıştır. Çünkü karışım içerisindeki ince malzemenin fazlalığı sebebiyle kullanılan su miktarının yeterli gelmemesi karışım harcının kuru bir yapıda olmasına ve kalıba iyi yerleşmemesine, dolayısıyla da boşluklu yapının fazla olmasına sebep olmuştur. Akışkanlaştırıcıların kullanılmadığı bu harç karışımlarında su gereksinimi en çok 0,4 s/ç oranlı karışımlarda gözlenmiş olup 0,5 ve 0,6 s/ç oranlı numuneler ince malzemelerin fazlalığına rağmen kalıplara daha iyi yerleşim sergilemişlerdir.

- Cüruf kullanılan harç numunelerinde su emme kapasitesi azalmasında toplamda 8 numunede ortalama %15 artış gözlenirken geri kalan 2 numunede ortalama %5 azalma gözlenmiştir. En iyi sonuç 0,5 s/ç oranlı numunelerde elde edilmiştir. Basınç dayanımında da yalnızca 5 numunede ortalama %18 basınç artışı gözlenirken geri kalan numunelerde ortalama %30 azalma gözlenmiştir.
- Metakaolinin kullanıldığı harç numunelerinde hem basınç hem de su emme kapasitesi açısından olumlu yönde bir artış çok fazla gerçekleşmemiş olup su emme kapasitesi azalmasında toplamda sadece 5 numunede ortalama %9 artış gözlenirken geri kalan numunelerde %12 azalma gözlenmiştir. Basınç dayanımında da sadece 4 numune de %12 artış gözlenirken geri kalan numunelerde %49 azalma görülmüştür.
- Uçucu külün kullanıldığı numunelerde su emme kapasitesinde 4 numunede toplamda %8 artış gözlenirken geri kalan numunelerde %13 azalma gözlenmiştir. Basınç dayanımlarında da 6 numunede ortalama %31,5 artış gözlenirken geri kalan numunelerde ortalama %26 azalma görülmüştür.

0,4 s/ç oranlı üretilen numuneler incelendiğinde, bakterili numunelerin kontrol numunelerine kıyasla boşluklu yapısının azaldığı, buna bağlı olarak su emme kapasitesinde bir azalma gerçekleştiği görülmüştür. Numunelerin üretim aşamasında çok kuru bir harç karışımı elde edilmiştir. Bunun sebebi, ince malzeme olarak kullanılan mineral katkıların karışımdaki suyu bünyelerine daha fazla çekmeleri ve dolayısıyla karışımdaki su ihtiyacını arttırmalarıdır. Mevcut şartlarda, kıvam artışı için kimyasal katkı kullanımı yapılmadan harcın gözenekliliğinin ne oranda azalacağı ve bunun dayanıma nasıl bir etkisi olacağı gözlenmek istenmiştir. Bütün bunların dikkate alınmasıyla üretilen numunelerin basınç dayanımı sonuçları incelendiğinde, değerlerin çok değişken sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir. Elde edilen max. dayanım 63 MPa olmasına karşın ortalama dayanımın 40 MPa olduğu görülmüştür.

0,5 s/ç oranlı üretilen numuneler incelendiğinde, bakterili numunelerin referans numunelerine oranla boşluklu yapısının azaldığı, buna bağlı olarak su emme kapasitesinde kontrol numunelerine kıyasla azalma gerçekleştiği görülmüştür. Lakin elde edilen sonuçlar doğrultusunda, bakterili numuneler ile referans numuneleri arasında belirgin bir düzende sayılabilecek nitelikte bir basınç artışı olmadığı görülmüştür. Numunelerin basınç dayanımı sonuçları incelendiğinde, elde edilen max. basınç değerinin 49 MPa olduğu, ortalama değer ise 41,5 MPa olduğu görülmüştür.

0,6 s/ç oranlı üretilen numuneler incelendiğinde de, bakterili numunelerin referans numunelerine kıyasla boşluklu yapısının azaldığı, buna bağlı olarak su emme kapasitesinde bir düşüş gerçekleştiği görülmüştür. Elde edilen sonuçların değişkenliğinden dolayı bakterili numunelerde, referans numunelerine oranla düzenli olarak sayılabilecek nitelikte bir basınç artışı olmadığı görülmüştür. Numunelerin basınç dayanımı sonuçları incelendiğinde, elde edilen max. basınç değerinin 40,9 MPa olduğu, ortalama değer ise 33 MPa olduğu görülmüştür.

Bu çalışma kapsamında harç numuneleri üzerinde çatlatma yapılmamış olup ileride yapılması düşünülmektedir. Yapılmış olan bu çalışmada amaç, karışımda kullanılan bakterilerin CaCO_3 üretimini sağlayabilmesi olup betonun/harcın özelliklerinde iyileşme görülmesini sağlamaktır. Gerçekleştirilen tüm bu incelemeler sonucunda, bakteri karışımı içeren çimento harcı numunelerinde, CaCO_3 üretimiyle boşluklu yapıda azalma, buna bağlı olarak da su emme kapasitelerinde referans numunelerine kıyasla bir azalma olduğu görülmüştür. Bu durum,

kullanılan bakteri türlerinin harç karışımında beklenen CaCO_3 üretimini yapabildiklerini göstermektedir. Fakat bakteri kullanımının basınç dayanımına olan etkileri belirli bir artış ya da azalış göstermediği için tam olarak belirlenememiş olup bu konuda iyileşme sağlanabilmesi için akışkanlaştırıcıların da harç üretiminde kullanılması ve mineral katkıların karışımdaki varlıklarından dolayı 28 günden daha uzun süre numunelerin kür süresinin uzatılmasının gerekli olduğu düşünülmektedir. Bu sayede karışıma katılan katkı maddelerinin de uygun kür süresi altında dayanımda artış yapabilecekleri süre sağlanmış olacaktır.

Bu sonuçlar ışığında farklı tür bakteri içeren mineral katkılı harçlarda, harçlara bakteri ilave edilmesinin su emme değerlerinde azatmalar meydana getirmesi, bununla beraber harç ve betonların durabilite özellikleri üzerinde sağlayacağı katkılar düşünüldüğünde oldukça olumlu etkisi olduğu görülmüştür. Özellikle betonun geçirimsiz olmasının çelik donatının korozyonunu engellemesi, bu sayede de yapıların ekonomik ömrünün ve deprem karşısındaki performanslarının artırılması bakımından oldukça önemlidir. Betonarme yapılarda genel manada durabilite özelliklerinin ne kadar önemli olduğu son yıllarda ağırlık kazanan çalışmalarda da görülmektedir. Dolayısıyla geçirimsiz betonun özelliklerinde meydana gelecek iyileşme, bakteri ilave edilmesiyle birlikte harç ve betonların servis ömürlerinin geliştirilmesi, ekonomik ömrünün uzatılması ve deprem performansının artırılması bakımından da önemlidir.

KAYNAKLAR

- 1) Bakteri Bazlı, Kendini Onaran Betonun Geliştirilmesi ve Kullanımı, 2015, CPI Worldwide.
Erişim adresi:
https://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:FrCA_2pfqaYJ:https://www.cpi-worldwide.com/tr/journals/artikel/43215/bakteri-bazli-kendi-kendini-onaran-betonun-gelistirilmesi-ve-kullanm+&cd=1&hl=tr&ct=clnk&gl=tr
- 2) Çimento Sektörü Raporu (2015/1), 2015, Sektörel Raporlar ve Analizler Serisi, T.C. Bilim, Sanayi Ve Teknoloji Bakanlığı
- 3) Karol, R.H., 2003, Chemical grouting and soil stabilization, CRC Press, 3rd Edition, New York, ISBN: 0-8247-4065-3.
- 4) Hooda P.S., Shaheen S.M., Tsadilas C.D., 2014, Opportunities and challenges in the use of coal fly ash for soil improvement: A Review, Journal of Environmental Management, Vol:145, 249-267.
- 5) Shackelford C.D., Jefferis S.A., 2000, Geoenvironmental engineering for in-situ remediation, International Conference on Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Melbourne, Australia, Technomic Publ.Co., Inc., Lancaster, PA, Vol. 1, 121-185.
- 6) Vekariya M.S., Pitroda J., 2013, Bacterial concrete: New Era for construction industry, International Journal of Engineering Trends and Technology (IJETT), Vol. 4(9).
- 7) Hendrik, G., 2005, Background facts and issues concerning cement and cement data, U.S. Geological Survey, doi: 10.3133/ofr20051152
- 8) Schlangen E, Joseph C., 2009, Self-healing processes in concrete, self-healing materials: fundamentals, design strategies and applications, In: Gosh S.K. (ed.), . Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH and Co KGaA, ISBN: 978-3-527-31829-2, 141–82.
- 9) Y. Yang, M.D. Lepech, E.H. Yang, V.C. Li, 2009, Autogenous healing of engineered cementitious composites under wet-dry cycles, Cement and Concrete Research, Vol. 39 , 382–390.

- 10) J.S. Kim, E. Schlangen, 2011, Self-healing in ECC stimulated by SAP under flexural cyclic load, In: Proceedings of 3rd International Conference on Self Healing Materials, 27-29 June 2011, Bath, UK.
- 11) Snoeck, D., Van-Tittelboom, K., De-Belie, N., Steuperaert, S., Dubruel, P., 2012, The Use of superabsorbent polymers as a crack sealing and crack healing mechanism in cementitious materials, In: Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting III- Proceedings of the 3rd International Conference on Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting, ICCRRR-3, 3-5 September 2012, Cape Town, South Africa, CRC Press, ISBN: 9780415899529, 152–157.
- 12) Wang, J.Y., Soens, H., Verstraete, W., De Belie, N., 2014, Self-Healing Concrete by Use of Microencapsulated Bacterial Spores, Cement and Concrete Research, Vol. 56 , 139–152.
- 13) Sierra Beltran, M.G., Jonkers, H.M., Mera Ortiz, W., 2013, Concrete with Abaca Fibres and Bacteria to Improve Sustainability and Performance of Irrigation Canals in Ecuador, In: Proceedings of the 1st International Conference on Natural Fibres, Guimaraes, 9-11 June 2013.
- 14) Li, G., 2004, Properties of high-volume fly ash concrete incorporating nano-SiO₂, Cement and Concrete Research, Vol: 34 (9), 1043.
- 15) Kılınc, C., 2007, Katkı dozajı ve taze beton sıcaklığının kendiliğinden yerleşen beton özelliklerine etkisi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- 16) Işık, A., 2018, Farklı mineral katkı içeren harç numunelerinin dayanım ve dayanıklılık özelliklerinin incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- 17) Souradeep, G., Dai, P.S., Wei, K.H., 2017, Autonomous healing in concrete by bio-based healing agents-A Review, Construction and Building Materials, Vol: 146, 419-428
- 18) Yadollahi, M , Varolgüneş, S , İşsever, F., 2017, Na₂O, Silika modülü, su/bağlayıcı oranı ve yaşlanmanın cüruf tabanlı geopolimerlerin basınç mukavemetinde olan etkileri, Türk Doğa ve Fen Dergisi , Vol:6 (2) , 26-31.

- 19) Justnes, H., Martius-Hammer, T.A., 2016, Sürdürülebilirlik-beton inovasyonundaki öncü rolü, *Hazır Beton*, Vol: 23, 77-82 .
- 20) Worrell, E., Price, L., Martin, N., Hendriks, C., Meida, L.O., 2001, Carbon dioxide emissions from the global cement industry, *Annual Review of Energy and the Environment*, Vol: 26, 303–329.
- 21) De Muynck, W., De Belie, N., Verstraete, W., 2010, Microbial carbonate precipitation in construction materials: A Review, *Ecol. Eng.* 36 (2), 118–136.
- 22) Kılıç, İ., 2013, Uçucu kül esaslı geopolimerlerin ekstraksiyonu.
- 23) Hearn, N., 1998, Self-sealing, autogenous healing and continued hydration: What is the difference?, *Material Structure*, Vol:31 (8), 563–567.
- 24) Abrams, D.A., 1913, Tests of bond between concrete and steel, University of Illinois at Urbana Champaign, College of Engineering. Engineering Experiment Station.
- 25) Soroker, V., Denson, A., 1926, Autogenous healing of concrete, *Zement* Vol:25 (30), 76.
- 26) Brandeis, F., 1937, Autogenous healing of concrete, *Beton und Eisen*, Vol: 36, 12.
- 27) Lauer, K.R. and Slate, F.O., 1956, Autogenous healing of cement paste, *ACI Journal*, Vol: 27(10), 1083-98.
- 28) Dhir, R.K., Sangha, C.M., Munday, J.G.L., 1973, Strength and Deformation Properties of Autogenously Healed Mortars. *ACI Journal*, Vol: 3, 231-236.
- 29) Malinskii, Y.M., Prokopenko, V.V., Ivanova, N.A., Kargin, V.A., 1970, Investigation of self-healing of cracks in polymers, *Polymer Mech.*, Vol: 6 (3), 382–384.
- 30) Mihashi, H., Nishiwaki, T., 2012, Development of engineered self-healing and self-repairing concrete state of the art report, *Journal of Advanced Concrete Technology*, Vol:10 (5), 170–184.
- 31) Neville, A.M, 2002, Autogenous healing - A concrete miracle?, *Concrete International*, Vol:24, 76-82.
- 32) Ramm, W. and Biscopig, M., 1998, Autogenous healing and reinforcement corrosion of water-penetrated separation cracks in reinforced concrete, *Nuclear Engineering and Design*, Vol: 179 (2), 191–200.

- 33) Huang, H. and Ye, G., 2012, Simulation of self-healing by further hydration in cementitious materials, *Cement and Concrete Composites*, Vol:34(4), 460–467.
- 34) Mihashi, H. and Nishiwaki, T., 2012, Development of engineered self-healing and selfrepairing concrete-state of the art report, *Journal of Advanced Concrete Technology*, Vol:10 (5), 170–184.
- 35) KANG, C. and Kunieda, M., 2014, Evaluation and observation of autogenous healing ability of bond cracks along rebar, *Materials*, Vol 7(4), 3136-3146, ISSN:1996-1944, doi: 10.3390/ma7043136
- 36) Talaiekhazan, A., Ali, K., Arezo, S., Abd, M., Mohamad, A.F., 2014, A review of self-healing concrete research development, *Journal of Environment Treatment Technology*, Vol: 2 (1), 1–11.
- 37) De Rooij, M., Van Tittelboom, K., De Belie, N., Schlangen, E., 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, Springer, Vol:(11), ISBN: 978-94-007-6623-5.
- 38) Edvardsen, C., 1999, Water permeability and autogenous healing of cracks in concrete, *Materials Journal*, Vol:96(4), 448-454.
- 39) Reinhardt, H.W. and Jooss, M., 2003, Permeability and self-healing of cracked concrete as a function of temperature and crack width, *Cement and Concrete Research*, Vol:33 , 981–985.
- 40) Li, V.C. and Yang, E.-H., 2007, Self healing in concrete materials, In: *Self Healing Materials*, Springer, 161–193.
- 41) Worrell, E., Price, L., Martin, N., Hendriks, C., and Ozawa Meida, L., 2001, Carbon dioxide emissions from the global cement industry, *Annual Review of Energy and the Environment*, Vol:26, 303–329.
- 42) Van Tittelboom, K. and De Belie, N., 2013, Self-healing in cementitious materials-A review, *Materials*, Vol:6 (6), 2182–2217.
- 43) Li, V.C., Lim, Y.M., Chan, Y.-W., 1998, Feasibility study of a passive smart self-healing cementitious composite, *Composites Part B: Engineering*, Vol: 29 (6), 819–827.

- 44) Li, V.C., Wang, S., Wu, C., 2001, Tensile strain-hardening behavior of polyvinyl alcohol engineered cementitious composite (PVA-ECC), *ACI Materials Journal*, Vol: 98 (6), 483–492.
- 45) Herbert, E.N. and Li, V.C., 2013, Self-healing of microcracks in engineered cementitious composites (ECC) under a natural environment, *Materials*, Vol: 6 (7), 2831–2845.
- 46) Lee, H., Wong, H., Buenfeld, N., 2010, Potential of superabsorbent polymer for self-sealing cracks in concrete, *Adv. Appl. Ceram.* Vol:109 (5), 296–302.
- 47) Kim, J. and Schlangen, E., 2010, Super absorbent polymers to simulate self healing in ECC, 2nd International Symposium on Service Life Design for Infrastructures, RILEM Publications SARL, Delft, 849-858, e-ISBN: 978-35158-097-4
- 48) Mignon, A., Graulus, G-J, Snoeck, D., Martins, J., De Belie, N., Dubruel, P., Van Vlierberghe, S., 2015, pH-sensitive superabsorbent polymers: A potential candidate material for self-healing concrete, *Journal of Materials Science*, Vol: 50 (2), 970–979.
- 49) Snoeck, D., Van Tittelboom, K., Steuperaert, S., Dubruel, P., De Belie, N., 2014, Self-healing cementitious materials by the combination of microfibrils and superabsorbent polymers, *J. Intell. Mater. Syst. Struct.*, Vol: 25 (1), 13–24.
- 50) Porter, JR, 1976, Antony van Leeuwenhoek: Tercentenary of his discovery of bacteria, *bacteriological reviews*, Vol:40 (2), 260-269. PMID 786250. Erişim tarihi: 19.10.2019
- 51) Eagon R., 1962, *Pseudomonas Natriegens*, A marine bacterium with a generation time of less than 10 minutes, *J. Bacteriol.* Vol:83, 736-7. PMID 13888946
- 52) Whitman W, Coleman D, Wiebe W, 1998, Prokaryotes: The unseen majority, *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* Vol:95(12), 6578-83. doi:10.1073/pnas.95.12.6578, PMID 9618454
- 53) Madigan M.T. and Martinko, J. M., 2010, *Mikroorganizmaların biyolojisi* (Çeviri editörü: Cumhur Çökmüş), Palme Yayınları, Ankara, ISBN: 978-605-5829-62-9.
- 54) Gram, HC, 1884, Über die isolierte färbung der schizomyceten in schnitt- und trockenpräparaten, *Fortschr. Med.* Vol: 2, 185-189.
- 55) Thomson R, Bertram H, 2001, Laboratory dagnosis of central nervous system infections, *Infect Dis Clin. North. Am.*, Vol:15(4), 1047-71. doi:10.1016/S0891-5520(05)70186-0. PMID 11780267

- 56) Fredrickson J.K., Zachara J.M., Balkwill D.L., Kennedy, D., Li, S.W., Kostandarithes, H.M., Daly, M.J., Romine, M.F., Brockman, F.J., 2004, Geomicrobiology of high-level nuclear waste-contaminated vadose sediments at the hanford site, Washington State, *Applied Environmental Microbiology*, Vol:70(7), 4230-41 doi:10.1128/AEM.70.7.4230-4241.2004. PMID 15240306
- 57) Sharma, P., 2016, A study on self-healing mechanism of microcracks in concrete structures using bacillus bacteria, *International Journal of Scientific Research in Science, Engineering and Technology*, Vol:2(1), pISSN: 2395-1990, oISSN: 2394-4099
- 58) Jonkers, H., 2011, Bacteria-based self-healing concrete, *Heron* 56 (1/2)
- 59) Wang, J., Soens, H., Verstraete, W., De Belie, N., 2014, Self-Healing Concrete by Use of Microencapsulated Bacterial Spores, *Cement and Concrete Research*, Vol: 56, 139–152
- 60) Wang, J., Van Tittelboom, K., De Belie, N., Verstraete, W., 2012, Use of Silica Gel or Polyurethane Immobilized Bacteria For Self-Healing Concrete, *Construction and Building Materials*, Vol: 26 (1), 532–540.
- 61) Pei, R., Liu, J., Wang, S., Yang, M., 2013, Use of bacterial cell walls to improve the mechanical performance of concrete, *Cement and Concrete Composite*, Vol: 39, 122–130.
- 62) Luna-Finkler, C.L., Finkler, L., 2012, *Bacillus sphaericus* and *Bacillus thuringiensis* to Insect Control: Process Development of Small Scale Production to Pilot-Plant- Fermenters, INTECH Open Access Publisher. doi: 10.5772/28501
- 63) Jonkers, H.M., Thijssen, A., Muyzer, G., Copuroglu, O., Schlangen, E., 2010, Application of bacteria as self-healing agent for the development of sustainable concrete, *Ecological Engineering*, Vol: 36 (2) , 230–235
- 64) Wang, J., De Belie, N., Verstraete, W., 2012, Diatomaceous earth as a protective vehicle for bacteria applied for self-healing concrete, *Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology*, Vol: 39 (4) (2012) 567–577
- 65) Wang, J., Snoeck, D., Van Vlierberghe, S., Verstraete, W., De Belie, N., 2014, Application of hydrogel encapsulated carbonate precipitating bacteria for approaching a realistic self-healing in concrete, *Construction and Building Materials*, Vol: 68, 110–119

- 66) Jonkers, H., 2007, Self-healing concrete: A biological approach, *Self-healing materials: An alternative approach to 20 centuries of materials science*, In: van der Zwaag, S. (ed) Springer, Netherlands, 195–204.
- 67) De Muynck W., Debrouwer D., De Belie N., Verstraete W., 2008, Bacterial Carbonate Precipitation Improves The Durability of Cementitious Materials, *Cement and Concrete Research*, Vol: 38, 1005-1014.
- 68) Ramachandran, S.K., Ramakrishnan, V., Bang, S.S., 2001, Remediation of Concrete Using Micro-organisms, *ACI Materials Journal*, Vol: 98, 3–9.
- 69) Achal, V., Mukherjee, A., Reddy, M. S., 2011, Microbial Concrete: Way to Enhance the Durability of Building Structures, *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol: 23, 730-734.
- 70) Ghosh, P., Mandal, S., Chattopadhyay, B.D., Pal, S., 2005, Use of microorganism to improve the strength of cement mortar, *Cement and Construction Research*, Vol: 35 (10), 1980–1983.
- 71) Jonkers, H.M., Schlangen, E., 2007, Self-healing of cracked concrete: a bacterial approach, In: Carpenteri et al (eds), *Proc of FRACOS6: Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures*, 17-22 June 2007, Catania, Italy, ISBN: 978-0-415-44617-4, 1821-1826
- 72) Luo, M., Qian, C.-x., Li, R.-y., 2015, Factors affecting crack repairing capacity of bacteria-based self-healing concrete, *Construction Building Materials*, Vol: 87, 1–7.
- 73) Bang, S.S., Galinat, J.K., Ramakrishnan, V., 2001, Calcite precipitation induced by polyurethane-immobilized *Bacillus pasteurii*, *Enzyme and Microbial Technology* Vol:28(4–5), 404–409, PMID: 11240198. doi: 10.1016/S0141-0229(00)00348-3
- 74) Qian C., Luo M., LI R., Rong H., 2015, Efficiency of Concrete Crack-Healing Based on Biological Carbonate Precipitation, *Journal of Wuhan University of Technology- Material Science Education*, Vol:30(6), 1255-1259.
- 75) Hall-Stoodley, L., Costerton, J.W., Stoodley P., 2004, Bacterial biofilms: from the natural environment to infectious diseases. *Nature Reviews Microbiology*, Vol: 2, 96–108
- 76) Patro Sanjaya, K., Chandra, K.S, Sugandha, S., Chand, S., Sahu, S.K., Manimaran, S., 2015, Effect of bacteria on the properties of concrete using Portland slag cement,

- Proceedings of the National Conference on Recent Advances and Future Prospects in Civil Engineering (RAFPCE-15), 89- 98.
- 77) Kim, H. K., Park, S. J., Han, J. I. ve Lee, H. K., 2013, Microbially mediated calcium carbonate precipitation on normal and lightweight concrete, *Construction and Building Materials*, Vol: 38, 1073-1082.
- 78) Bundur, Z., Ferron, R., Kirisits, M.J., 2015, Biyomineralizasyonun Çimento Esaslı Malzemelerin Performansına Olan Etkisinin Araştırılması, 9. Ulusal Beton Kongresi, 16-18 Nisan 2015, Antalya, 215-224.
- 79) Harshaki, J., Mitali, S., Neha, A., Pragati, B., 2016, Bio Concrete and Bacteria Based Self Healing Concrete , *International Journal of Research in Engineering and Technology*, Vol 5 (05), eISSN (2319-1163), pISSN (2321-7308).
- 80) De Muynck, W., De Belie, N. ve Verstraete, W., 2010, Microbial carbonate precipitation in construction materials: a review, *Ecological Engineering*, Vol: 36(2), 118-136.
- 81) Dejong J.T., Proto C., Kuo M., Gomez, M., 2014, Bacteria, Bio-films, and Invertebrates the Next Generation of Geotechnical Engineers?, *Geo-Congress Technical Papers*, GSP 234, 3959-68.
- 82) Abdel- Gawwad H.A. Abo-El-Enein S.A., Ali A.H., Talkhan F.N., 2012, Utilization of Microbial Induced Calcite Precipitation for Sand Consolidation and Mortar Crack Remediation, *HBRC Journal*, Vol: 8(3), 185-192. doi: 10.1016/j.hbrej.2013.02.001
- 83) Achal V., Pan X., Özyurt N. April, 2011, Improved strength and durability of fly ash-amended concrete by microbial calcite precipitation, *Ecological Engineering*, Vol: 37(4), 554-559.
- 84) Wiktor, V, and X Jonkers, H.M., 2011, Quantification of crack-healing in novel bacteria-based self-healing concrete, *Cement and Concrete Composites*, Vol: 33, 763–770.
- 85) Tziviloglou, E., Wiktor, V., Jonkers, H.M., Schlangen, E., 2016, Bacteria-based self-healing concrete to increase liquid tightness of cracks, *Construction Building Materials*, Vol: 122, 118–125.
- 86) Palin, D., Wiktor, V., Jonkers, H.M., 2015, Autogenous healing of marine exposed concrete: characterization and quantification through visual crack closure, *Cement Concrete Research*, Vol: 73, 17–24.

- 87) THBB-Türkiye Hazır Beton Birliği,” 2019
- 88) <http://www.iloencyclopaedia.org/component/k2/153-tools-equipment-and-materials/cement-and-concrete>
- 89) Neville, A. M., 2011, Properties of Concrete, 5th Edition, Pearson Education, London, ISBN: 978-0-273-75580-7
- 90) THBB, 2013, Beton kullanıcıları için teknik bilgiler kılavuzu, 6-38
- 91) Teknik Bilgiler-Katkı, THBB, url: <https://www.thbb.org/teknik-bilgiler/katki/> Erişim tarihi: 24.10.2019
- 92) Tohumcu, İ., Bingöl, A.F., 2013, Silis dumanı ve uçucu kül katkılı kendiliğinden yerleşen beton özellikleri ve basınç dayanımları, Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik bilimleri dergisi, Vol:15(2), 31-44.
- 93) Erdoğan, T.Y., 1997, Admixtures for Concrete, Middle East Technical University Press, Ankara, 188.
- 94) Atac, A., Tasdemir, C., Sönmez, R., and Tasdemir, M.A., 2001, Effects of Curing Conditions on Strength and Permeability Properties of Concretes with Various Fly Ash Contents, Fib-Symposium on Concrete and Environment, 3-5 October 2001, Berlin, 14.
- 95) Sönmez, H.T., 2008, Yüksek fırın cürufunun kendiliğinden yerleşen betonlara etkileri, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- 96) Neville, A. M., 2011, Properties of Concrete, 5th Edition, Pearson Education, London, ISBN: 978-0-273-75580-7
- 97) Baradan, B., Yazıcı, H., Aydın, S., 2012, Beton, Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Yayınları, Vol: 334, 8-9.
- 98) Zhang, M.H. and Malhotra, V.M., 1995, Characteristics of a thermally activated alumino-silicate pozzolanic material and its use in concrete, Cement and Concrete Research, Vol: 25, 1713-1725.
- 99) Sabir, B.B., Wild, S., Bai, J., 2001, Metakaolin and calcined clays as pozzolans for concrete: a review, Cement and Concrete Composites, Vol: 23, 441-454.
- 100) Siddique, R., Kalus, J., 2009, Influence of metakaolin on the properties of mortar and concrete: a review, Applied Clay Science, Vol: 43, 392-400.

- 101) Tosun, K., Felekoglu, B., Baradan, B., 2007, Metakaolin ve Silis Dumanı Kullanımının Çimento Harcının Mekanik ve Fiziksel Özelliklerine Etkileri, 3. Uluslararası Çimento ve Beton Sempozyumu, İstanbul, 83-94.
- 102) Khatib, J.M. and Wild, S., 1998, Sulfate resistance of metakaolin mortar, *Cement and Concrete Research*, Vol: 28, 120–132.
- 103) Khatib, J.M., Clay, R.M., 2004, Absorption characteristics of metakaolin concrete, *Cement and Concrete Research*, Vol: 4, 19-29.
- 104) Kim, H.S., Lee, S.H., Moon, H.Y., 2007, Strength properties and durability aspect of high strength concrete using Korean metakaolin, *Construction and Building Materials*, Vol: 21, 1229-1237.
- 105) TS EN 13543, 2015, Betonarme yapılara uygulanabilecek tahribatsız muayene (NDT) yöntemleri, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- 106) Kaya, A.O., 2010, Farklı türde mineral katkı kullanımının kendiliğinden yerleşen betonun taze faz ve mekanik özelliklerine etkisi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- 107) Çalığıuşu, H., Yıldırım, G. C., Işık, O. S., 2015, Gerilme Ölçüm Teknikleri 3 Nokta Eğme Deney Raporu, Süleyman Demirel Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü.
- 108) Taramalı Elektron Mikroskobu
url: https://tr.wikipedia.org/wiki/Taramal%C4%B1_elektron_mikroskobu Erişim tarihi: 24.10.2019

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler	
Adı Soyadı	Elif Burcu ŞENER
Doğum Yeri	Malatya
Doğum Tarihi	28.07.1990
Uyruğu	<input checked="" type="checkbox"/> T.C. <input type="checkbox"/> Diğer:
Telefon	0545 879 80 54
E-Posta Adresi	elifburcusener@hotmail.com
Web Adresi	



Eğitim Bilgileri	
Lisans	
Üniversite	Harran Üniversitesi
Fakülte	Mühendislik Fakültesi
Bölümü	İnşaat Mühendisliği
Mezuniyet Yılı	2013

Yüksek Lisans	
Üniversite	İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa
Enstitü Adı	Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Anabilim Dalı	İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
Programı	İnşaat Mühendisliği

Makale ve Bildiriler	