



T.C.
EGE ÜNİVERSİTESİ
Fen Bilimleri Enstitüsü



MİKROORGANİZMALARIN ÇİMENTO HARÇLARININ BAZI FİZİKSEL VE MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN İYİLEŞTİRİLMESİNE ETKİSİ

Yüksek Lisans Tezi

Canberk GÜLLER

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

İzmir

2019

T.C. EGE ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**MİKROORGANİZMALARIN ÇİMENTO
HARÇLARININ BAZI FİZİKSEL VE MEKANİK
ÖZELLİKLERİNİN İYİLEŞTİRİLMESİNE ETKİSİ**

Canberk GÜLLER

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Şemsi YAZICI

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

İnşaat Mühendisliği Yüksek Lisans Programı

İzmir

2019

Kabul ve Onay Sayfası

Canberk GÜLLER tarafından Yüksek Lisans tezi olarak sunulan “**MIKROORGANİZMALARIN ÇİMENTO HARÇLARININ BAZI FİZİKSEL VE MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN İYİLEŞTİRİLMESİNE ETKİSİ**” başlıklı bu çalışma E.Ü. Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliği ile E.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Eğitim ve Öğretim Yönergesi'nin ilgili hükümleri uyarınca tarafımızdan değerlendirilerek savunmaya değer bulunmuş ve 04.07.2019 tarihinde yapılan tez savunma sınavında aday oybirliği/~~oyçokluğu~~ ile başarılı bulunmuştur.

Jüri Üyeleri:

İmza

Jüri Başkanı : Prof. Dr. Şemsi YAZICI

.....

Raportör Üye : Doç. Dr. Güzde İNAN SEZER

.....

Üye : Doç. Dr. Uğur ÖZTÜRK

.....

EGE ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ETİK KURALLARA UYGUNLUK BEYANI

E.Ü. Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin ilgili hükümleri uyarınca Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “**MİKROORGANİZMALARIN ÇİMENTO HARÇLARININ BAZI FİZİKSEL VE MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN İYİLEŞTİRİLMESİNE ETKİSİ**” başlıklı bu tezin kendi çalışmam olduğunu, sunduğum tüm sonuç, döküman, bilgi ve belgeleri bizzat ve bu tez çalışması kapsamında elde ettiğimi, bu tez çalışmasıyla elde edilmeyen bütün bilgi ve yorumlara atıf yaptığımı ve bunları kaynaklar listesinde usulüne uygun olarak verdiğimi, tez çalışması ve yazımı sırasında patent ve telif haklarını ihlal edici bir davranışımın olmadığını, bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya diğer bir üniversitede başka bir tez çalışması içinde sunmadığımı, bu tezin planlanmasından yazımına kadar bütün safhalarda bilimsel etik kurallarına uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul edeceğimi beyan ederim.

04 /07/ 2019

İmzası

Canberk GÜLLER

ÖZET**MİKROORGANİZMALARIN ÇİMENTO HARÇLARININ BAZI FİZİKSEL VE MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN İYİLEŞTİRİLMESİNE ETKİSİ**

GÜLLER, Canberk

Yüksek Lisans Tezi, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Yöneticisi: Prof. Dr. Şemsi YAZICI

Temmuz, 2019, 116 sayfa

Bu tez çalışması kapsamında bakteri kullanımının pomza ve geri dönüşüm agregaları (GDA) kullanılarak hazırlanan harç numunelerinin mekanik, fiziksel özelliklerine ve numunelerde oluşturulan çatlakların kendiliğinden iyileşmesi üzerine etkileri incelenmiştir. *Bacillus subtilis* bakterisi Tryptic Soy Broth (TSB) ortamında yetiştirilmiş, yetiştirilen bakteriler TSB, Modifiye Luria-Bertani (MLB), üre-kalsiyum fosfat ve üre-kalsiyum klorür içeriğine sahip 4 farklı besi yerine ekilerek besi yerleriyle birlikte geri dönüşüm ve pomza agregasına kapsüllenmiştir. Bakterili agregalar %10, %20, %30, %70, %100 hacim oranlarında kireç taşı agregasıyla ikame edilmiştir. Su, agrega ve çimento sırasıyla 1, 3, 0,5 oranlarında %100 kireç taşı karışımı baz alınarak dizayn edilmiş, çimento ağırlığının %5'i oranında çelik lif katılarak 47 karışım hazırlanmıştır. Mekanik özelliklerden 3, 7, 28 günlük basınç, 28 günlük eğilme dayanımları ve UPV ölçümleri yapılmış, fiziksel özelliklerden 28 günlük su emme, kılcal su emme ve toplam boşluk oranları incelenmiştir.

GDA ve pomza içeriği %30 ve altında hazırlanan numunelerde kayda değer bir şekilde fiziksel ve mekanik özelliklerin geliştiği gözlemlenmiştir. Toplam boşluk oranı ve kılcal boşluk oranı azalmış, hazırlanan numunelerde 0,3 mm ye kadar oluşturulan çatlakların 28 günde büyük ölçüde kapandığı görülmüştür. Kontrol karışımına kıyasla, bakterili MLB, üre-kalsiyum fosfat ve üre-kalsiyum klorür besi ortamlarının kapsüllendiği %70 ve altı ikame oranlarında GDA ve Pomza içeren karışımlarda, basınç dayanımları çoğunlukla artmıştır. Basınç dayanımı %10 pomza içeren bakterili üre-kalsiyum klorür besi yeri kapsüllenmiş karışımda kontrol karışımına göre %24 artarak en iyi sonucu göstermiştir.

Anahtar Sözcükler: Bakteri, kendiliğinden iyileşme, çatlak iyileşme, mekanik özellikler, fiziksel özellikler, kalsiyum karbonat birikmesi

ABSTRACT**THE EFFECT OF MICROORGANISMS ON THE IMPROVEMENT
OF SOME PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF CEMENT
MORTARS**

GÜLLER, Canberk

MSC in Civil Eng.

Supervisor: Assoc. Prof. Dr Şemsi YAZICI

July 2019, 116 pages

In this thesis, the effects of bacterial use on the mechanical and physical properties of mortar samples prepared by using pumice and recycling aggregates and on self healing of cracks in samples were investigated. *Bacillus subtilis* bacteria were grown in Tryptic Soy Broth (TSB) medium and the grown bacteria were planted in 4 different media with TSB, Modifiye Luria-Bertani (MLB), urea-calcium phosphate and urea-calcium chloride content and then encapsulated into the recycling aggregates and pumice aggregates. Bacterial aggregates were replaced with limestone aggregates in volume ratios of 10%, 20%, 30%, 70% and 100%. Water, aggregate and cement were designed based on 100% limestone mixture in proportions of 1, 3, and 0.5, respectively. As mechanical properties, 3, 7, 28 days compressive strength, 28 days bending strength and UPV measurements were made, as physical properties, 28 days water absorption, sorptivity and total porosity rates were examined.

It has been observed that the physical and mechanical properties of the samples prepared with recycling aggregate and pumice content of 30% and below are significantly enhanced. Porosity ratio and sorptivity ratio decreased and the cracks forming up to 0.3 mm in the samples were observed to be healed in 28 days. Compared to the control mixture, compressive strengths mostly have increased in mixtures recycling and pumice content at 70% and below, containing bacterial MLB, urea-calcium phosphate and urea-calcium chloride media. Encapsulated bacterial urea-calcium chloride media in 10% pumice content mixture showed the best result with an increase of 24% in compressive strength.

Keywords: Bacteria, self healing, crack healing, mechanical properties, physical properties, calcium carbonate deposition

İÇİNDEKİLERSayfa

ÖZET.....	vii
ABSTRACT	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xiii
TABLolar DİZİNİ	xix
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Amaç ve Kapsam	9
2. LİTERATÜR TARAMA	11
3. DENEYSEL ÇALIŞMA	23
3.1. Kullanılan Malzemeler.....	23
3.1.1. Çimento	23
3.1.2. Agregat	24
3.1.3. Lif	28
3.1.4. Bakteri	28
3.2. Bakterinin Canlandırılması ve Besi Yerlerine Ekimi.....	28
3.3. Bakteri Hücrelerinin Sayılması	30
3.4. Bakterinin Kullanımı ve Harç Karışımlarının Hazırlanması	31
3.5. Harç Numunelerinin Dökümü ve Deneyleri	33

İÇİNDEKİLER (devam)

	<u>Sayfa</u>
4. DENEY SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRİLMESİ	35
4.1. Basınç Dayanımı Deney Sonuçları.....	35
4.2. Eğilme Dayanımı Deney Sonuçları	41
4.3. UPV Ölçümleri Deney Sonuçları	44
4.4. Toplam Boşluk Oranı Deney Sonuçları	46
4.5. Su Emme Oranı Deney Sonuçları.....	48
4.6. Kılcal Su Emme Oranı Deney Sonuçları.....	50
4.7. Kapsülleme Etkisi Deney Sonuçları	76
4.8. Çatlak Onarımı Deney Sonuçları.....	79
4.9. Bakterinin Canlılık Kontrolü Deney Sonuçları	90
4.10. SEM ve EDS Analizi Deney Sonuçları	92
5. SONUÇLAR.....	105
6. ÖNERİLER.....	107
KAYNAKLAR DİZİNİ.....	109
TEŞEKKÜR	115
ÖZGEÇMİŞ.....	116

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil

Sayfa

Şekil 1.1. Dünya çapında yıllara göre çimento üretim miktarları (Statista, 2017).....4

Şekil 2.1. Zamana bağlı çatlak iyileşme görüntüleri (Mondal and Gosh, 2018) 12

Şekil 2.2 Üre ve CaCl_2 içeren besi ortamına maruz bırakılmış çatlak oluşturulmuş bakterisiz örnek (a) öncesi, (b) sonrası; Üre içeren Besi ortamına maruz bırakılmış örnek (c) öncesi, (d) sonrası; Üre ve CaCl_2 içeren besi ortamına maruz bırakılmış çatlak oluşturulmuş bakterili örnek (e) öncesi, (f) sonrası (Jadhav et al., 2018) 15

Şekil 2.3. 1 aylık kürlenme sonrası çatlak oluşturulmuş ve üre ve CaCl_2 içeren besi ortamına maruz bırakılmış numuneler (Jadhav et al., 2018)..... 15

Şekil 2.4 (a) Dikdörtgenle işaretli kısımlar *Bacillus subtilis* içeren betondaki kalsit mevcudiyetini göstermektedir. (b) Dikdörtgenle işaretli kısımlar *Bacillus megaterium* içeren betondaki kalsit mevcudiyetini göstermektedir. 20

Şekil 3.1 İnkübasyon İşlemi..... 29

Şekil 3.2. Besi ortamlarında alınan bakteri örneklerinin sayımı..... 31

Şekil 3.3. Kılcal su emme deneyi uygulanan numuneler..... 33

Şekil 3.4. Çatlak oluşturulmuş numuneler 34

Şekil 4.1. 28 günlük eğilme dayanımları (MPa) 41

Şekil 4.2. 28 günlük UPV ölçümleri (m/sn) 44

Şekil 4.3. Toplam boşluk oranları (%) 46

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
Şekil 4.4. Su emme oranları (%)	48
Şekil 4.5. 100KNB'ye ait kılcal su emme oranları.....	50
Şekil 4.6. 100GNB'ye ait kılcal su emme oranları.....	51
Şekil 4.7. 100PNB'ye ait kılcal su emme oranları	51
Şekil 4.8. 70GNB'ye ait kılcal su emme oranları.....	52
Şekil 4.9. 70PNB'ye ait kılcal su emme oranları	52
Şekil 4.10. 30GNB'ye ait kılcal su emme oranları.....	53
Şekil 4.11. 30PNB'ye ait kılcal su emme oranları	53
Şekil 4.12. 20GNB'ye ait kılcal su emme oranları.....	54
Şekil 4.13. 20PNB'ye ait kılcal su emme oranları	54
Şekil 4.14. 10GNB'ye ait kılcal su emme oranları.....	55
Şekil 4.15. 10PNB'ye ait kılcal su emme oranları	55
Şekil 4.16. 100GT'ye ait kılcal su emme oranları.....	56
Şekil 4.17. 100PT'ye ait kılcal su emme oranları	56
Şekil 4.18. 70GT'ye ait kılcal su emme oranları.....	57
Şekil 4.19. 70PT'ye ait kılcal su emme oranları	57
Şekil 4.20. 30GT'ye ait kılcal su emme oranları.....	58

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
Şekil 4.21. 30PT'ye ait kılcal su emme oranları	58
Şekil 4.22. 20GT'ye ait kılcal su emme oranları	59
Şekil 4.23. 20PT'ye ait kılcal su emme oranları	59
Şekil 4.24. 10GT'ye ait kılcal su emme oranları	60
Şekil 4.25. 10PT'ye ait kılcal su emme oranları	60
Şekil 4.26. 100GM'ye ait kılcal su emme oranları	61
Şekil 4.27. 100PM'ye ait kılcal su emme oranları	61
Şekil 4.28. 70GM'ye ait kılcal su emme oranları	62
Şekil 4.29. 70PM'ye ait kılcal su emme oranları	62
Şekil 4.30. 30GM'ye ait kılcal su emme oranları	63
Şekil 4.31. 30PM'ye ait kılcal su emme oranları	63
Şekil 4.32. 20GM'ye ait kılcal su emme oranları	64
Şekil 4.33. 20PM'ye ait kılcal su emme oranları	64
Şekil 4.34. 10GM'ye ait kılcal su emme oranları	65
Şekil 4.35. 10PM'ye ait kılcal su emme oranları	65
Şekil 4.36. 100GU'ya ait kılcal su emme oranları	66
Şekil 4.37. 100PU'ya ait kılcal su emme oranları	66

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
Şekil 4.38. 70GU'ya ait kılcal su emme oranları	67
Şekil 4.39. 70PU'ya ait kılcal su emme oranları	67
Şekil 4.40. 30GU'ya ait kılcal su emme oranları	68
Şekil 4.41. 30PU'ya ait kılcal su emme oranları	68
Şekil 4.42. 20GU'ya ait kılcal su emme oranları	69
Şekil 4.43. 20PU'ya ait kılcal su emme oranları	69
Şekil 4.44. 10GU'ya ait kılcal su emme oranları	70
Şekil 4.45. 10PU'ya ait kılcal su emme oranları	70
Şekil 4.46. 20GUC'ye ait kılcal su emme oranları.....	71
Şekil 4.47. 20PUC'ye ait kılcal su emme oranları	71
Şekil 4.48. 10GUC'ye ait kılcal su emme oranları.....	72
Şekil 4.49. 10PUC'ye ait kılcal su emme oranları	72
Şekil 4.50. Birincil kılcal su emme oranı ($\text{mm/s}^{1/2}$)	73
Şekil 4.51. İkincil kılcal su emme oranı ($\text{mm/s}^{1/2}$)	74
Şekil 4.52. %100 GDA içeren numuneler	79
Şekil 4.53. %70 GDA içeren numuneler	80
Şekil 4.54. %30 GDA içeren numuneler	81

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
Şekil 4.55. %20 GDA içeren numuneler.....	82
Şekil 4.56. %10 GDA içeren numuneler.....	83
Şekil 4.57. %100 Pomza içeren numuneler	84
Şekil 4.58. %70 Pomza içeren numuneler	85
Şekil 4.59. %30 Pomza içeren numuneler	86
Şekil 4.60. %20 Pomza içeren numuneler	87
Şekil 4.61. %10 Pomza içeren numuneler	88
Şekil 4.62. 100KNB karışımının SEM ve EDS görüntüsü	93
Şekil 4.63. 100GNB karışımının SEM ve EDS görüntüsü	94
Şekil 4.64. 100GT karışımının SEM ve EDS görüntüsü	95
Şekil 4.65. 100GM karışımının SEM ve EDS görüntüsü	96
Şekil 4.66. 100GU karışımının SEM ve EDS görüntüsü.....	97
Şekil 4.67. 10GNB karışımının SEM ve EDS görüntüsü	99
Şekil 4.68. 10GT karışımının SEM ve EDS görüntüsü	100
Şekil 4.69. 10GM karışımının SEM ve EDS görüntüsü	101
Şekil 4.70. 10GU karışımının SEM ve EDS görüntüsü.....	102
Şekil 4.71. 10GUC karışımının SEM ve EDS görüntüsü	103

TABLOLAR DİZİNİ

Tablo

Sayfa

Tablo 1.1. Türkiye’de üretilen hazır beton miktarı (Türkiye Hazır Beton Birliği, 2017).....	2
Tablo 3.1. Çimentonun kimyasal analizi	23
Tablo 3.2. Çimentonun fiziksel özellikleri ve dayanımı	24
Tablo 3.3. Kireç taşı agregası elek analizi sonuçları	25
Tablo 3.4. Kireç taşı agregası fiziksel özellikleri	25
Tablo 3.5. Pomza agregası elek analizi sonuçları.....	26
Tablo 3.6 Pomza agregası fiziksel özellikleri.....	26
Tablo 3.7 Geri dönüşüm agregası elek analizi sonuçları.....	27
Tablo 3.8 Geri dönüşüm agregası fiziksel özellikleri.....	27
Tablo 3.9. Lif teknik özellikleri.....	28
Tablo 3.10 Bakterinin besi ortamları.....	30
Tablo 3.11. Harçların karışım oranları (kg/m ³)	32
Tablo 4.1. 3 günlük basınç dayanımları (MPa)	35
Tablo 4.2. 3 günlük bağıl basınç dayanımı oranları (%)	36
Tablo 4.3. 7 günlük basınç dayanımları (MPa)	36
Tablo 4.4. 7 günlük bağıl basınç dayanımı oranları (%)	37

TABLolar DİZİNİ (devam)

<u>Tablo</u>	<u>Sayfa</u>
Tablo 4.5. 28 günlük basınç dayanımları (MPa).....	37
Tablo 4.6. 28 günlük bağıl basınç dayanımı oranları (%).....	38
Tablo 4.7. Bakteri kullanımının bakterisiz kontrole göre 28 günlük basınç dayanımı değişiminin literatürle kıyaslaması	39
Tablo 4.8. 28 günlük bağıl eğilme dayanımı oranları (%).....	42
Tablo 4.9. 28 günlük basınç dayanımları (MPa).....	76
Tablo 4.10. 28 günlük bağıl basınç dayanımı oranları (%).....	76
Tablo 4.11. 28 günlük eğilme dayanımı (MPa) ve fiziksel özellikler	77
Tablo 4.12. 28 günlük bağıl eğilme dayanımı (MPa) ve bağıl fiziksel özelliklerin oranları (%).....	77
Tablo 4.13. Bakteri sayım miktarı (hücre/ml)	90

1. GİRİŞ

Medeniyetlerin gelişmesinde, insanoğlunun yerleşik hayata geçmesinden itibaren devam eden inşaat alanındaki ilerlemelerin etkileri oldukça fazladır. Eski uygarlıklardan günümüze kalan izler incelendiğinde, Mısırlılar, Eski Yunan, Roma, Orta Asya ve Anadolu uygarlıkları zamanında kullanılan fırınlanmış alçı taşı, fırınlanmış kireç taşı ve volkanik küllerden oluşturulan puzolonik bağlayıcılar, kiremit, tuğla ve pişmiş kilden oluşan horasan harcı gibi bağlayıcılık özelliği olan malzemeler, günümüzün çimento ve beton teknolojisinin atası kabul edilebilir.

Günümüzde kullanılan Portland çimentosu 19. Yüzyıl'da İngiliz Joseph Aspdin tarafından bulunmuş, sonrasında 20. Yüzyıl'ın hemen başında bir başka önemli gelişme olarak, Alman Jürgen Heinrich Mogens betonun özelliklerini kaybetmeden hazırlanıp, taşınarak ihtiyaç sahiplerine ulaştırılması sonucu, hazır beton kavramını literatüre katmıştır. O zamandan bu zamana kadar hazır beton üretimi artarak devam etmiştir.

Türkiye Hazır Beton Birliği (2017) verileri Tablo 1.1'de verilmiştir. Verilere göre Türkiye'de 1981 yılında üretilen hazır beton 1,5 milyon m³ iken, 2017 yılında 115 milyon m³ mertebesine ulaşmış ve Türkiye, Avrupa ülkeleri arasında en çok beton üreten ülke konumuna gelmiştir.

Tablo 1.1. Türkiye’de üretilen hazır beton miktarı (Türkiye Hazır Beton Birliği, 2017)

TÜRKİYE'DE YILLARA GÖRE HAZIR BETON ÜRETİMİ	
Yıllar	Hazır Beton Üretimi (m³)
1988	1.500.000
1993	10.000.000
1998	26.542.905
2003	46.300.000
2005	70.732.631
2006	74.359.847
2007	69.600.000
2008	66.430.000
2009	66.430.000
2010	79.680.000
2011	90.450.000
2012	93.050.000
2013	102.000.000
2014	107.000.000
2015	107.000.000
2016	109.000.000
2017	115.000.000

Beton yüksek basınç dayanımı, uygulama kolaylığı ve ucuzluğu nedeniyle diğer yapı malzemelerine kıyasla kullanım alanı daha fazladır. Özellikle betonarmenin bulunmasından sonra, yani betonun başka bir malzeme olan çelik ile birlikte kullanılıp yapısal taşıyıcı olarak zayıf yönlerinin giderilmesiyle beraber geçmişten günümüze uzanan süreçte kendisine, su yapısı, ulaştırma, endüstriyel tesis, havaalanı, altyapı tesisleri, konut gibi birçok kullanım alanı bulmuştur.

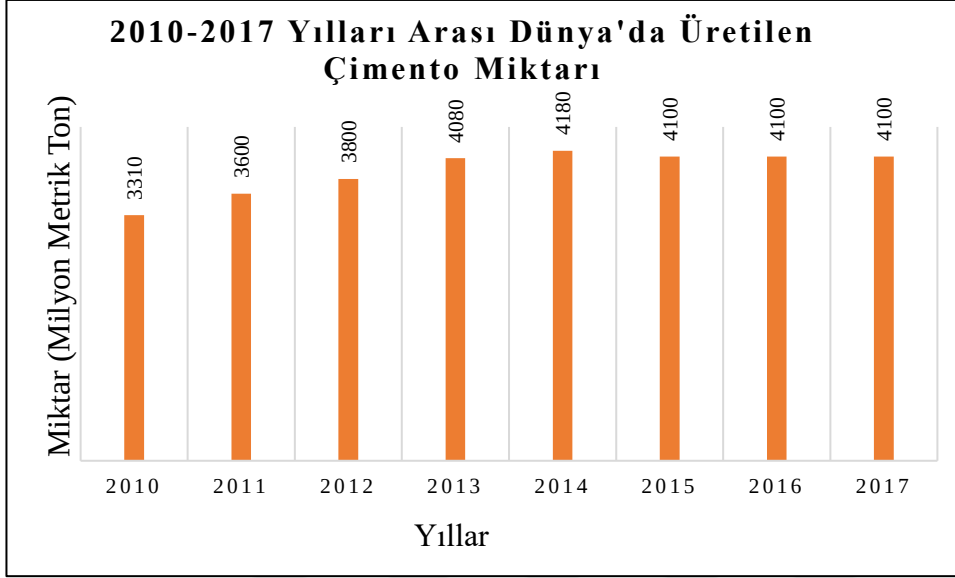
Betonarme yapıların servis ömrü, periyodik bakımlarının yapılması durumunda 50 yıl ile 200 yıl ve üzerinde olabilmektedir (Rostam, 2005). Servis ömrü kavramı betonun kalıcılığıyla ilişkilendirilebilir. Dizayn aşamasında kalitesi tasarlanan betonun, uygun malzemeler kullanılarak üretilip, uygulamasının ve kürlenmesinin doğru şekilde yapılması, sonrasında ise bakım ve onarım ihtiyaçlarının servis sürecinde giderilmesi, betonun kalıcılığını bir başka deyişle durabilitesini belirler.

Betonun zaman içinde bakım ve onarıma ihtiyaç duymasının nedeni yapısında oluşan bozulmalar ve çatlak oluşumudur. Dizaynda oluşan hatalar nedeniyle kapasitesinden fazla gelen yüklemeler ya da durabilite eksiklikleri çatlak oluşumunun nedenleri olabilir. Çatlakları hidrasyon esnasında oluşanlar ve prizini almış betonda zaman içerisinde oluşanlar olarak gruplandırabiliriz. Hidrasyon esnasında oluşanlar, plastik büzülme çatlakları ve yerleştirme çatlaklarıdır. Plastik büzülme çatlağı taze yerleştirilmiş betonun yüzeyindeki su kaybının terlemesinden fazla olması durumunda ortaya çıkar. Beton yüzeyi büzülerek kuru yüzey tabakasında oluşan zorlanma neticesinde çekme gerilmeleri meydana gelir. Bunun sonucunda derinliğı fazla olmayan çatlaklar oluşur. Yüksek beton sıcaklığı veya hava sıcaklığı, düşük ortam nemi, beton yüzeyine temas eden rüzgar gibi etmenler nedeniyle betonun hızlı nem kaybetmesinin sonucunda oluşur. Yerleştirme çatlakları ise, yerleştirmenin ve vibrasyonun iyi yapılmaması nedeniyle beton içinde kalan boşluklar neticesinde oluşan çatlaklardır. Prizini almış betonda oluşan çatlaklar ise kuruma büzülmesi çatlağı, termal gerilme çatlağı, zararlı kimyasal reaksiyonların oluşturduğu çatlaklar (Alkali silis reaksiyonu, sülfat ve klor girişı gibi) , hava koşulları (donma-çözünme, ıslanma-kuruma, ısınma-soğuma) etkisiyle oluşan çatlaklar, donatının korozyonu neticesinde oluşan çatlaklar, betonarme elemanlara kapasitesinden fazla gelen yükler, yetersiz kütleme ve dizayn hatalarından oluşan çatlaklar olarak özetlenebilir (ACI, 2007).

Strateji geliştirme konseyi (The Strategic Development Council - SDC) Vizyon 2020 raporuna göre, Amerika Birleşik Devletleri'nde yıllık olarak beton tamirati, koruma ve güçlendirme maliyeti tahmini olarak, 12 ile 18 milyar dolar aralığındadır. Bu rakamın beton tüketim miktarına bağılı olarak zamanla daha da artacağı düşünülmektedir. Sektörün liderleriyle yapılan görüşmeler sonucunda, tamirat hatalarının, zayıf işçilik, yanlış hesap hatalarının azaltılması ve en önemlisi de daha faydalı tamirat yöntemleri geliştirilip, maliyetin düşürülerek kalitenin artırılmasının önemi ortaya konulmuştur (SDC, 2006).

Betonun en önemli bileşen maddesi, bağlayıcılık özelliğini sağlayan çimentodur. Statista (2019) verilerine göre 2017 yılında dünya çapında 4.1 milyon

metrik ton çimento üretilmiştir. Şekil 1.1’ de yıllara göre çimento üretim miktarı dağılımı verilmiştir.



Şekil 1.1. Dünya çapında yıllara göre çimento üretim miktarları (Statista, 2017)

Amerikan Ulusal Hazır Beton Birliği (National Ready Mix Assosiation – NRMCA) 2012 raporunda çimento üretiminin çevresel etkilerini araştırılmıştır. Çimento üretimi karbondioksit (CO_2) salınımına neden olmaktadır. Ağırlıkça yaklaşık olarak %60 oranında kalsiyum (Kireçtaşı ya da kalsiyum karbonat), %20 oranında silisyum, %10 oranında alüminyum ve %10 oranında demir kombinasyonundan oluşan doğal mineraller fırınlarda 1500°C üzerinde ısıtılarak klinker elde edilir. Bu esnada CO_2 iki farklı nedenden ortaya çıkar. Birincisi yanma işlemi esnasında kullanılan fosil yakıtların oluşturduğu CO_2 , ikincisi kalsinasyon, yani üretim esnasında kireçtaşının ısıtılarak kalsiyum oksite dönüşürken ortaya çıkarttığı CO_2 ’dir. Her 1000 kg çimento üretimi neticesinde, yakıt tipi, hammadde içeriği ve çimento üretim tesisinin verimliliğine bağlı olarak, 900 ile 1100 kg arasında CO_2 doğaya salınır.

Çimento üretimi CO_2 salınımına neden olan en büyük kaynaklardan birisi olarak, dünyadaki CO_2 salınımının yaklaşık olarak %5 ile %7’ sini oluşturmaktadır (Benhelal et al., 2012). Atmosferdeki CO_2 miktarının her geçen gün daha da artması çevresel olarak ciddi olumsuzluklara yol açmakta, çevresel sürdürülebilir uygulamalar günden güne önem kazanmaktadır. Geri dönüştürülmüş malzemelerin kullanılması, betonarme yapıların tamir ve bakım ihtiyaçlarının azaltılması, servis

sürelerinin arttırılması, buna bağılı olarak ihtiyacın azaltılarak beton üretiminin minimize edilmesi gerekliliğı ön plana çıkmaktadır.

Çevresel etkiler göz önüne alındığında, bir başka husus da beton üretiminde kullanılan agrega ihtiyacının sürekli artmasıdır. Agrega ihtiyacını karşılamak için kullanılan doğal kaynakların günden güne azalması nedeniyle, sürdürülebilir kaynakların kullanılmasına yönelim artmıştır. Betonarme yapıların yıkılması sonucu atıkların değerlendirilmesi neticesinde geri dönüşüm agregaları (GDA) ortaya çıkmıştır.

GDA kullanımı başlangıç olarak 2. Dünya Savaş'ından sonra Avrupa'nın yeniden inşası aşamasında aşırı miktarda ortaya çıkan inşaat molozlarından kurtulmak ve agrega ihtiyacını karşılamak amacıyla ortaya çıkmış fakat kalıcı olamamıştır. Sonrasında 1970'lerde Amerika Birleşik Devletleri'nde dolgu malzemesi olarak kullanılmış ve ardından araştırmacılar doğal agrega yerine yapısal betonda kullanılmasıyla ilgili çalışmalara yönelmiştir (Mcneil et al., 2013).

Son zamanlarda inşaat endüstrisinde oluşan atıklar ciddi boyutlara ulaşmıştır. Bu atıkların miktarının Avrupa Birliği'nde 850-880 Mt/yıl, Amerika Birleşik Devletleri'nde 317 Mt/yıl, Japonya'da 77 Mt/yıl civarında olduğu tahmin edilmektedir. İnşaat atıklarının çevresel sorunlara yol açmaması için geri dönüştürülmesinin önemi her geçen gün artmaktadır. Avrupa Birliğinin hedeflediğı önlemler içerisinde 2020'ye kadar inşaat atıklarının %70'inin geri dönüşüm olarak tekrar kullanılması bulunmaktadır (Evangalista et al., 2015).

Beton üretiminin ve inşaat atıklarının çevresel etkilerinin yanı sıra, betonarme yapıların tamirat ve bakım maliyetleri de göz önüne alındığında, bu durum araştırmacıları daha etkili tamirat yöntemleri geliştirmek, aynı zamanda da betonun kalıcılığını arttırmak için kendiliğinden iyileşebilen beton üzerine çalışmalara yöneltmiştir. Kendiliğinden iyileşme kavramı insan vücudunda oluşan yaraların iyileşmesine benzer olarak betonda oluşan çatlağın, betonunun yapısında bulunan maddeler yardımıyla kapatılarak tamir edilmesidir.

Kendiliğinden iyileşme eski ve bilindik bir olgu olmakla beraber, betonun kendini doğal yollardan otojen iyileştirme özelliğı bulunmaktadır. İçerisinde bulunan hidrate olmamış bağlayıcıların hidratasyonu veya yapısında oluşan kalsiyum hidroksitlerin karbonatlaşması neticesinde zaman içerisinde kısmen

kendini iyileştirebilir, fakat bu durum ortamdaki su mevcudiyetine bağlı olduğu için kısıtlı kalmaktadır (Van Tittelboom and De Belie, 2013).

Su tutma yapılarında, menfez ve borularda oluşan çatlakların otojen iyileşme özelliği 1836 yılında Fransız Bilim Akademisi tarafından göz önüne serilmiştir. 19. yüzyılın sonlarında Hyde tarafından bu konu araştırıldı. Köprülerdeki otojen iyileşme ile ilgili çalışmalar ise Glanville tarafından 1926 yılında ortaya konulmuştur. Clear, Hearn ve Edvardsen tarafından daha kapsamlı araştırmalar sonucunda, iyileşme özelliği göstermiş betonlarda pas payının yoğunlaştığını ve betona zararlı olan klor gibi maddelerin nüfuzunun azaldığını gözlemlendi (Van Breugel, 2007).

Süreç içerisinde çeşitli kendiliğinden iyileştirme yöntemleri geliştirildi. Yenilikçi yöntemlerin temelinde çatlak oluşan bölgeye gerekli kompozit malzemenin sağlanarak kendiliğinden iyileşme özelliğinin geliştirilmesi vardır. Yöntemlerden bazılarında, içinde fonksiyonel bileşikler olan tüpler ya da kapsüller beton karışımına eklenir ve betonda hasar oluştuğunda iyileştirici maddeler dışarı çıkarak çatlağı onarır. Yapılan çalışmalarda polimerik bileşikler (metil metakrilat, düşük vizkoziteli epoksi reçinesi, etil siyanoakrilat, geopolimer), sodyum silikat, silis jeli gibi bileşikler, mineral katkıları iyileştirici ajan olarak kullanılmıştır (Wu et al., 2012).

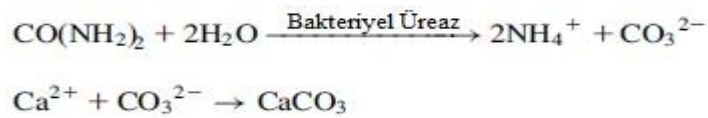
Son yıllarda kendiliğinden iyileştirme yöntemlerine ilginin artmasıyla beraber, araştırmacılar biyolojik tabanlı kendiliğinden iyileşebilen betonlar üzerine çalışmalara yönelmiştir. Doğa dostu, doğal, biyolojik ajanların kullanımıyla ilgili araştırmalar günden güne artmaktadır. Bakteri kullanımının betonun iyileştirmesi üzerine yapılan araştırmalarda, betonda oluşan çatlakların iyileşmesi, betonun dayanımına ve fiziksel özelliklerine etkisi araştırmacıların ilgilendiği hususlar haline gelmiştir.

Betonda otonom iyileşmenin bir çeşiti olan kalsiyum karbonat (CaCO_3) birikmesi karbondioksit ve kalsiyum iyonunun etkileşimi neticesinde oluşur. Beton karışımı içerisindeki yüksek ph neticesinde CO_2 , karbonat (CO_3^{2-}) iyonlarına dönüşür ve kalsiyum iyonları ile karbonat iyonlarının birleşmesi neticesinde kalsiyum karbonat meydana gelir. Kalsiyum karbonat tuzunun stabilitesi fazladır, yüksek ph altında çözülmez, bu nedenle çatlakları doldurucu filler etkisi vardır.

Bakteri kullanımı CaCO_3 birikmesini geliştirir. Bakteri metabolik aktivitesi neticesinde ekstra CO_2 ve CO_3^{2-} oluşur. Negatif yüklü bakteri zarı, katyonları ortamdan kendisine çeker, bu nedenle Ca^{2+} iyonları hücre zarında birikir. Metabolik etkiyle kimyasal ve organik maddelerin indirgenmesi sonucu oluşan ekstra CO_2 , CO_3^{2-} iyonu konsantrasyonunun artmasına neden olur. Kalsiyum iyonlarının mevcudiyeti neticesinde de CaCO_3 birikmesi artar. Bakteri zarının negatif yükü nedeniyle kalsiyum iyonlarını toplaması kalsiyum karbonat birikmesi olasılığını artırır. Bakteri hücreleri tarafından geliştirilmesi nedeniyle bu işleme, mikrobiyolojik olarak tetiklenmiş CaCO_3 birikmesi adı verilir (Silva, 2015).

Birçok bakteri uygun ortam koşulları sağlanması durumunda mikrobiyolojik olarak tetiklenmiş CaCO_3 birikmesi oluşturur. Bakteriyel etkiyle CaCO_3 oluşum mekanizmasının çeşitli metabolik yolları vardır. Bakterinin tipine göre bu mekanizma değişmekle birlikte, aynı bakteri ortam koşullarının değişikliğine göre farklı CaCO_3 oluşturma yolu izleyebilir.

Çimento bazlı malzemelerde şimdiye kadar kullanılan en yaygın yöntem bakterinin azot döngüsüne katılarak üreinin ayrıştırılmasıdır. Kullanılan bakteriler alkali toleransı yüksek olan üreolitik türlerdir (*Sporosarcina pasteurii*, *Sporosarcina ureae*, *Bacillus sphaericus*, *Bacillus megaterium*, *Bacillus subtilis* vb). Bu bakteri türleri üreyi amonyum, amonyak ve karbonat iyonuna çevirir. Kalsiyum iyonu mevcudiyetiyle kalsiyum karbonat oluşur. Reaksiyon aşağıdaki denklemde gösterilmiştir (De Belie et al., 2018).

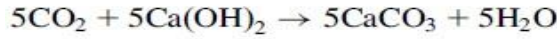
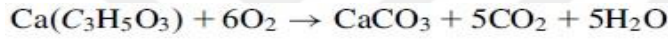


Diğer bir yöntem ise bakterinin azot döngüsüne katılarak nitrat ayrıştırmasıdır. *Pseudomonas denitrifican* ve *Castellaniella denitrifican* gibi bakterilerin nitrat indirgemesi sonucu, kalsiyum karbonat oluşumudur. Bu durum zemin sıkılaştırma çalışmalarında kullanılmıştır. Betonun kendini iyileştirmesiyle ilgili benzer bakteri türleri kısıtlı oksijen durumlarında araştırılmıştır. Üre hidrolizinin bakteri aktivitesiyle başlaması için oksijen gereklidir (Bakteri sporlarının çimlenmesi). Bu durum derin çatlakların iyileştirilmesinde sınırlayıcı etken olmaktadır. Bu nedenle sınırlı oksijenin bulunduğu durumlarda denitrifikasyon (nitratsızlaştırma) yapan bakteriler kullanılabilmektedir. Bu bakteriler nitrati (NO_3^-), CaCO_3 çökmesi için gerekli olan, organik karbonun

oksidasyonu ve CO_3^{2-} ve HCO_3^- iyonu üretimi için, alternatif elektron alıcısı olarak kullanılmaktadır. Reaksiyon aşağıdaki denklemde gösterilmiştir (De Belie et al., 2018).



Üçüncü yöntem ise bakterinin organik karbonun oksidasyonu ile karbon döngüsüne katılmasıdır. Organik bileşiklerin bakteri etkisiyle indirgenmesiyle CO_2 ve H_2O oluşur. Yüksek PH etkisiyle CO_2 kolayca CO_3^- 'e dönüşür ve Ca^{2+} mevcudiyetiyle CaCO_3 oluşur. Bu gruptaki tipik bakteri türleri *Bacillus cohnii*, *Bacillus pseudofirmus* ve *Bacillus alkalinitrilicus*'tur. Genellikler yapılan çalışmalarda organik karbon kaynağı olarak betona zarar verici etkisinin az olduğu düşünüldüğü için kalsiyum laktat gibi bileşikler tercih edilmektedir. Reaksiyon aşağıdaki denklemde gösterilmiştir (De Belie et al., 2018).



Bazı araştırmacılar prekürsör olarak ekstra Ca^{2+} kullanımından kaçınmışlardır. Kendiliğinden iyileşme bileşikleri olarak glikoz, bira mayası ve *Bacillus Mucilaginous* bakterisi kullanmışlardır. (Chen et al., 2016). İyileştirme mekanizması glikozun maya ile fermantasyonu ve etanol ile CO_2 oluşumuyla devam etmiştir. Bakteri CO_2 'nin CaCO_3 'e dönüşümünü reaksiyon esnasında betonun içinde mevcut olan Ca^{2+} varlığıyla beraber geliştirmiştir. Bazı araştırmacılar aşırı Ca^{2+} varlığının mikrobiyolojik olarak tetiklenmiş CaCO_3 çökmesini engellediğini belirtmektedir (Zhang et al., 2016). Betonda mevcut olan düşük çözünürlükteki $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 'nin mikrobiyolojik olarak tetiklenmiş CaCO_3 çökmesi için optimum olduğunu düşünürken, diğer araştırmacılar ekstra Ca^{2+} kaynağının gerekliliğine inanmaktadırlar (De Belie et al., 2018).

Sonuç olarak bakteriyel etkiyle üre ayrıştırılması diğer iki yönteme göre en yüksek kalsiyum karbonat oluşumunu sağlamaktadır. Bu nedenle daha çok bu konuyla ilgili çalışma yapılmıştır. Fakat reaksiyon esnasında amonyak üretimi çevresel endişelere yol açabilmektedir. Bu yönteme göre, daha düşük CaCO_3 oluşumuna rağmen daha az zararlı yan ürün oluşturmaları nedeniyle bakteriyel etkiyle organik karbonun oksidasyonu yöntemi veya kısıtlı oksijen durumlarında bakteriyel etkiyle nitrat ayrıştırması yöntemi tercih edilebilmektedir.

1.1. Amaç ve Kapsam

Sürekli artan beton ihtiyacı, çimento üretimi esnasında çevresel olarak ortaya çıkan sorunlar, betonunun servis ömrü boyunca bakım onarım maliyetlerinin yüksek değerlere ulaşması, betonun içeriğinde bulunan agreganın temininin her geçen gün zorlaşması ve kullanım ömrünü tamamlayarak yıkılan betonarme yapılardan ortaya çıkan beton molozlarının bertaraf edilmesinin zorlukları, bunun sonucunda oluşan çevresel sorunlar nedeniyle, doğayla uyumlu, sürdürülebilir, geri dönüştürülebilir beton üretiminin gerekliliği her geçen gün daha da artmaktadır.

Bahsedilen endişeler nedeniyle betonun kendiliğinden iyileşmesi olgusu hem betonun servis süresini arttırabileceği gibi, hem de bakım onarım maliyetlerini düşürebilmektedir. Betonunun durabilitesinin artması beton üretim ihtiyacını azaltabilecek, dolayısıyla çevre kirliliğine yol açan çimento üretim ihtiyacının da azalmasına yol açabilecektir.

Yapılan bu tez çalışmasında doğa dostu bakteriyel etkiyle kendiliğinden iyileşme olgusu incelenmiştir. Bu doğrultuda bakteriyle birlikte GDA ve pomza kullanılarak dökülen harç numunelerinin fiziksel ve mekanik özelliklerin geliştirilmesi, oluşturulan çatlakların onarılması amaçlanmıştır. Karışımlarda GDA kullanılması sürdürülebilirlik kavramını ve çevresel faydayı daha da arttırmaktadır.

Bu çalışma kapsamında *Bacillus subtilis* bakterisi TSB ortamında yetiştirilmiş, yetiştirilen bakteriler TSB, MLB, üre-kalsiyum fosfat ve üre-kalsiyum klorür içeriğine sahip 4 farklı besiyerine ekilerek besi yerleriyle birlikte geri dönüşüm ve pomza agregasına kapsüllenmiştir. Bakterili agregalar %10, %20, %30, %70, %100 hacim oranlarında kireç taşı agregasıyla ikame edilmiştir. Su, agrega ve çimento sırasıyla 1, 3, 0,5 oranlarında %100 kireç taşı karışımı baz alınarak dizayn edilmiş, çimento ağırlığının %5'i oranında çelik lif katılarak 47 karışım hazırlanmıştır. Mekanik özelliklerinden 3, 7, 28 günlük basınç, 28 günlük eğilme dayanımları ve UPV ölçümleri yapılmış, fiziksel özelliklerinden 28 günlük su emme, kılcal su emme ve toplam boşluk oranları incelenmiştir.



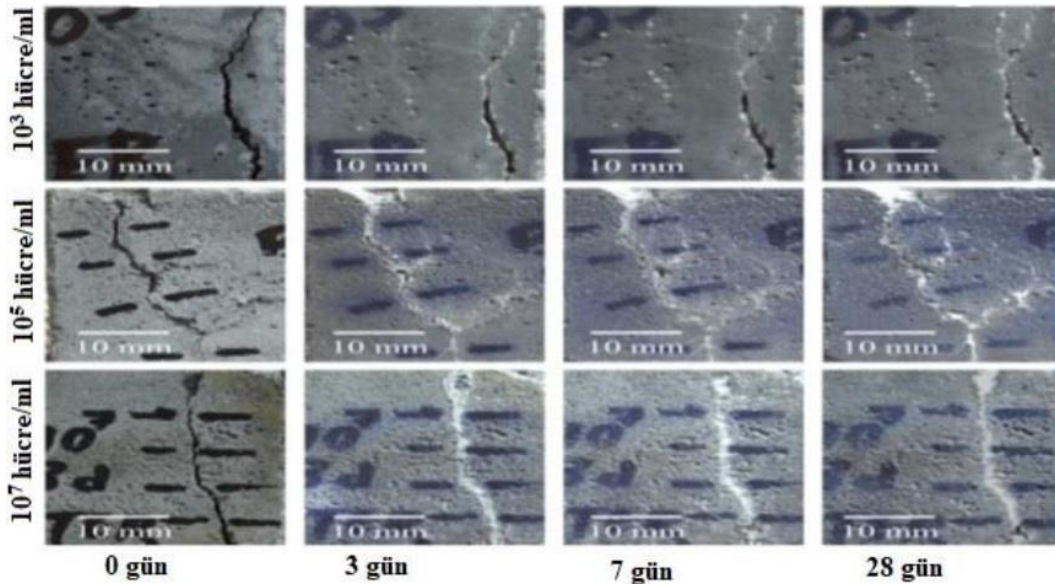
2. LİTERATÜR TARAMA

Khaliq ve Ehsan (2015) tarafından yapılan araştırmada önceki çalışmalardaki bakterilerin tiplerine göre basınç dayanımındaki farklılıklar karşılaştırılmıştır. *B. pasteurii* bakterisinin $7,6 \times 10^3$ hücre/cm³ konsantrasyonunda hazırlanan betonun 28 günlük basınç dayanımı % 18 oranında artmıştır. *Shewanella* bakterisinde ise benzer şekilde betonun 28 günlük basınç dayanımı %25 oranında artmıştır. *Escherichia coli* bakterisinde ise bu artış % 2 olarak gözlemlenirken, *B. pseudofirmus* bakterisinin 6×10^8 hücre/cm³ konsantrasyonunda hazırlanan harçtaki dayanım % 10 oranında azalmıştır. *B. sphaericus* bakterisinde ise basınç dayanımında % 35 oranında bir azalma gözlemlenmiştir. Buna göre bakterinin cinsinin betonun basınç dayanımında olumlu ya da olumsuz etkilerinin bulunduğu kanısına varılmıştır. Kendi çalışmalarında ise *B. Subtilis* bakterisi kullanmışlardır. Olumsuz durumlarda hayatta kalma yeteneği, spor haline gelerek yüksek mekanik, basınç ve alkali ortama dayanabilme kabiliyeti nedeniyle bu bakteriyi seçmişlerdir. Bakteriyi beton karışımının içine direkt ekleyerek, grafit nano yaprağa ve hafif agregaya kapsülleyerek 3 farklı şekilde karışımlarını hazırlamışlardır. Organik prekürsör olarak kalsiyum laktat kullanmışlardır. Karışımların çatlak iyileştirmesi ve basınç dayanımlarını incelemişlerdir. Sonuçlara göre bakterinin kapsüllendiği grafit nano yaprak, ön çatlak oluşturulan numunelerde 3. ve 7. günde daha iyi sonuçlar vermiştir. Hafif agregaya kapsüllenen karışımlarda ise 14. ve 28. günde daha iyi sonuçlar elde etmişlerdir. Hafif agregaya kapsüllenen bakterili karışımlarda bakterisiz karışımlara göre %12 basınç dayanımı artışı görülmüştür.

Huynh vd. (2016) yaptığı çalışmada *Bacillus subtilis* HU58 ve kapsülleme için doğal diyotomit kullanarak betonda ve harçta kendiliğinden iyileşme olgusunu araştırmışlardır. 2 yıl kürlenme sonucunda bakteri kullanılan harçlarda bakterisiz kontrol karışımlarına göre basınç dayanımı %7, eğilme dayanımı %22 oranında artmıştır. Beton numunelerinde ise 2 aylık kürlenme sonucunda bakterisiz kontrol karışımına göre basınç dayanımında %14 artış meydana gelmiştir. 14 gün kürlendikten sonra çatlak oluşturulan numuneler su içerisine konulmuştur. Sonuç olarak 1-1,8 mm genişliğinde oluşturdukları çatlakların 28 günlük sürede kapandığı gözlemlenmiştir.

Mondal ve Ghosh (2018) tarafından en yüksek basınç dayanımı ve iyileştirme performansı için optimum bakteri konsantrasyonunu bulmak amacıyla yapılan araştırmada, 10^3 hücre/ml, 10^5 hücre/ml, 10^7 hücre/ml olmak üzere *B. subtilis*

bakterisinden 3 adet harç karışımı hazırlanmıştır. 28 günlük basınç dayanımları incelendiğinde kontrol karışımına göre sırasıyla %15, %27, %19 oranında artışlar meydana gelmiştir. 10^5 hücre/ml hazırlanan karışım %27 oranında basınç dayanım artışıyla basınç dayanımı yönünden en ideal karışım olmuştur. Su emme oranlarını incelediğimizde 28 günlük kütleme sonucunda bakterisiz kontrol karışımına göre 10^3 hücre/ml bakteri eklenen karışımın su emmesi %13 oranında, 10^5 hücre/ml bakteri eklenen karışımın su emmesi %23 oranında azalmıştır. En iyi performansı 10^7 hücre/ml bakteri eklenen karışım, su emmesi %27 oranında azalarak göstermiştir. Çatlak iyileştirmeler için ise 28 gün kürlendikten sonra numuneler basınç testi makinesinde yüklenmiş, 0,1 mm-1,2 mm arası gözle görülür çatlaklar oluştuğunda makine durdurulmuş ve numuneler tekrar suyun içine konulmuştur. Sonrasında 3, 7 ve 28 günlük çatlaklar gözlemlenmiştir. Bakteri konsantrasyonlarına göre çatlak iyileştirmenin gelişimiyle ilgili görüntüler Şekil 2.1’de verilmiştir.



Şekil 2.1. Zamana bağlı çatlak iyileşme görüntüleri (Mondal and Gosh, 2018)

3 gün sonunda 10^7 hücre/ml bakterili karışımında çatlaklar neredeyse tamamıyla kapanmıştır. 10^5 hücre/ml, 10^3 hücre/ml bakterili karışımlarda ise, çatlaklar sırasıyla %70 ve %30 oranında kapanmıştır. 7 gün sonunda 10^5 hücre/ml bakterili karışımında %85 oranında, 10^3 hücre/ml bakterili karışımında %50 oranında kapanmıştır. Aynı karışımlarda 28 günün sonunda çatlaklar sırasıyla %90 ve %60 oranında kapanmıştır. 28 günün sonunda 10^3 hücre/ml bakterili karışımında 0,6 mm, 10^5 hücre/ml karışımında 0,9 mm, 10^7 hücre/ml olan karışımında ise 1.2 mm

genişliğinde olan çatlaklar iyileşmiştir. Sonuçlar göz önüne alındığında 10^7 hücre/ml olan karışımda en fazla çatlak iyileşme ve su emme oranında azalma gözlemlenirken, basınç dayanımı 10^5 hücre/ml olan karışımda maksimuma ulaşmıştır.

Vijay vd. (2017) tarafından yapılan araştırmaya göre *Bacillus pasteurii*, *Bacillus subtilis* gibi üretilik bakterilerin üre ile kalsiyum kaynağını bütünleştirmesi neticesinde oluşan CaCO_3 (Kalsiyum karbonat) taze oluşan betonun mikro çatlaklarını doldurmaktadır. Bunun neticesinde betonun su emme kapasitesi ve geçirimsizliği azalmakta, dayanım ve durabilite özellikleri gelişmektedir. Bakteriyi kapsülleme metodunun uygulanması daha iyi sonuçlar vermektedir.

Chadal vd. (2011) *Sporosarcina* bakterisinin 0, 10^3 , 10^5 , 10^7 hücre/ml konsantrasyonları ve çimento ağırlığının % 10, % 20, % 30' unun uçucu küllü ikame edilmesiyle hazırladıkları karışımların, 28 günlük basınç dayanımı, su emme ve klor geçirimsizlik özelliklerini incelemişler. Buna göre bakteri miktarlarının artmasıyla birlikte, boşluklarda kalsit birikmesine bağlı olarak basınç dayanımı artmış, su emme ve klor geçirimsizliği azalmıştır. 10^5 hücre/ml olan karışımda en yüksek basınç dayanımı elde edilmiştir. Basınç dayanım artışı bakterisiz kontrol karışımına göre %22 olmuş, su emme oranı dörtte birine düşmüş ve klor geçirimsizliği sekizde bir oranında azalarak uçucu küllü betonların dayanım ve durabilite özellikleri gelişmiştir.

Ling ve Ojan'ın (2017) *Paenibacillus mucilaginosus* bakterisini kullanarak klor iyonu geçirimsizliği üzerine yaptıkları araştırmada, elektrokimyasal test sonucu bakteri eklenmiş betonun içine gömülen donatının korozyon derecesinin, donatı kütle kaybının ve belirli etki derinliklerinde klor sızma miktarının daha az olduğu gözlemlenmiştir. Bununla beraber görsel inceleme sonucunda çatlaktan gözükten korozyonun da az olduğu belirlenmiştir. Bu sonuçlara göre bakteri etkisiyle kendiliğini iyileştiren çatlaklar, beton içerisindeki donatı için koruyucu etki göstermektedirler.

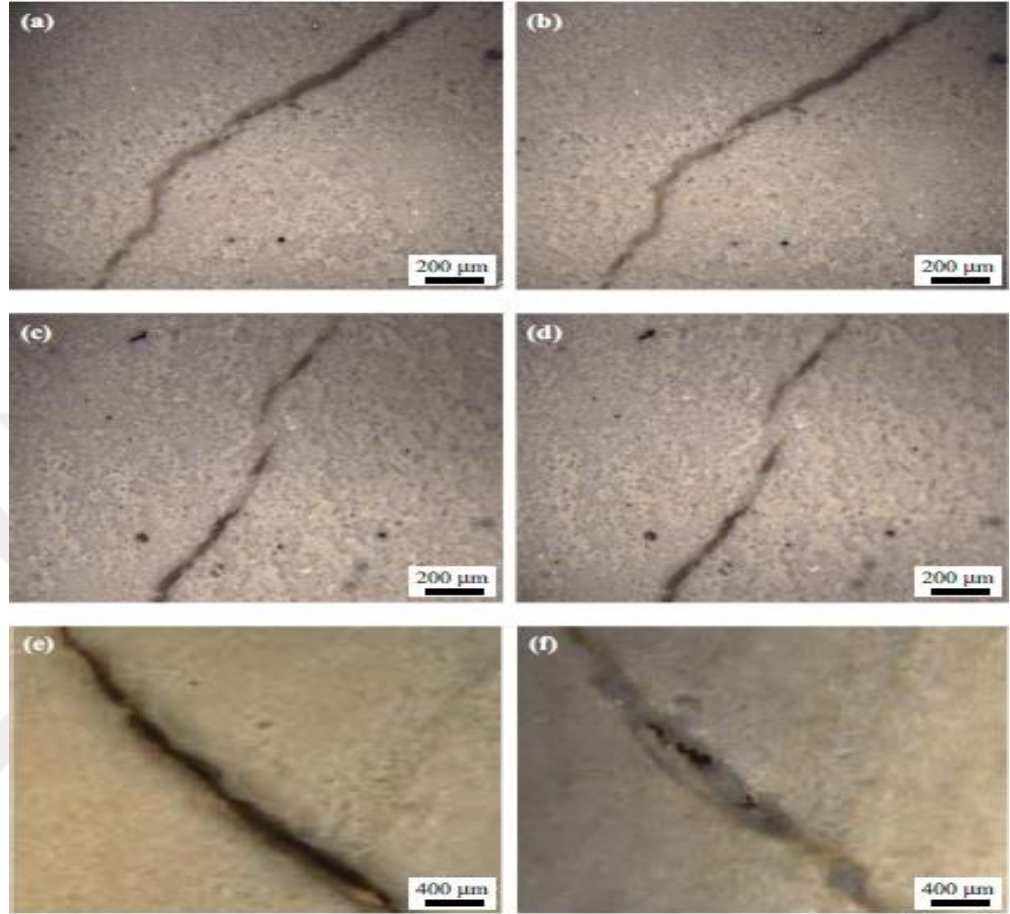
Zhang vd. (2017) yaptığı araştırmalarda görülmüştür ki, bakteri sporlarının beton içindeki canlılığı, beton yaşı arttıkça hızla azalmakta, yüksek alkali ortam, kötü yaşam koşulları ve hidrasyon sonucu boşluk miktarının azalması bakteri sporlarına zarar vermektedir. Bu sorunların üstesinden gelmek için araştırmacılar kapsülleme yöntemini uygulamışlardır. Önceki araştırmalarda bakterinin canlılığının korunması için betonun içine taşıyıcı bileşik olarak poliüretan, silis jeli,

mikro kapsül gibi maddeler eklenmiş fakat bunların yüksek maliyetleri nedeniyle pratik olmadıkları gözlemlenmiştir. Taşıyıcılardan biri olan genişletilmiş perlit yüksek porozitesi ve su emme kapasitesi nedeniyle bakteri taşınması için uygundur. *B. cohnii* bakterisi genişletilmiş perlit ve genişletilmiş kile kapsüllenmiş, bununla birlikte bakterinin direkt beton içerisine eklenmesinin sonucu olarak çatlak iyileştirmeleri karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak *B. Cohnii* içeren genişletilmiş perlitli karışımlar çatlaklarda maksimum iyileşme göstermiştir. 28 günün sonunda 0,79 mm genişliğinde çatlaklar onarılırken, bakterili genişletilmiş kil içerenlerde 0,46 mm genişliğinde çatlaklar onarılmıştır. Perlit içerisinde 10 mm'ye kadar olan oyuklara rastlanması nedeniyle, sadece bakteriyi koruyucu değil aynı zamanda oksijen ve su immobilizasyonu da yaptığı için betonun kırılması veya çatlaması anında bakteri için en uygun şartları oluşturmaktadır.

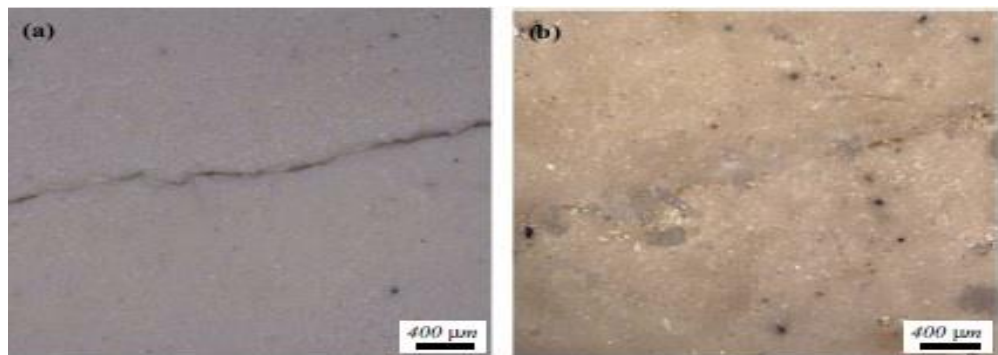
Alazhari vd. (2017) yaptığı benzer bir çalışmada genişletilmiş perlit içerisine *Bacillus pseudofirmus* ve besin maddelerini kapsüllemiştir. Daha sonrasında yüzeyi tamamen ıslanana kadar sodyum silikat solüsyonunda bekletip, ıslak yüzeyine kuru çimento parçaları uygulayarak sert bir kabuk oluşturulmuş ve suyun içinde 48 saat kürlenmiştir. Karışımlarda, kaplı genişletilmiş perlitin % 20'si agrega ile ikame edilirse uygun orandaki bakterilerin kalsiyum asetat prekürsörüne ulaşabileceği düşünülmüştür. Bakteri ortamı 1 gram kalsiyum asetata 8×10^9 spor olacak şekilde hazırlanmıştır. Sadece maya özütü değil, farklı ekstra besin maddeleri eklenirse kalsiyum karbonat oluşumunun hızlanacağı belirtilmiştir. Hazırlanan örneklerle yükleme makinesiyle yükleme yapılmış ve 0,35 mm genişliğinde çatlak oluşturulduğu zaman makine durdurulmuştur. Numuneler %100'e yakın rölatif nem içerisinde, 30 °C , 165 günde iyileşme tamamlanmıştır. Islanma kuruma çevresine konulması halinde daha hızlı iyileşmenin gerçekleşebileceği düşünülmektedir.

Jadhav ve çalışma arkadaşları (2018) tarafından *S. pasteurii* bakterisi kullanılarak yapılan çalışmada, bakterinin metakaolin esaslı geopolimer içinde yaşaması ve çatlak iyileştirmesi incelenmiştir. Bakteri sporları başka bir kapsülleme ve imobilizasyon yapılmadan direkt olarak geopolimer karışımına eklenmiştir. 7 gün küreledikten sonra çatlak oluşturdukları numuneleri 3 gün süreli olarak besi ortamlarında bekletmişlerdir. Besi ortamı içeriği 3 g/l nutrient broth, 10 g/l NH_4Cl , 2.12 g/l Na_2CO_3 , 5.6 g/l CaCl_2 ve 20 g/l üre'den oluşmaktadır. Bakterisiz kontrol geopolimer örneğini besi ortamına, bakterili örneklerden bir tanesini CaCl_2 içermeyen üreli besi ortamına, diğerini ise CaCl_2 içeren üreli besi ortamına koymuşlardır. Daha uzun süreli bakteri canlılık kontrolü için ise numuneyi 1 ay

sonrasında çatlak oluşturup, 3 gün besi ortamında bekletmişlerdir. Şekil 2.2-3 de optik mikroskopla resimlenen çatlak iyileştirmelerin görüntüleri verilmiştir.



Şekil 2.2 Üre ve CaCl_2 içeren besi ortamına maruz bırakılmış çatlak oluşturulmuş bakterisiz örnek (a) öncesi, (b) sonrası; Üre içeren Besi ortamına maruz bırakılmış örnek (c) öncesi, (d) sonrası; Üre ve CaCl_2 içeren besi ortamına maruz bırakılmış çatlak oluşturulmuş bakterili örnek (e) öncesi, (f) sonrası (Jadhav et al., 2018)



Şekil 2.3. 1 aylık kürlenme sonrası çatlak oluşturulmuş ve üre ve CaCl_2 içeren besi ortamına maruz bırakılmış numuneler (Jadhav et al., 2018)

Sonuçlara göre Şekil 3.2a ve 3.2b.’ de bakterisiz numunelerde genişliği 39 ± 5 mikro metre oluşturulmuş çatlakların kapanmadığı, Şekil 3.2c ve Şekil 3.2d’de CaCl_2 içermeyen üreli besi ortamına maruz bırakılmış bakterili numunelerdeki genişliği 25 ± 6 mikro metre çatlakların iyileşmediği, Şekil 3.2e ve Şekil 3.2f’de CaCl_2 içeren üreli besi ortamına maruz bırakılmış bakterili numunelerdeki genişliği 89 ± 3 çatlakların ise iyileştiği görülmektedir. Buna göre bakteri içeren geopolimerde çatlak iyileşmesi uygulanabilir bir yöntem olmakla beraber, ortamda kalsiyum kaynağının mevcudiyeti gereklidir. Şekil 3.3a ve 3.3b’ de görülebileceği üzere 1 ay kürlenmiş numunelerde oluşturulan çatlaklar besi ortamına maruz bırakıldıktan sonra kapanmıştır. Bu metakolin bazlı geopolimerde bakterinin canlılığını koruduğunu göstermektedir (Jadhav et al., 2018).

Luo ve çalışma arkadaşlarının 2018 yılında yaptığı araştırmada beton içerisindeki yüksek alkalite, nem azlığı, sınırlı besin gibi zorlu koşullara bazı mantar türlerinin daha iyi adapte olabildiği görülmektedir. Mantar sporlarının beton içinde sıkışıp ezilmemesi için kapsülleme ya da hava sürükeyici katkı kullanılması gerekmektedir. *Trichoderma reesei* mantarı kullanılarak yapılan çalışmada, mantar sporlarının beton içerisinde çimlendiği ve SEM, XRD deneyleriyle de belirlendiği üzere kalsit oluşturdıkları gözlemlenmiştir (Jing Luo. V.d., 2018).

Bhaskar ve çalışma arkadaşlarının 2017 yılında *S. ureae* ve *S. pasteurii* bakterisi kullanılarak yaptıkları çalışmada kapsüllemeye zeoliti taşıyıcı olarak kullanılmıştır. Zeolit geniş yüzey alanı, sertliği ve yüksek porozitesi nedeniyle koruyucu taşıyıcı araç olarak uygun bir maddedir. Çalışmada kalsiyum kaynağı olarak kalsiyum laktat, nitrojen kaynağı olarak üre ve besin olarak maya özütü kullanılmıştır. Lifli harç ve normal harç kullanılarak yapılan karışımlarda iyileşme özellikleri, basınç dayanımı gelişmeleri ve kılcal su emme, su emme ve permeabilite özellikleri karşılaştırılmıştır. 270 günün sonunda en yüksek basınç dayanımı lifli harçta 100 MPa, normal harçta 65 MPa olarak *Sporosarcina pasteurii* + zeolit karışımında elde edilmiştir. Bakterisiz karşıma göre ortalama %10 oranında basınç dayanımı artmıştır. 28 günlük basınç dayanımı incelendiğinde *sporosarcina üreae* bakterisinin performansı *sporosarcina pasteurii* bakterisine yakınen, 270 günün sonunda, *sporosarcina üreae* bakterisi *sporosarcina pasteurii* bakterisine göre %8 oranında daha düşük performans göstermiştir. Basınç dayanımı bakteri hücresinin duvarı ile harç numunelerinin gözenekleri arasında CaCO_3 birikmesi nedeniyle artmıştır. Harç matrisinin dayanımının artması durabilite performansının artmasını sağlamıştır.

Tüm karışımlarda birincil kılcal su emme zaman içerisinde azalmıştır. Bunun nedeni hidrasyonun devam etmesi ve bakteri aktivitesiyle boşlukların kapanmasıdır. 4, 6 ve 8 aylık iyileştirme süreleri göz önüne alındığında birincil kılcal su emme miktarı kontrol karışımlarında sırasıyla %33, %39, %43 oranında azalmıştır. Sadece besin kapsüllenen kontrol karışımlarında ise 4, 6 ve 8 aylık iyileştirme sürelerinde sırasıyla %40, %45, %49 oranında azalmıştır. Lifli *Sporosarcina ureae* ve *Sporosarcina pasteurii* içeren harç karışımlarında ise aynı süre zarfında sırasıyla %63-67, %74-86, %78-91 oranında birincil kılcal su emmelerde azalma meydana gelmiştir. Bakterisiz kontrol ve sadece besi kapsüllenen normal karışımlarda ise 8 aylık sürede kılcal su emmede çok büyük bir azalma görülmemiştir. Kontrol karışımında %6, sadece besi ortamı bulunan karışımında %14 azalma meydana gelirken, *sporosarcina ureae* + zeolit karışımında 8 aylık süre sonunda kılcal su emme %61 oranında, *Sporosarcina pasteurii* + zeolit karışımında ise aynı sürede %59 oranında azalmıştır. Sonuçlar bakterinin kendiliğinden iyileşme olgusuna geliştirdiğini desteklemektedir. 8 aylık süre sonunda en yüksek birincil kılcal su emme azalma oranı lifli *Sporosarcina pasteurii* + zeolit içeren karışımlarda %91 ile meydana gelmiştir.

Kılcal su emmedeki azalmanın büyük kısmı ilk 4 ayda meydana gelmiştir. Bakterili lifli harçlarda %65, bakterili normal harçlarda %50 oranında kılcal su emme azalmıştır. Bunun nedeni bakteri etkisiyle kendiliğinden iyileşmenin ilk 4 ayda daha fazla olması, sonrasında azalmasıdır. Kılcal su emmede bakterili lifli harçların (%91 azalma), bakterili normal harçlara (%61 azalma) göre daha iyi performans göstermesinin nedeni ise içerisinde bulunan lif karakterisliğinin çatlakları örme, kenetleme özelliğinin bulunması olabilir. Bu nedenle lif ve bakterinin bir arada kullanılması çok faydalı sonuçlar vermiştir.

Lifli harç üzerine yapılan SEM ve EDS çalışmalarında iki bakteri türünün de çatlakları kapatabilecek yararlı mineralleri üretebildiği görülmüştür. Kendinden iyileşen harçlarda oluşan etken kristal morfolojisi kalsit olarak görülmektedir. Bakteri kullanılarak hazırlanmış numunelerin su emme kapasitesi ve geçirimsizliklerinde azalmalar görülmektedir. İki bakteri türünün de iyileştirme kapasitesi yüksek olmasına karşın *S. pasteurii* bakterisi *S. urea* bakterisine göre daha etkili iyileştirme özelliği göstermekte ve *S. pasteurii* + Zeolit içeren harçlarda uzun dönemde maksimum basınç dayanımı oluşmaktadır.

Gosh vd. (2005) yaptığı çalışmada, harçların mikrobiyolojik olarak tetiklenmiş mineral birikmesiyle basınç dayanımı geliştirilmesini incelemiştir. *Shewanella* ve *E. coli* bakteri türüne ait 10 hücre/ml ile 10^7 hücre/ml arası 7 farklı hücre konsantrasyonu hazırlanarak karışım suyuna eklenmiştir. 3-7-14-28 günlük basınç dayanımı sonuçları incelendiğinde bütün zamanlarda en yüksek basınç dayanımı *Shewanella* bakterisinin 10^5 hücre/ml konsantrasyonu ile yapılan harç karışımında elde edilmiştir. 28 günlük basınç dayanımı bakterisiz kontrol karışımına göre %25 oranında artmıştır. Bu basınç artışının bakteri hücre yüzeyiyle çimento-kum matrisi arasındaki gözeneklerde mineral birikmesi nedeniyle olduğu düşünülmektedir. Civa porozimetresi gözenek boyutu dağılımının değiştiğini desteklemektedir. 10^5 hücre/ml *shewanella* bakterisi ile yapılan karışımların boşluk oranında en fazla azalma görülmüştür. Bakteri hücresi ürünlerinin zaman geçtikçe artmasıyla basınç dayanımının arttığı, bu nedenle 28. günde en iyi performansın görüldüğü, hatta ölen hücrelerin de harç matrisinin içinde kalarak organik lif olarak fayda sağladığı düşünülmektedir. *E. Coli* bakterisi eklenerek hazırlanan karışımlarda ise basınç dayanımında %1 oranında azalma meydana gelmiştir. Kayda değer bir dayanım artışı ya da değişimi olmamıştır. Eğer basınç dayanımında gelişme isteniyorsa mikroorganizma seçiminin önemli ve etkili olduğu görülmektedir.

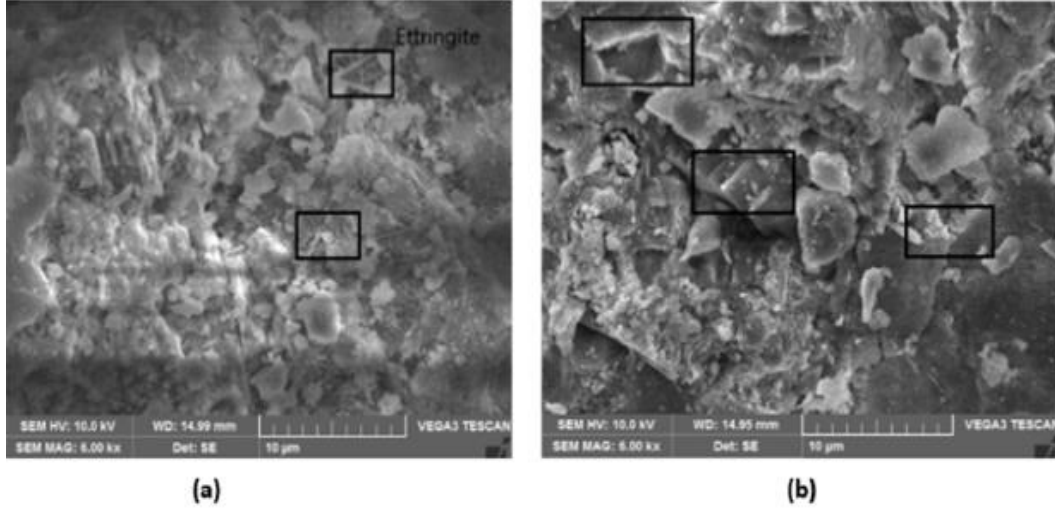
Gubta vd. (2018) çalışmalarında *Bacillus sphaericus* bakterisini biyokömür (biochar) içerisine kapsülleyerek harç karışımlarında kullanmışlardır. Hazırlanan numunelerin basınç ve eğilme dayanımı, su emme oranı ve oluşturulan çatlakların iyileştirme özelliklerini incelemişlerdir. 14 günlük kür sonrasında ön yükleme yaparak çatlak oluşturmuşlardır. Çatlak oluşturulan harç numunelerini %100 bağıl nem 27 ± 2 °C ortam sıcaklığında 21 gün boyunca bekletmişlerdir. Bu sürenin sonunda 0,7 mm'ye kadar olan çatlakların kapandığı gözlemlenmiştir. 7 günlük basınç dayanımları incelendiğinde kontrol karışımlarında 46 MPa bulunan değer, %10,9 oranında artarak bakterili karışımlarda 51 MPa'ya çıkmıştır. 28 günlük basınç dayanımı incelendiğinde ise kontrol karışımlarında 53 MPa olan dayanım %11,3 oranında artarak bakterili karışımlarda 59 MPa olarak bulunmuştur. 28 günlük eğilme dayanımı incelendiğinde ise kontrol karışımlarında 11 MPa olan dayanım %9 oranında artarak bakterili karışımlarda 12 MPa olarak bulunmuştur. Ayrıca bakteri kullanımının harçların kılcal su emme hızlarında da bakterisiz karışımlara göre önemli ölçüde düşüş sağladığı gözlemlenmiştir.

Mondal vd. (2017) 3 farklı konsantrasyonda (10^3 , 10^5 , 10^7 hücre/ml) *Bacillus subtilis* ve *Bacillus cereus* bakterilerini kullanarak yaptıkları çalışmada, beton

karışımlarının basınç dayanımı ve bakterinin çatlakları iyileştirme özelliklerine etkisini incelemişlerdir. İki farklı bakteri türünün 7 günlük ve 28 günlük basınç dayanımlarında kontrol karışımlarına kıyasla artış sağladığı gözlemlenmiştir. Optimum bakteri konsantrasyonunun, *Bacillus cereus* için 10^3 hücre/ml, *Bacillus subtilis* için ise 10^5 hücre/ml olduğu belirtilmiştir. Optimum konsantrasyonda *Bacillus cereus* bakterisi içeren karışımlarda 7 günlük ve 28 günlük basınç dayanımları bakterisiz kontrol karışımına göre %20 oranında artmıştır. Optimum konsantrasyonda *Bacillus subtilis* bakterisi içeren karışımlarda ise bakterisiz kontrol karışımlarına göre 7 günlük basınç dayanımı %32 oranında artarken, 28 günlük basınç dayanımı %25 oranında artmıştır. 28 günlük UPV sonuçları incelendiğinde, optimum bakteri konsantrasyonundaki *Bacillus cereus* bakterisi içeren karışımların, bakterisiz kontrol karışımlarına göre UPV değeri %1,4 oranında artmış, *Bacillus subtilis* bakterisi içeren karışımların ise bakterisiz kontrol karışımlarına göre UPV değeri %1,7 oranında artmıştır. Yazarlar UPV değerleri ve basınç dayanımındaki bu artışı bakteriyel etkiyle kalsit oluşumuna dayandırmaktadır.

Nain vd. (2019), *Bacillus subtilis* ve *Bacillus megaterium* bakterisi kullanarak yaptıkları araştırmada 7 gün ve 28 gün kürlenme sonucunda beton örneklerinin basınç ve eğilme dayanımlarını incelemiş, SEM görüntüleme yöntemiyle beton örneklerinin mikro yapılarını belirlemiştir. 7 günlük kürlenme sonucunda, bakterisiz kontrol karışımının basınç dayanımı 21,81 MPa bulunurken, *Bacillus megaterium* bakterisi kullanılan karışımların basınç dayanımı %27 oranında artarak 27,6 MPa, *Bacillus subtilis* bakterisi kullanılan karışımların basınç dayanımı %46 oranında artarak 31,93 MPa bulunmuştur. 28 günlük kürlenme sonucunda ise bakterisiz kontrol karışımlarında 38,08 MPa bulunan basınç dayanımı, *Bacillus megaterium* bakterisi kullanılan karışımlarda %22,58 oranında artarak 46,68 MPa, *Bacillus megaterium* bakterisi kullanılan karışımlarda ise %14,36 oranında artarak 43,55 MPa değerine ulaşmıştır. Eğilme dayanımında ise 7 günlük kürlenme sonucunda, bakterisiz kontrol karışımının basınç dayanımı 1,86 MPa bulunurken, *Bacillus megaterium* bakterisi kullanılan karışımların basınç dayanımı %96 oranında artarak 3,64 MPa, *Bacillus subtilis* bakterisi kullanılan karışımların basınç dayanımı %17 oranında artarak 2,23 MPa bulunmuştur. 28 günlük kürlenme sonucunda ise bakterisiz kontrol karışımlarında 3,28 MPa bulunan basınç dayanımı, *Bacillus megaterium* bakterisi kullanılan karışımlarda %18 oranında artarak 3,88 MPa, *Bacillus megaterium* bakterisi kullanılan karışımlarda ise %25 oranında artarak 4,11 MPa değerine ulaşmıştır. SEM görüntüleri incelendiğinde Şekil 2.4.'te

numunelerin üzerinde karbonat kristalleri gözükmemektedir. Görüntülerdeki rombohedral kristaller kalsit yapısının mevcudiyetini tasvir etmektedir.



Şekil 2.4 (a) Dikdörtgenle işaretli kısımlar *Bacillus subtilis* içeren betondaki kalsit mevcudiyetini göstermektedir. (b) Dikdörtgenle işaretli kısımlar *Bacillus megaterium* içeren betondaki kalsit mevcudiyetini göstermektedir.

Siddique vd. (2017), yaptığı çalışmada *Alkaliphilic/alkalitolerant* bakterinin çimento ağırlığının %5, %10, %15' i oranında silis dumanı kullanarak betonun dayanım ve geçirimsizlik özelliklerine etkisini incelemiştir. Bakteri konsantrasyonu 10^5 hücre/ml olarak kullanılmıştır. 28 günlük kürlenme sonucunda bakterili silis dumanı içeren karışımlarda genel olarak ortalama %10-12 arasında basınç dayanımında bakterisiz kontrol karışımlarına göre artış görülmüştür. Bakteri içerenlerde, bakteri içermeyenlere göre silis dumanı kullanılmayan karışımlarda basınç dayanımı 32,9 MPa'dan 36,5 MPa değerine, %5 silis dumanı kullanılan karışımlarda 34,8 MPa'dan 38,4 MPa değerine, %10 silis dumanı kullanılan karışımlarda 38,7 MPa'dan 43 MPa değerine, %15 silis dumanı kullanılan karışımlarda 36,6 MPa'dan 40,2 MPa değerine ulaşmıştır. 28 günlük su emme değerleri incelendiğinde %5, %10, %15 silis dumanı içeren bakterili karışımların su emme oranları aynı oranda silis dumanı içeren bakterisiz karışımlara kıyaslandığında sırasıyla %42, %49 ve %44 oranında azalmıştır. En düşük su emme oranı %0,85 ve %0,75 olarak bakterili %10 silis dumanı içeren karışımın sırasıyla 28 gün ve 56 günlük kür süresi sonrasında görülmüştür. Su emme oranının azalmasının nedeninin bakteri etkisiyle oluşan kalsit kristallerinin gözeneklerin bağlantısını kopardığı düşünülmektedir. 28 günlük kür sonunda porozite oranları incelendiğinde %5, %10, %15 silis dumanı içeren bakterisiz karışımların, aynı

oranda silis dumanı içermeyen karışımlara göre sırasıyla %17, %27, %25 oranında porozitelerinde azalma görülmüştür. Su emme oranına benzer sonuçlarla %10 silis dumanı içeren bakteri karışımı, 28 günlük ve 56 günlük kür sonucunda en iyi performansı göstermiştir. İnce taneli silis dumanı boşlukları doldurarak daha yoğun bir matris oluşturmaktadır. Bakterili karışımlarda ise porozitelerdeki azalmanın tüm silis dumanlı karışım oranlarında %50 ile %55 arasında değiştiği belirtilmiştir.

Bai ve Varghese (2014) yaptığı çalışmada 10^3 , 10^5 , 10^7 hücre/ml konsantrasyonlarındaki *Bacillus subtilis* bakterisi kullanarak ve çimento ağırlığının %10, %20, %30 oranında uçucu kül ikamesiyle hazırlanan betonların basınç dayanımı, eğilme dayanımı, UPV değerleri belirlenmiştir. Öncelikle uçucu kül optimizasyonu için 56 günlük kür sonundaki basınç dayanımı değerleri incelenmiş, buna göre %10 oranında uçucu kül kullanılan karışımlar, uçucu kül kullanılmayan kontrol karışımlarına göre, basınç dayanımını %7 oranında arttırarak en iyi etkiyi göstermiştir. Sonrasında %10 oranında uçucu kül ikamesi ve 10^3 , 10^5 , 10^7 hücre/ml konsantrasyonlarında bakterili karışımlar kullanılarak hazırlanan betonlar içerisinde en iyi performansı gösteren 10^5 hücre/ml konsantrasyonunda bakteri içeren karışımlar olmuştur. Bakterisiz aynı oranda uçucu kül içeren kontrol karışımlarına göre basınç dayanımı 28 gün sonunda %15, 56 gün sonunda ise %7 oranında artmış, eğilme dayanımı 28 günlük kür sonunda %11, 56 günün sonunda %40 oranında artmıştır. 28 günlük UPV değerleri ölçüldüğünde ise, 10^5 hücre/ml konsantrasyonuna sahip karışım, bakterisiz beton karışımına göre UPV değerini %7 oranında arttırmıştır.



3. DENEYSEL ÇALIŞMA

3.1. Kullanılan Malzemeler

3.1.1. Çimento

Harç karışımlarının hazırlanması için CEM I 42.5R tipi çimento kullanılmıştır. Tablo 3.1’de kullanılan çimentonun kimyasal analizi, Tablo 3.2’de fiziksel ve mekanik özellikleri verilmiştir.

Tablo 3.1. Çimentonun kimyasal analizi

Oksit	%	TS EN 197-1 sınırları(%)
CaO	62,07	
SiO ₂	18,39	
Al ₂ O ₃	4,2	
Fe ₂ O ₃	3,24	
MgO	1,32	≤5
Na ₂ O	0,55	
K ₂ O	0,76	
SO ₃	3,46	≤4
Cl ⁻	0,006	≤0,1
Serbest CaO	0,92	
Katkı	2,46	
Kızdırma Kaybı	3,28	≤5
Çözünmeyen Kalıntı	0,03	≤5
TOPLAM	99,74	
*Bu değerler üretici firmadan temin edilmiştir.		

Tablo 3.2. Çimentonun fiziksel özellikleri ve dayanımı

Özellikler		CEM I 42,5 R	TS EN 197-1 sınırları(%)
Basınç Dayanımı (MPa)	2 Gün	29,8	≥20
	7 Gün	43,3	
	28 Gün	46	≥42,5
	90 Gün	55	
İncelik	Özgül yüzey alanı (cm ² /g)	3210	
	0,090 mm elekte kalan (%)	0,5	
	0,032 mm elekte kalan (%)	19,7	
Özgül Ağırlık		3,1	
Priz Süresi	Başlangıç (dakika)	230	≥60
	Bitiş (dakika)	320	
Standart Kıvam (%)		28,2	
Le Chatelier Genleşmesi (mm)		0	≤10
*Bu değerler üretici firmadan temin edilmiştir.			

3.1.2. Agrega

Harç karışımlarının hazırlanması için kireçtaşı, geri dönüşüm agregası ve pomza olmak üzere 3 farklı tip agregası kullanılmıştır. 0,125 mm – 4 mm elek aralığında malzeme kullanılmıştır. 0,125 altı malzeme yıkanarak uzaklaştırılmıştır. TS EN 933-1 standardına göre elek analizi yapılmıştır. Tane yoğunluğu ve su emme oranının tayini TS EN 1097-6 standardına göre yapılmıştır.

3.1.2.1. Kireç taşı

Kireç taşı agregasına ait elek analizi sonuçları Tablo 3.3’de, bazı fiziksel özellikleri ise Tablo 3.4’de verilmiştir.

Tablo 3.3. Kireç taşı agregası elek analizi sonuçları

Elek Açıklığı (mm)	Elekten Geçen (%)
8,0	100
4,0	100
2,0	66
1,0	36
0,5	20
0,25	11
0,125	0
Alt Tane	0

Tablo 3.4. Kireç taşı agregası fiziksel özellikleri

Özellikler	Kireçtaşı
Sıkışık birim hacim ağırlık, (kg/m ³)	1819
Gevşek birim hacim ağırlık, (kg/m ³)	1600
Özgül ağırlık (Doygun yüzey kuru)	2,657
Su emme oranı (%)	1,23

3.1.2.2. Pomza

Pomza agregasına ait elek analizi sonuçları Tablo 3.5’de, bazı fiziksel özellikleri ise Tablo 3.6’da verilmiştir.

Tablo 3.5. Pomza agregası elek analizi sonuçları

Elek Açıklığı (mm)	Elekten Geçen (%)
8,0	100
4,0	100
2,0	80
1,0	60
0,5	39
0,25	20
0,125	0
Alt Tane	0

Tablo 3.6 Pomza agregası fiziksel özellikleri

Özellikler	Pomza
Sıkışık birim hacim ağırlık, (kg/m ³)	1065
Gevşek birim hacim ağırlık, (kg/m ³)	982
Özgül ağırlık (Doygun yüzey kuru)	1,864
Su emme oranı (%)	10,08

3.1.2.3. Geri dönüşüm agregası

Geri dönüşüm agregasına ait elek analizi sonuçları Tablo 3.7’de, bazı fiziksel özellikleri ise Tablo 3.8’de verilmiştir.

Tablo 3.7 Geri dönüşüm agregası elek analizi sonuçları

Elek Açıklığı (mm)	Elekten Geçen (%)
8,0	100
4,0	100
2,0	72
1,0	48
0,5	28
0,25	7
0,125	0
Alt Tane	0

Tablo 3.8 Geri dönüşüm agregası fiziksel özellikleri

Özellikler	GDA
Sıkışık birim hacim ağırlık, (kg/m ³)	1330
Gevşek birim hacim ağırlık, (kg/m ³)	1191
Özgül ağırlık (Doygun yüzey kuru)	2,380
Su emme oranı (%)	8,12

3.1.3. Lif

Karışımlarda çimento ağırlığının %5'i oranında lif olarak pirinç kaplı çelik tel kullanılmıştır. Teknik özellikleri Tablo 3.9'da verilmiştir. Bu değerler üretici firmadan temin edilmiştir.

Tablo 3.9. Lif teknik özellikleri

Çelik teller yüksek karbonlu çeliklerin soğuk çekme işlemi ile elde edilmiştir.
Teller pirinç kaplıdır.
Tel çekme dayanımı (DIN 17 140-00; EN 10016 - 2 - C9D) : $>2000 \text{ N/mm}^2$
Uzamadaki kopma: $< \%1$
TSE 10513 ve CE sertifikalıdır.
Düz Sınıf A
Çap x Uzunluk (mm) : 0,18 x 6

3.1.4. Bakteri

Biyoloji katkı olarak *Bacillus subtilis* DSM 347 bakteri türü kullanılmıştır. Olumsuz durumlarda hayatta kalma yeteneği, spor haline gelerek yüksek mekanik basınç ve alkali ortama dayanabilme kabiliyeti nedeniyle bu seçim yapılmıştır.

3.2. Bakterinin Canlandırılması ve Besi Yerlerine Ekimi

-80°C 'da muhafaza edilen *Bacillus subtilis* suşunu canlandırmak için TSB ortamı kullanılmıştır. Steril kabinde ilk olarak Nutrient Broth (NB) ortamı denenmiş ancak 24 saatlik takip sonucu 600nm'de optik densitesi (OD) max. 0,328 absorbans olarak ölçülmüştür. Yetersiz çoğalması nedeniyle daha sonra TSB ortamı denenmiş ve canlandırma işlemine TSB ortamında devam edilmiştir. 100 ml'lik steril erleninde 25 ml TSB ortamına 100 mikrolitre (μL) bakteri ekilmiş, sonrasında 24 saat OD takibi yapılmıştır. Bu süre zarfında 28°C, 150 rpm inkübasyona bırakılmıştır. Sonuç olarak, 0,819 absorbans değeri okunmuştur.

OD değeri 0,819 olduğu zaman bakteriler, otoklavlanarak hazırlanan (121°C, 20 dk) 250 ml'lik erlenlerde bulunan 50 ml'lik 4 farklı besiyerine, her birine 1 ml olacak şekilde ekilmiş ve 24 saat inkübasyona bırakılmıştır. İnkübasyon işlemi Şekil 3.1' de, besi yerlerinin içeriği Tablo 3.10'da gösterilmiştir.



Şekil 3.1 İnkübasyon İşlemi

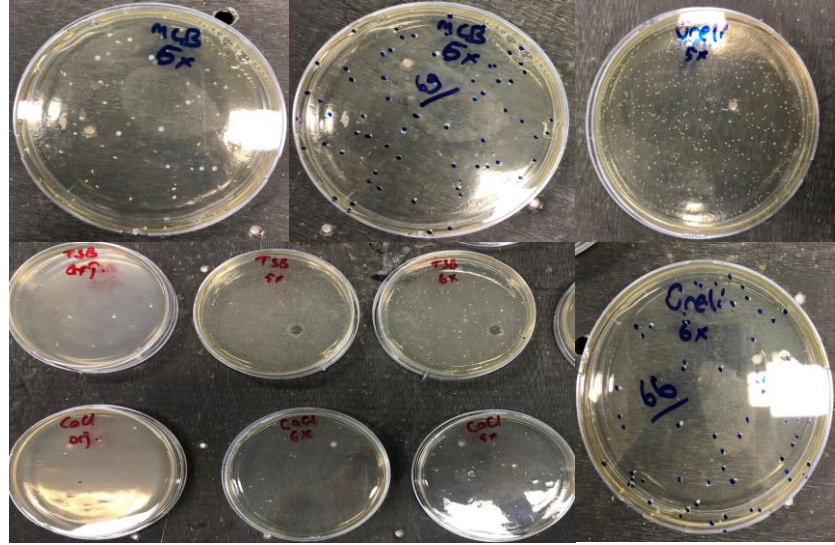
Tablo 3.10 Bakterinin besi ortamları

Besi Ortamı içeriği (g/l)	Besi Ortamı 1	Besi Ortamı 2	Besi Ortamı 3	Besi Ortamı 4
	TSB (Tryptic soy broth)	Modifiye LB (Luria-Bertani)	Üre - Kalsiyum Fosfat Ortamı	Üre – CaCl ₂ Ortamı
Kazein Pepton	17	-	-	-
Dipotasyum hidrojen fosfat	2,5	-	-	-
Glikoz	2,5	-	-	-
Sodyum Klorür	5	-	-	-
Soya Pepton	3	-	-	-
Tripton	-	5	-	-
Maya Ekstratı	-	5	5	5
Üre	-	-	10	10
Kalsiyum Fosfat	-	10	10	-
Kalsiyum Klorür	-	-	-	15

3.3. Bakteri Hücrelerinin Sayılması

100 ml saf suda 0,9 gr sodyum klorür çözülerek hazırlanan serum fizyolojik sıvı (FTS) her bir tüpe 4,5 ml bulunacak şekilde konulmuştur. *B. Subtilis* besi ortamından 500 µL alınmış, içerisinde FTS olan tüplere eklenerek seyreltme yapılmıştır. Daha sonra her bir seyreltmeye yine 500 µL konulacak şekilde 10⁻⁶'ya kadar seyreltmelere devam edilmiştir. Hazırlanan 5x ve 6x' lik seyreltmelerden 1 ml alınarak boş petrilere konulmuştur. Üzerine Triptik Soy Agar (TSA) eklenerek dökme plaka yöntemi uygulanmıştır. Hücre büyümesi için 48 saat boyunca 37°C'de inkübasyona bırakılmıştır. Daha sonra büyüyen hücrelerden koloni sayımı yapılmıştır.

TSB'li ortamda 191x10⁶ hücre/ml, , MLB'li ortamda 69x10⁶ hücre/ml, üre-kalsiyum fosfat ortamında 66x10⁶ hücre/ml, üre-kalsiyum klorür ortamında 38x10⁵ hücre/ml bakteri hücresi sayılmıştır. Şekil 3.2'de petri kaplarında yapılan seyreltmeler ve sayım gösterilmiştir.



Şekil 3.2. Besi ortamlarında alınan bakteri örneklerinin sayımı

3.4. Bakterinin Kullanımı ve Harç Karışımlarının Hazırlanması

Besi yerlerine ekildikten 24 saat sonrasında hazır olan bakterili ortam solüsyonları, GDA ve Pomza agregalarını doymuş yüzey kuru hale getirecek şekilde emdirilir, tamamen doymuş yüzey kuru hale gelmesi için dış ortamdan ilişkisi kesilerek 24 saat bekletilir.

Bu çalışma kapsamında karışımlar hazırlanırken kireç taşı agregası yerine hacimce %10, %20, %30, %70, %100 oranında farklı bakterili ortamlar emdirilen doymuş yüzey kurusu geri dönüşüm agregası ve pomza agregası ikame edilmiştir. Hacimce %10, %20 oranında pomza ve GDA ikame edilen karışımlarda pomza ve GDA'ya 1, 2, 3 ve 4. bakterili ortamlar uygulanmış, hacimce %30, %70, %100 oranında pomza ve GDA ikame edilen karışımlara 1, 2 ve 3. bakterili ortamlar uygulanmış, ayrıca ilave olarak 3. bakterili ortam, %30 pomza ve GDA içeren karışıma önceden emdirilmeden harç dökümü esnasında tatbik edilmiştir.

%100 kireç taşı baz alınarak su/çimento oranı 0,5 ve agrega/çimento oranı 3 olarak belirlenmiştir. Bakteri ortamları emdirilerek hazırlanan 47 karışımın Tablo 3.11'de karışım oranları gösterilmiştir.

Tablo 3.11. Harçların karışım oranları (kg/m³)

[illegible]

3.5. Harç Numunelerinin Dökümü ve Deneyleri

Çalışmada 47 harç karışımından tek eksenli basınç deneyi için 423 adet 50x50x50 mm boyutunda küp, eğilme deneyi, su emme, kılcal su emme, toplam boşluk miktarı tayini ve kontrollü çatlak oluşturup gözlemlleme için 423 adet 40x40x160 mm boyutunda prizmatik numune hazırlanmıştır. Hazırlanan numuneler 3-7-28 günlük sürelerde su içerisinde kürlenmiştir. Harç karışımlarının hazırlanması ve kalıba yerleştirme işlemi için TS EN 196-1 standardı uygulanmıştır. Basınç dayanımı deneyi, TS EN 12390-3 standardına göre küp numuneler, eğilme dayanımı deneyi ise TS EN 12390-5 standardına göre prizmatik numuneler üzerinde yapılmıştır. UPV aygıtıyla UPV ölçümleri ASTM C597 standardına göre alınmıştır. Su emme ve boşluk oranı tayini TS EN 480-11 standardına, kılcal su emme tayini ise ASTM C1585 standardına göre yapılmıştır. Şekil 3.3’de numunelerden bazılarının kılcal su emme deneyleri gösterilmiştir.



Şekil 3.3. Kılcal su emme deneyi uygulanan numuneler

Kontrollü çatlak oluşturma işlemi 28 gün su içerisinde kürlenmiş prizmatik numunelere uygulanmıştır. Eğilme deney makinesinde gözle görülen çatlak oluştuğunda makinenin durdurulmasıyla oluşturulmuştur. Lif kullanımı kontrollü çatlak oluşturma işlemini kolaylaştırmıştır. Numuneler kodlanmış ve çatlak yeri işaretlenmiştir. Çatlak oluşturulmuş numuneler Şekil 3.4’de gösterilmiştir. Sonrasında çatlak oluşturulan numuneler tekrar 28 gün su içerisinde bekletilmiş, bu süre zarfında çatlaklardaki iyileşmenin tespiti için başlangıçta, 15. ve 28. günlerde stereo mikroskop kullanılarak fotoğraflanmıştır.



Şekil 3.4. Çatlak oluşturulmuş numuneler

4. DENEY SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRİLMESİ

4.1. Basınç Dayanımı Deney Sonuçları

Basınç dayanımının etkisi, bakteri ortamının kapsüllendiği geri dönüşüm agregası (GDA), pomza (P) ve kireç taşı (KT) içeriğine bağlı olarak belirlenmiştir. Gösterimde baştaki sayı kireç taşına göre hacimce ikame edilen agreganın oranını göstermektedir. Örneğin; 100 GDA, %100 oranında geri dönüşüm agregası kullanılan karışımları ifade etmektedir.

3, 7, 28 günlük basınç dayanımı sonuçları ve kontrol karışımına bağlı değişimleri Tablo 4.1-6'da gösterilmiştir.

Tablo 4.1. 3 günlük basınç dayanımları (MPa)

Karışım Türü	Kontrol Bakterisiz	1. Besi Yeri TSB Ortamı	2. Besi Yeri MLB Ortamı	3. Besi Yeri Üre - Kalsiyum Fosfat Ortamı	4. Besi Yeri Üre - CaCl ₂ Ortamı
100 GDA	18,5	7,1	12,9	15	-
100 P	17,6	17,9	20,0	22,6	-
70 GDA	22,6	11,2	26,5	24,7	-
70 P	19,8	23,9	23,5	23,2	-
30 GDA	23,4	20,7	27,7	31,6	-
30 P	24,2	28,5	28,5	25,9	-
20 GDA	27,6	23	30,2	29,2	35,3
20 P	28,9	25	31,8	27,9	28
10 GDA	30,3	28,9	30,4	31	31,3
10 P	30,8	29,5	32,7	29,8	33,7
100 KT	30,1	-	-	-	-

Tablo 4.2. 3 günlük bağıl basınç dayanımı oranları (%)

Karışım Türü	Kontrol Bakterisiz	1. Besi Yeri TSB Ortamı	2. Besi Yeri MLB Ortamı	3. Besi Yeri Üre - Kalsiyum Fosfat Ortamı	4. Besi Yeri Üre - CaCl ₂ Ortamı
100 GDA	100	38	70	81	-
100 P	100	102	114	129	-
70 GDA	100	50	117	109	-
70 P	100	121	119	117	-
30 GDA	100	88	118	135	-
30 P	100	118	117	107	-
20 GDA	100	83	109	106	128
20 P	100	86	110	97	97
10 GDA	100	95	100	102	103
10 P	100	96	106	97	109

Tablo 4.1 ve 4.2 incelendiğinde, 3 günlük dayanımlarda 1. ortam haricindeki ortamlar kullanılarak hazırlanan karışımların, %100 GDA'lı karışımlar haricinde, bakterisiz ortamlara göre basınç dayanımını arttırdığı ya da kontrol karışımına yakın dayanım gösterdiği gözlemlenmiştir. 3. Besi yerinin kapsüllendiği %30 GDA içeren karışım kontrol karışımına göre basınç dayanımını %35 arttırarak en iyi performansı gösterirken, %28 oranında kontrole göre basınç dayanım artışı sağlayan, 4. Besi yeri kapsüllenmiş %20 GDA içeren karışım kayda değer bir basınç dayanım artışı sağlamıştır.

Tablo 4.3. 7 günlük basınç dayanımları (MPa)

Karışım Türü	Kontrol Bakterisiz	1. Besi Yeri TSB Ortamı	2. Besi Yeri MLB Ortamı	3. Besi Yeri Üre - Kalsiyum Fosfat Ortamı	4. Besi Yeri Üre - CaCl ₂ Ortamı
100 GDA	28,9	9,5	17,5	22,1	-
100 P	24,2	20,6	24,3	29,8	-
70 GDA	29,9	17,7	28,3	31,4	-
70 P	25,3	26,1	29,4	29,8	-
30 GDA	30,8	29,4	32,4	40	-
30 P	30,6	33,9	31,3	36,2	-
20 GDA	36,6	29,1	37,3	37,3	40,1
20 P	35,4	31	37,2	37,2	38,3
10 GDA	35,9	35	37,9	37,9	38,3
10 P	38	35,5	40,7	40,7	42,5
100 KT	36,5	-	-	-	-

Tablo 4.4. 7 günlük bağıl basınç dayanımı oranları (%)

Karışım Türü	Kontrol Bakterisiz	1. Besi Yeri TSB Ortamı	2. Besi Yeri MLB Ortamı	3. Besi Yeri Üre - Kalsiyum Fosfat Ortamı	4. Besi Yeri Üre - CaCl ₂ Ortamı
100 GDA	100	38	70	81	-
100 P	100	85	100	113	-
70 GDA	100	59	95	105	-
70 P	100	103	116	118	-
30 GDA	100	95	105	130	-
30 P	100	111	102	118	-
20 GDA	100	80	102	102	110
20 P	100	88	105	105	108
10 GDA	100	97	115	105	117
10 P	100	93	107	107	112

Tablo 4.3 ve 4.4 incelendiğinde 7 Günlük basınç dayanımları 3 günlükte olduğu gibi 3. besi yeri kapsüllenmiş %30 GDA içeren karışım kontrol karışımına göre basınç dayanımını %30 arttırarak en iyi performansı göstermiştir.

Tablo 4.5. 28 günlük basınç dayanımları (MPa)

Karışım Türü	Kontrol Bakterisiz	1. Besi Yeri TSB Ortamı	2. Besi Yeri MLB Ortamı	3. Besi Yeri Üre - Kalsiyum Fosfat Ortamı	4. Besi Yeri Üre - CaCl ₂ Ortamı
100 GDA	37	13,5	24,4	26,8	-
100 P	30,6	25,5	30,4	31,4	-
70 GDA	40,8	24,7	40,3	43,7	-
70 P	32,8	33,1	35	35,9	-
30 GDA	41,6	35,2	43,4	47	-
30 P	39,1	39,7	44	44	-
20 GDA	43,7	34,6	34,6	42,9	46,7
20 P	39	35,5	35,5	41,4	47,6
10 GDA	41,8	40,6	40,6	43,8	48,9
10 P	41,1	40,1	40,1	45,4	51
100 KT	45,5	-	-	-	-

Tablo 4.6. 28 günlük bağıl basınç dayanımı oranları (%)

Karışım Türü	Kontrol Bakterisiz	1. Besi Yeri TSB Ortamı	2. Besi Yeri MLB Ortamı	3. Besi Yeri Üre - Kalsiyum Fosfat Ortamı	4. Besi Yeri Üre - CaCl ₂ Ortamı
100 GDA	100	37	66	72	-
100 P	100	84	100	103	-
70 GDA	100	61	99	107	-
70 P	100	101	107	109	-
30 GDA	100	85	104	113	-
30 P	100	102	112	112	-
20 GDA	100	79	101	98	107
20 P	100	91	117	106	122
10 GDA	100	97	115	105	117
10 P	100	97	109	111	124

Şekil 4.5 ve 4.6’da 28 günlük basınç dayanımları incelendiğinde %100 GDA kullanımının kontrol karışımına göre basınç dayanımını önemli oranlarda düşürdüğü görülmektedir. Bunun GDA’nın zayıf özellikleri nedeniyle ve beraberinde ortamdaki bakteri yoğunluğunun artmasıyla CaCO₃ oluşumunun arttığı, C-S-H oluşumu için gerekli kalsiyumun ortamda azalmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Pomza ve GDA içeriği azaldıkça kontrol karışımına göre basınç dayanım artışının geliştiği ve en yüksek basınç dayanımının 4. besi yeri kapsüllenmiş %10 ve %20 pomza karışımlarının gösterdiği gözlemlenmiştir.

3, 7 ve 28 günlük basınç dayanımlarına göre besi ortamında bulunan üre ve kalsiyum içeriğinin bakteri aktivitesini arttırmasının mikrobiyolojik olarak tetiklenmiş CaCO₃ birikmesi miktarını arttırdığı düşünülmektedir. 1. Besi ortamı emdirilmiş agregalarda genel olarak kontrol karışımına göre dayanım azalmaları görülmektedir. Bu numunelerde döküm ve perdahlama esnasında hava kabarcığı oluşumunun fazla olması, diğer ortamlara göre bu ortamda daha fazla bulunan şeker temelli bileşenler nedeniyle hava sürüklenmesinin artmasının sonucu olarak beton dayanımının azaldığı düşünülmektedir.

Tablo 4.7. Bakteri kullanımının bakterisiz kontrole göre 28 günlük basınç dayanımı değişiminin literatürle kıyaslaması

	Kullanılan Bakteri	Örnek tipi	Basınç Dayanımı değişimi (%)
Wang vd. (2012)	<i>Bacillus sphaericus</i>	harç	-35
Jonkers vd. (2010)	<i>Bacillus pseudofirmus</i>	harç	-10
Gosh vd. (2005)	<i>Shewanella</i>	harç	25
Gosh vd. (2005)	<i>Escherichia coli</i>	harç	2
Sini Bhaskar v.d., (2017)	<i>Sporosarcina pasteurii</i>	harç	10
Gubta vd. (2018)	<i>Bacillus sphaericus</i>	harç	11
Mondal vd. (2017)	<i>Bacillus subtilis</i>	beton	25
Nain vd. (2019)	<i>Bacillus subtilis</i>	beton	14
Nain vd. (2019)	<i>Bacillus megaterium</i>	beton	23
Siddique vd. (2017)	<i>Alkaliphilic/alkalitolerant</i>	beton	12
Bai ve Varghese (2014)	<i>Bacillus subtilis</i>	beton	15
Chadal vd. (2011)	<i>Sporosarcina</i>	beton	22
Khaliq ve Ehsan (2015)	<i>Bacillus subtilis</i>	beton	12
Ramachandran vd. (2001)	<i>Bacillus pasteurii</i>	beton	18

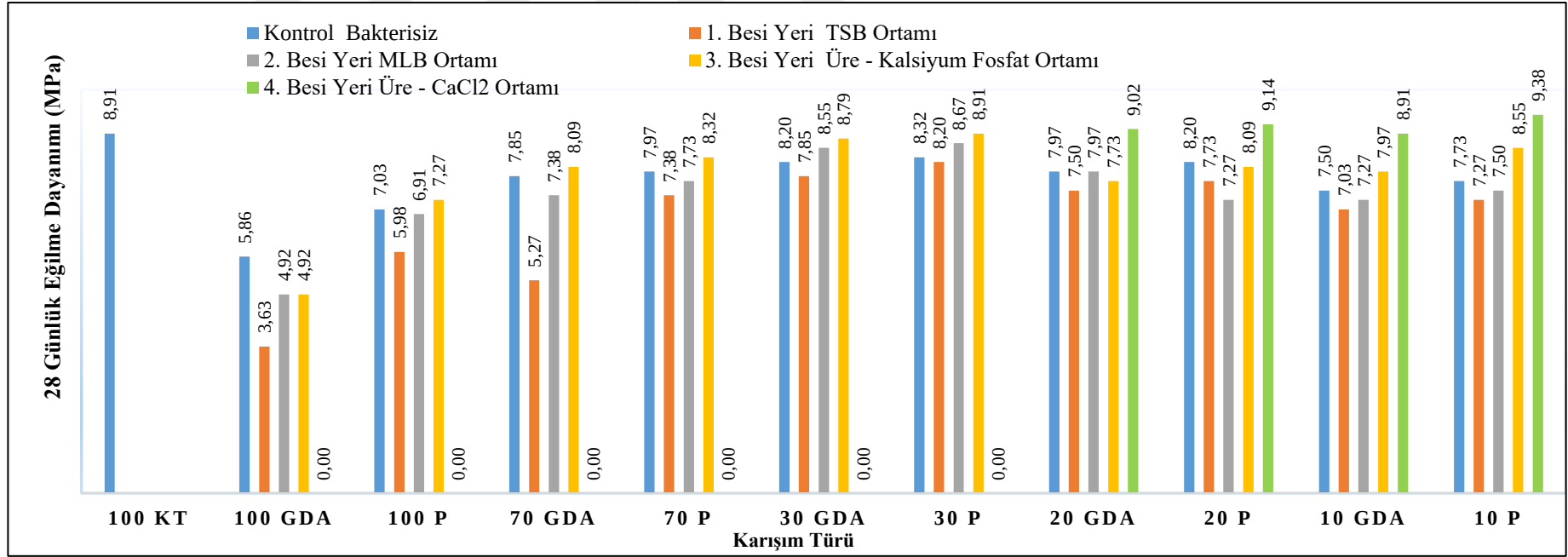
Tablo 4.7’de çeşitli bakteri kullanımının bakterili harç ve betonlardaki basınç dayanımına etkilerini inceleyen literatür çalışmalarında bulunan sonuçlar gösterilmektedir. Tablodan da görüleceği üzere bakteri kullanımı sonucunda harç ve betonların dayanımlarında çeşitli araştırmalar için farklı sonuçlar elde edilmiştir. Literatüre göre en iyi ve en kötü performans gösterenleri inceleyecek olursak,

Bacillus sphaericus bakterisi kullanımı sonucunda Wang vd. (2012) yaptıkları çalışmada basınç dayanımında kontrol karışımına kıyasla %35 mertebesinde bir azalma tespit etmişlerdir. Bunun yanı sıra Gosh vd. (2005) çalışmalarında *Shewanella* bakterisi kullanarak ve başka bir çalışmada Mondal vd. (2017) *Bacillus subtilis* bakterisi kullanarak basınç dayanımlarında %25 mertebesinde bir artış gözlemlemiştir. Literatürde her üç çalışmada elde edilen sonuçları da destekleyici nitelikte benzer sonuçlar bulunmaktadır. Bu tez kapsamında yapılan çalışma sonucunda da bakterili farklı ortamların ilavesi ile basınç dayanımlarında olumlu ve olumsuz değişimler gözlemlenmiştir. Bakterili dördüncü ortamın kullanılması ile basınç dayanımlarında %24'e varan artışlar görülürken, bakterili birinci ortamın ilavesinde ise %67'ye varan oranlarda düşüşler olduğu belirlenmiştir.



4.2. Eğilme Dayanımı Deney Sonuçları

Karışımların 28 günlük eğilme dayanımları Şekil 4.1’de, bağıl eğilme dayanımı oranları Tablo 4.8’de gösterilmiştir.



Şekil 4.1. 28 günlük eğilme dayanımları (MPa)

Şekil 4.1 incelendiğinde bakterili TSB ve MLB ortamlarının kapsüllendiği GDA ve pomza agregalarından oluşturulan karışımların 28 günlük eğilme dayanımları bakterisiz kontrol karışımlarına göre çoğunlukla daha düşük değerler vermiştir. Genellikle üre-kalsiyum fosfar ve üre kalsiyum klorür ortamlarının kapsüllendiği agregalardan oluşturulan karışımlarda ise eğilme dayanımları bakterisiz kontrol karışımlarına göre yüksek değerlere ulaşmıştır.

Tablo 4.8. 28 günlük bağıl eğilme dayanımı oranları (%)

Karışım Türü	Kontrol Bakterisiz	1. Besi Yeri TSB Ortamı	2. Besi Yeri MLB Ortamı	3. Besi Yeri Üre - Kalsiyum Fosfat	4. Besi Yeri Üre - CaCl ₂ Ortamı
100 GDA	100	62	84	84	
100 P	100	85	98	103	
70 GDA	100	67	94	103	
70 P	100	93	97	104	
30 GDA	100	96	104	107	
30 P	100	99	104	107	
20 GDA	100	94	100	97	113
20 P	100	94	89	99	111
10 GDA	100	94	97	106	119
10 P	100	94	97	111	121

Tablo 4.8 incelendiğinde %100 GDA kullanılarak hazırlanan beton karışımlarında bakterili birinci, ikinci ve üçüncü besi ortamlarının kullanılmasıyla eğilme dayanımlarında sırasıyla %38, %16 ve %16'lık düşüşler meydana geldiği gözlemlenmiştir. %100 pomza ile hazırlanan karışımlarda ise bakterili birinci ve ikinci besi ortamlarının kapsüllenmesiyle sırasıyla %15 ve %2'lik düşüşler meydana gelirken, bakterili üçüncü ortamın kapsüllenmesi sonucunda %3 mertebesinde bir artış meydana gelmiştir. %70 GDA ile hazırlanan karışımların eğilme dayanımlarında, bakterili birinci ve ikinci besi ortamlarının kapsüllenmesiyle sırasıyla %33 ve %6'lık düşüşler meydana gelirken, bakterili üçüncü ortamın kapsüllenmesi sonucunda %3 mertebesinde bir artış meydana gelmiştir. %70 pomza ile hazırlanan karışımlarda ise bakterili birinci ve ikinci besi ortamlarının kullanılmasıyla sırasıyla %7 ve %4'lük düşüşler meydana gelirken, bakterili üçüncü ortamın ilavesi sonucunda %4 mertebesinde bir artış meydana gelmiştir. % 30 GDA ile hazırlanan karışımların eğilme dayanımlarında bakterili birinci besi ortamının kapsüllenmesiyle %4'lük bir azalma meydana gelirken, bakterili ikinci ve üçüncü besi ortamlarının ilavesiyle dayanımlarda sırasıyla %4 ve %7'lik bir artış meydana gelmiştir. % 30 pomza ile hazırlanan karışımlarda ise bakterili birinci besi ortamının ilavesiyle %1'lik bir azalma meydana gelirken, bakterili ikinci ve üçüncü besi ortamlarının ilavesiyle dayanımlarda sırasıyla %4 ve %7'lik bir artış meydana gelmiştir. % 20 GDA ile hazırlanan karışımların eğilme

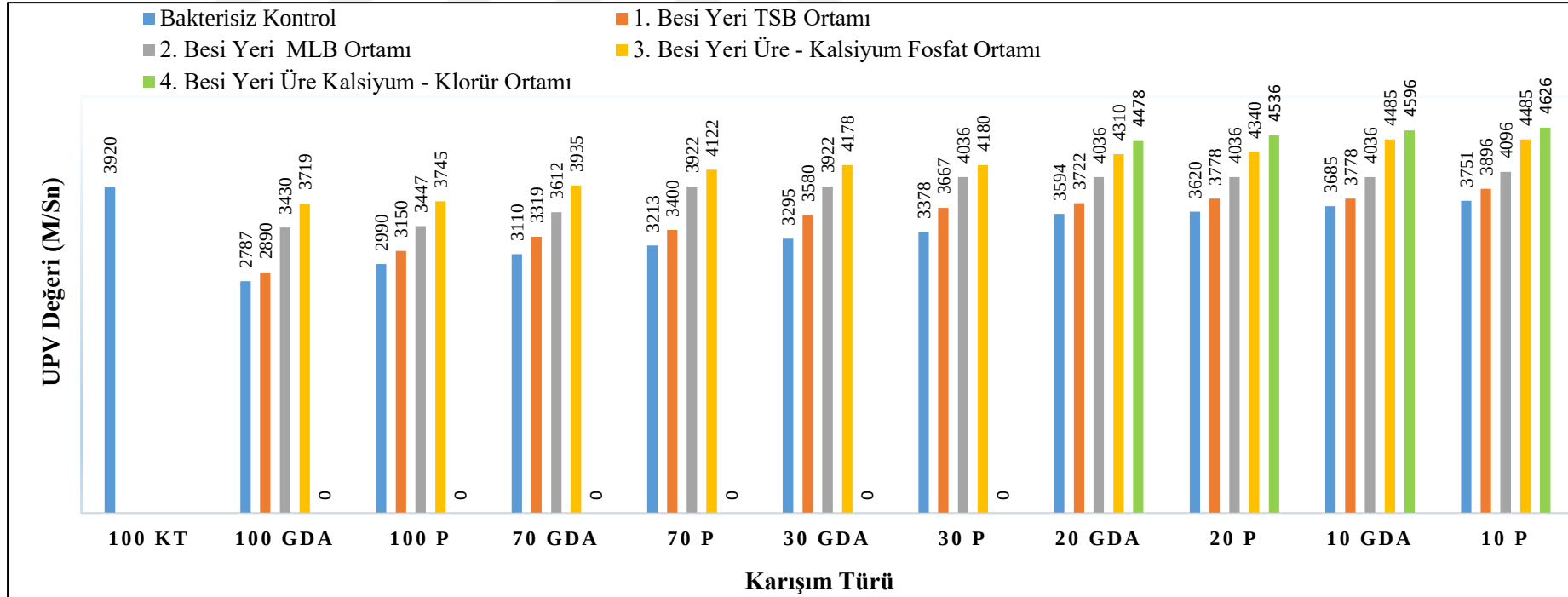
dayanımlarında bakterili birinci ve üçüncü besi ortamların kullanılmasıyla sırasıyla %6 ve %3'lük düşüşler meydana gelirken, dördüncü ortamda yetiştirilen bakterilerin ilavesi sonucunda %13 mertebesinde bir artış meydana gelmiştir. İkinci ortamda yetiştirilen bakterilerin ilavesinde ise dayanımda bir değişiklik oluşmamıştır. %20 pomza kullanılarak hazırlanan beton karışımlarında bakterili birinci, ikinci ve üçüncü besi ortamlarının kullanılmasıyla eğilme dayanımlarında sırasıyla %6, %11 ve %1'lik düşüşler meydana gelirken, bakterili dördüncü besi ortamının ilavesinin sonucunda ise %11 mertebesinde bir artış gözlemlenmiştir. %10 GDA ile hazırlanan karışımların eğilme dayanımlarında bakterili birinci ve ikinci besi ortamlarının kapsüllenmesiyle, sırasıyla %6 ve %3'lük düşüşler meydana gelirken, bakterili üçüncü ve dördüncü besi ortamlarının kapsüllenmesi ile %6 ve %19'luk artışlar gözlemlenmiştir. %10 pomza ile hazırlanan karışımların eğilme dayanımlarında ise bakterili birinci ve ikinci besi ortamlarının ilavesiyle sırasıyla %6 ve %3'lük düşüşler meydana gelirken, bakterili üçüncü ve dördüncü besi ortamının kullanılması ile %11 ve %21'lik artışlar gözlemlenmiştir.

Tüm sonuçlar incelendiğinde bakterili dördüncü besi ortamının betonların eğilme dayanımlarına en yüksek katkıyı yaptığı belirlenmiştir. Bakterili birinci ve ikinci besi ortamı kullanımı eğilme dayanımlarında genel olarak bir düşüş meydana getirirken, bakterili üçüncü besi ortamının ilavesinin ise dayanımlarda genel olarak az miktarda bir artışa neden olduğu gözlemlenmiştir.

Literatürdeki sonuçlar incelendiğinde; Bai ve Varghese (2014) yaptığı çalışmada *Bacillus subtilis* bakterisi kullanımının etkilerini incelediğinde, bakteri kullanımının eğilme dayanımlarında %11 mertebesinde bir artışa neden olduğunu gözlemlemiştir. Benzer şekilde Nain vd. (2019), *Bacillus subtilis* ve *Bacillus megaterium* bakterisi kullanarak yaptıkları araştırmada bakteri kullanımının eğilme dayanımlarını, iki bakteri türü için sırasıyla %18 ve %25 oranlarında arttırdığını belirtmiştir. Gubta vd. (2018) çalışmalarında *Bacillus sphaericus* bakterisi kullanarak benzer incelemeler yapmışlar ve çalışmanın sonucunda bakteri kullanımının eğilme dayanımını %9 oranında arttırdığını belirtmişlerdir. Bu tez kapsamında yapılan çalışmaların sonucunda da bakterili dördüncü besi ortamının kullanılması eğilme dayanımlarında %21'e varan artışlar sağlarken, bakterili birinci besi ortamının kullanıldığı durumlarda ise eğilme dayanımlarında %38'e varan oranlarda azalmalar meydana geldiği gözlenmiştir.

4.3. UPV Ölçümleri Deney Sonuçları

Karışımların besi ortamlarına bağlı olarak 28 günlük UPV ölçümleri Şekil 4.2’de gösterilmiştir.



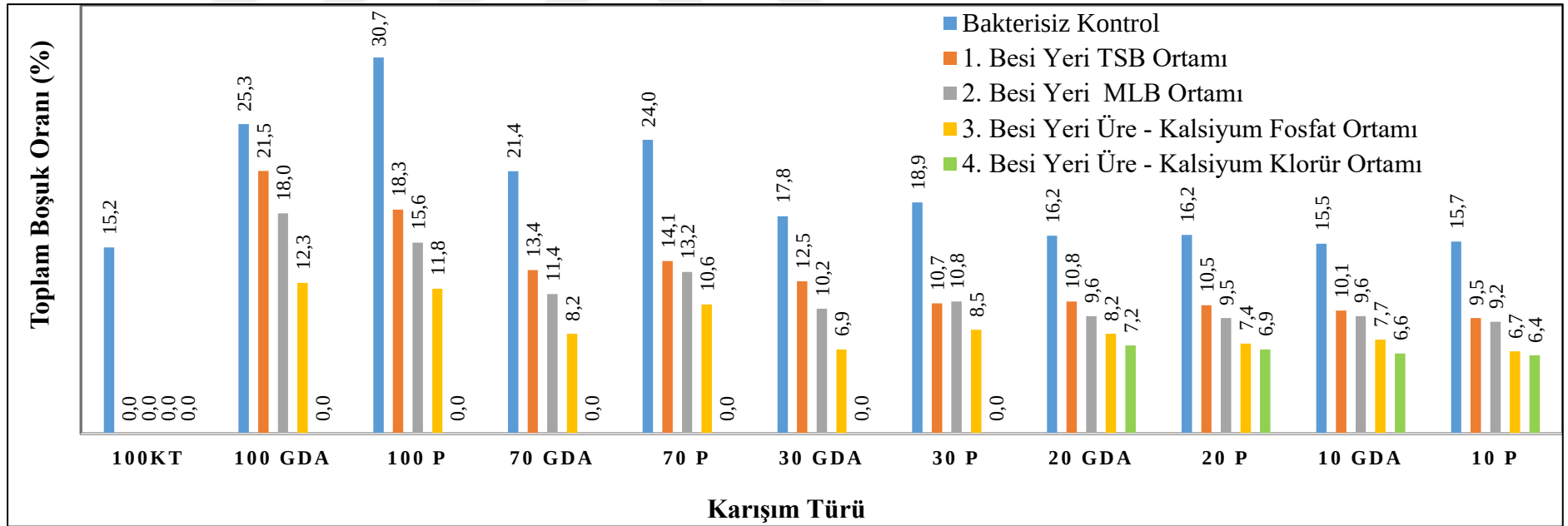
Şekil 4.2. 28 günlük UPV ölçümleri (m/sn)

Şekil 4.2’de UPV ölçümleri incelendiğinde bakterisiz karışımlara göre bakteri ortamlarının kapsüllendiği karışımların UPV değerleri yüksek çıkmıştır. Numunelerin iç yapısında ne kadar az boşluk varsa UPV değerleri o kadar yüksek çıkmaktadır. %70 ve altında GDA ve pomza ikame oranlarında bakterili üre-kalsiyum fosfat ortamı kapsüllenmiş karışımların UPV değerleri %100 kireç taşı karışımına göre daha yüksektir. %30 ve altı ikame oranlarında GDA ve Pomza karışımlarına kapsüllenmiş bakterili üre-kalsiyum klorür besli ortamları en yüksek performansı göstermektedir. Bakterinin aktivitesi neticesinde oluşan CaCO_3 ’ün harçların fiziksel özelliklerini geliştirdiği gözlemlenmektedir. Üre-kalsiyum klorür ortamının kullanıldığı 10P karışımı en yüksek UPV sonucunu vermiştir.

Literatürde de değinildiği gibi Bai ve Varghese (2014) yapmış olduğu çalışmada *Bacillus subtilis* bakterisi ve çimento ağırlığının %10 oranında uçucu kül içeren karışımlarda, bakterisiz kontrol karışımlarına göre UPV değerinin %7 oranında arttığını belirtmiştir. Bu tez kapsamında yapılan çalışmalar sonucunda bakterili karışımlarda kontrol karışımına göre UPV artışı %4 ile %33 arasında değişmektedir.

4.4. Toplam Boşluk Oranı Deney Sonuçları

Karışımların besi ortamlarına bağlı olarak 28 günlük toplam boşluk oranları Şekil 4.3’de gösterilmiştir



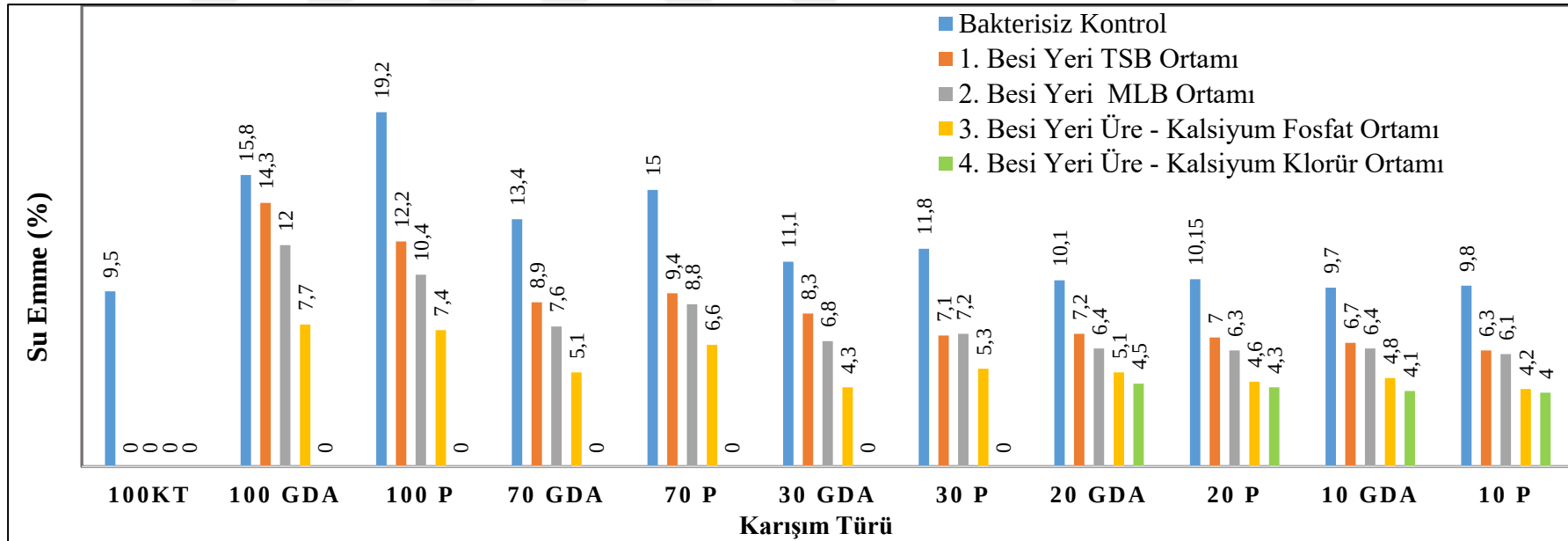
Şekil 4.3. Toplam boşluk oranları (%)

Toplam boşluk oranları incelendiğinde bakteri kullanımının karışımların boşluk oranlarını bakterisiz örneklerle kıyasla azalttığı görülmektedir. Basınç ve eğilme dayanımı yönünden bakterisiz örneklerle göre daha düşük sonuçlar veren bakterili ortamların kullanıldığı %70 ve %100 pomza ve GDA içeren karışımlarda bile boşluk oranları azalmaktadır. Boşluk oranının ve basınç dayanımının beraber azalmasının nedeninin, bakteri aktivitesi nedeniyle oluşan CaCO_3 miktarının özellikle %70 ve %100 agrega ikame oranlarındaki karışımlarda fazlalığı neticesinde, boşluk oranı azalırken ana dayanımı oluşturan C-S-H yerine CaCO_3 oluşması sonucunda oluştuğu düşünülmektedir. Üçüncü bakteri ortamı ve dördüncü bakteri ortamlarının kapsüllendiği karışımlar en iyi performansı göstermiştir.

Siddique vd. (2017) *Alkaliphilic/alkalitolerant* bakterisi kullanımının betonun mekanik ve fiziksel özellikleri üzerindeki etkisini incelediği çalışmada, bakteri kullanımının betonların toplam boşluk oranlarında %50 ile %55 arasında düşüşe neden olduğunu belirtmiştir. Bu tez kapsamında yapılan çalışmaların sonucunda da bakteri kullanımının toplam boşluk miktarı üzerindeki etkisi incelendiğinde farklı ortamlarda üretilen bakterilerin kullanımı sonucunda değişen yüzdelerde düşüşler meydana geldiği gözlemlenmiştir. Bakterili birinci besi ortamı kullanılması sonucunda toplam boşluk miktarlarında %15 ile %40 arasında düşüş olduğu gözlemlenirken, bakterili ikinci besi ortamı kullanılması %29 ile %49, bakterili üçüncü besi ortamı kullanımı sonucunda %51 ile %62 aralığında ve bakterili dördüncü besi ortamının kapsüllemesi sonucunda ise %55 ile %59 arasında toplam boşluk oranlarının azaldığı belirlenmiştir. Bu sonuçlar göz önüne alındığında toplam boşluk miktarını azaltma konusunda en faydalı etkiye neden olan bakterili ortamın üçüncü besi ortamı olduğu görülmektedir.

4.5. Su Emme Oranı Deney Sonuçları

Besi ortamlarına bağlı olarak karışımların su emme oranları Şekil 4.4’de gösterilmiştir.



Şekil 4.4. Su emme oranları (%)

Su emme oranları incelendiğinde bakterisiz karışımların bakterili karışımlara göre su emme oranları kullanılan GDA ve pomza agregalarının tüm karışım oranlarında fazla çıkmıştır. Bakterisiz %100 kireç taşı karışımının su emme oranı %9,5 olarak bulunurken, %70 ve altındaki ikame oranlarındaki bakterili pomza ve GDA karışımlarının su emmeleri bu değerin altında bulunmuş ve bakteri etkisiyle CaCO_3 birikmesinin numunelerin su emme oranlarını düşürdüğü gözlemlenmiştir.

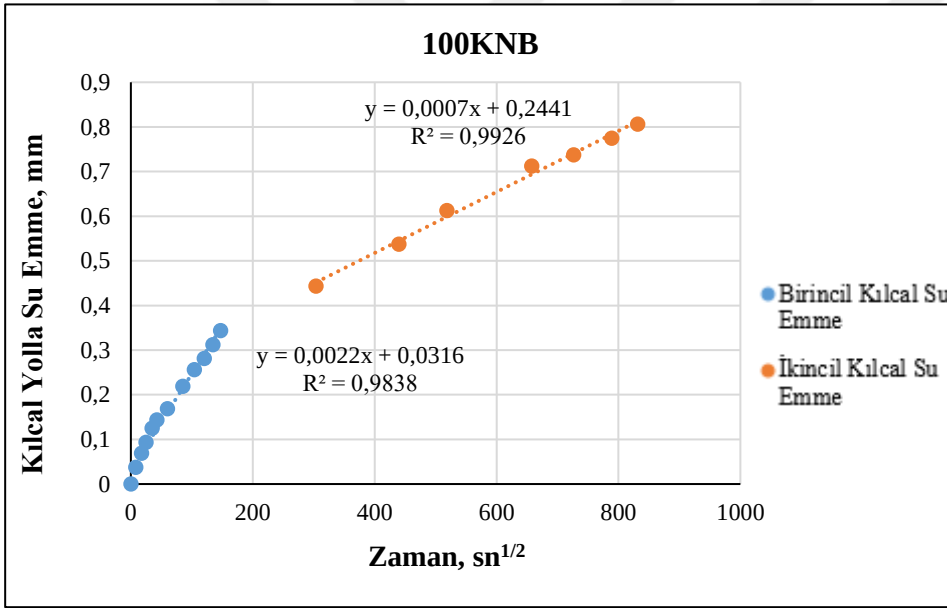
Bakterisiz GDA ve pomza karışımları incelendiğinde pomzanın su emme oranının GDA karışımlarının su emme oranına göre yüksek çıktığı görülmektedir. Bakterili karışımlar incelendiğinde ise %30 ve altı ikame oranlarında pomza karışımlarının su emme oranının çoğunlukla GDA karışımlarına göre daha düşük olduğu görülmektedir. Bu durum pomzanın kapsüllemeye bakteri etkinliği yönünden daha uygun olduğunu göstermektedir. Pomza agregasına kapsüllemeye kullanılması bakterinin yaşamsal etkinliğini GDA agregasına kapsüllemeye göre daha çok geliştirdiği düşünülmektedir.

En iyi performansı %20 ve altı pomza ve GDA ikame oranlarında bakterili üre-kalsiyum klorür ortamı kapsüllenmiş karışımlar sağlamaktadır. Bakterili üre-kalsiyum fosfat ortamı kapsüllenmiş karışımlar da etkili şekilde su emme oranını düşürmektedir.

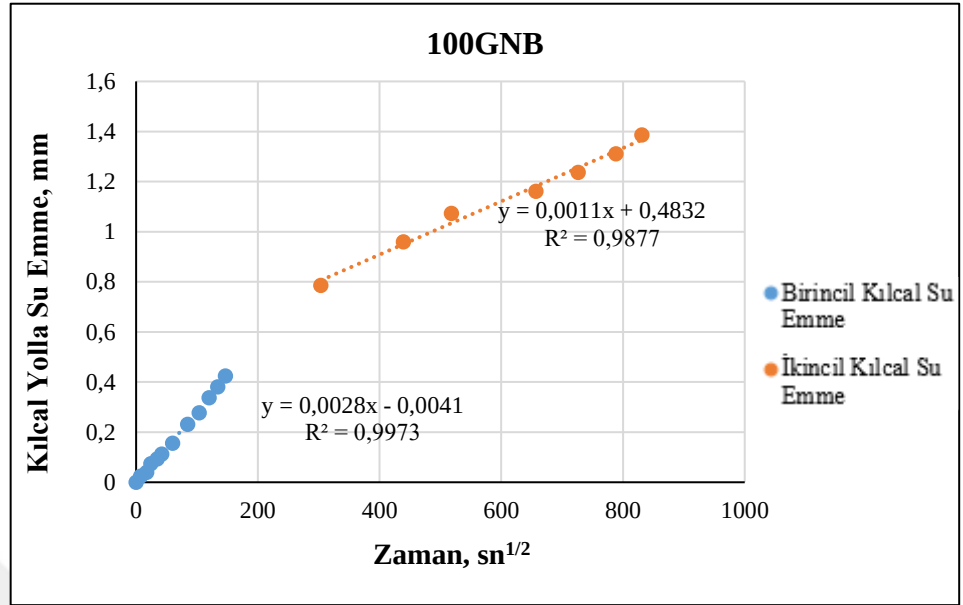
Literatür incelendiğinde, Chadal vd. (2011) yaptığı çalışmada *Sporosarcina* bakterisinin kullanımının su emme değerlerini yaklaşık olarak %75 oranında azalttığını belirtmiştir. Bir başka çalışmada ise Mondal ve Ghosh (2018) *B. Subtilis* bakterisini kullanmış ve kontrol karışımlarına kıyasla su emme değerlerinde %23 ile %27 arasında düşüş meydana geldiğini gözlemlemiştir. Bu tez kapsamında yapılan çalışmaların sonucunda da literatür ile uyumlu olarak bakteri kullanımının su emme değerlerini %10 ile %62 aralığında azalttığı görülmüştür.

4.6. Kılcal Su Emme Oranı Deney Sonuçları

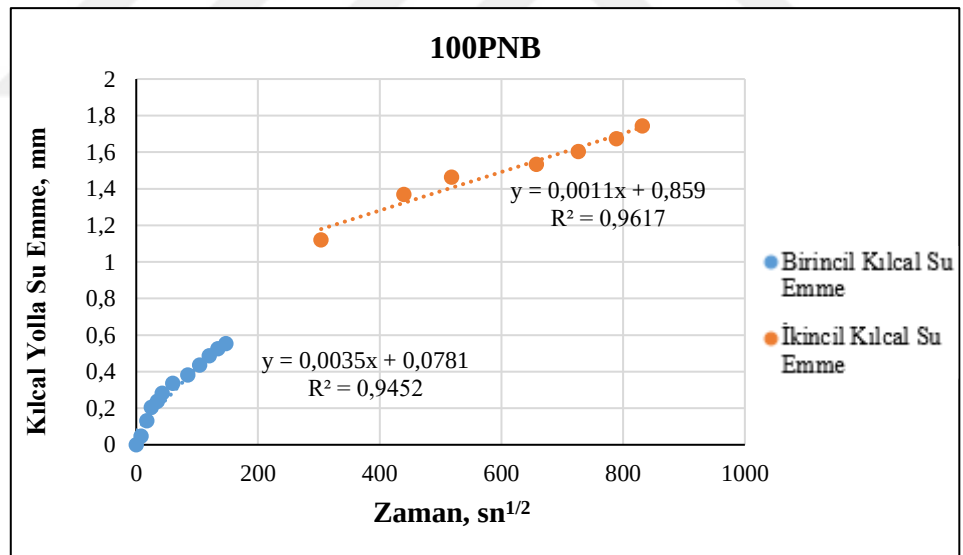
Besi ortamlarına bağlı olarak karışımların kılcal su emme miktarları Şekil 4.5-4.49 arasında gösterilmiştir. Tüm karışımların birincil ve ikincil su emme indisleri Şekil 4.50-51’de gösterilmiştir. Gösterimde baştaki sayı agrega ikame oranını, sonrasındaki harf agrega türünü ve sondaki harf veya harfler içerisinde kapsüllenen bakterinin ortamını göstermektedir. Geri dönüşüm agregası (G), pomza (P), kireç taşı (K), bakterisiz ortam (NB), TSB ortamı (T), MLB ortamı (M), üre-kalsiyum fosfat ortamını (U), üre-kalsiyum klorür ortamı (UC) olarak simgelenmiştir. Örneğin; 100GNB, %100 oranında geri dönüşüm agregası bulunan bakterisiz ortamı ifade etmektedir.



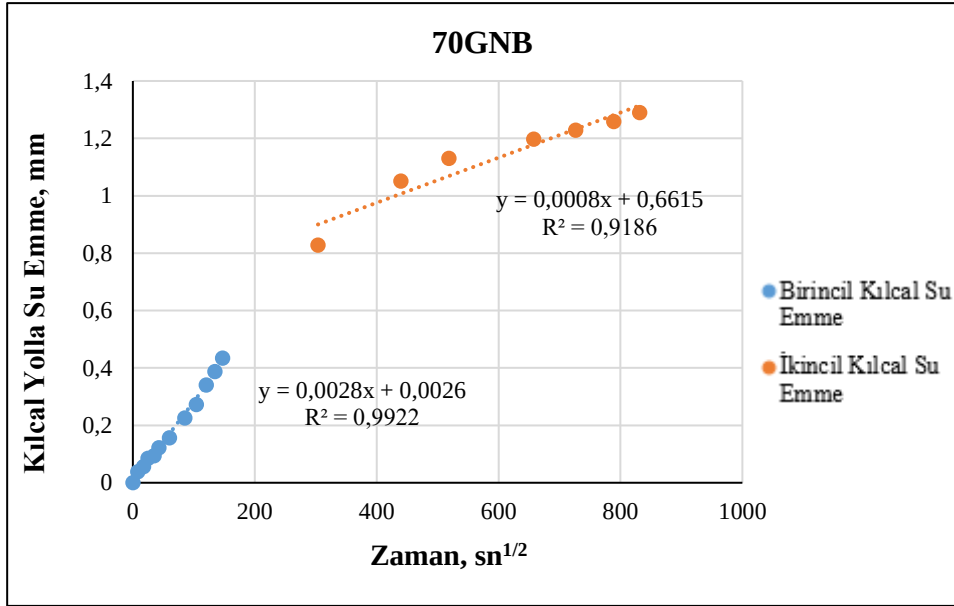
Şekil 4.5. 100KNB’ye ait kılcal su emme oranları



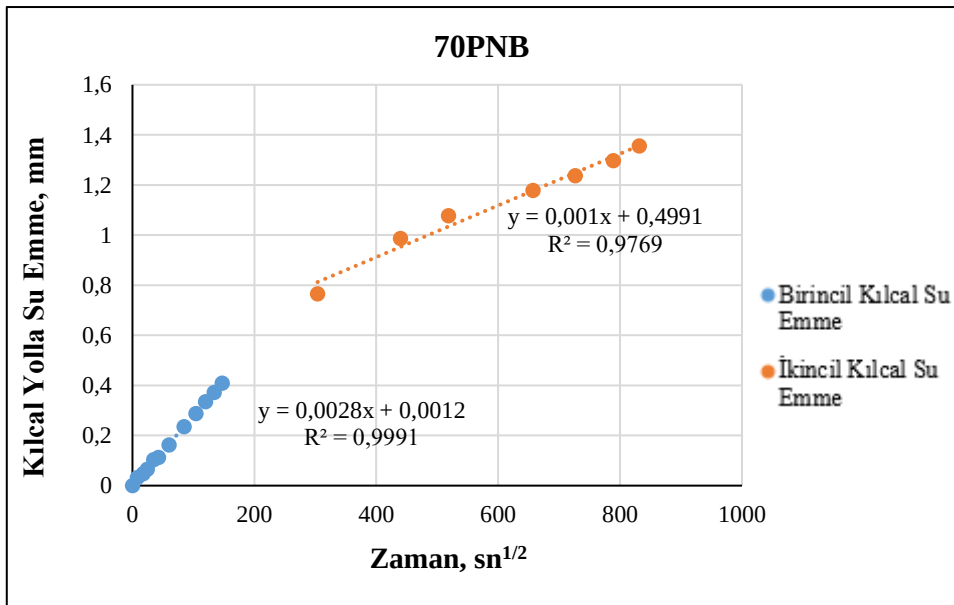
Şekil 4.6. 100GNB'ye ait kılcal su emme oranları



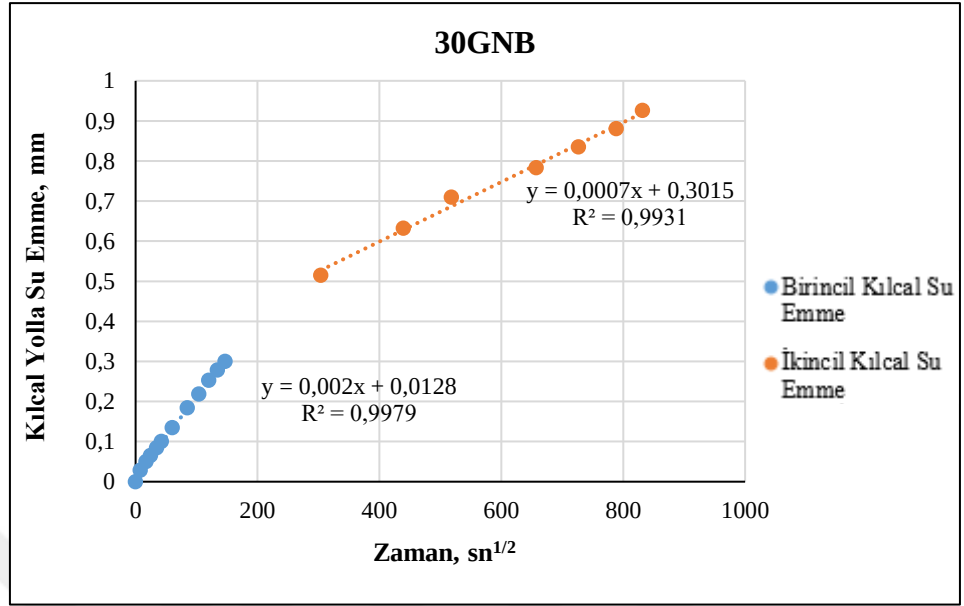
Şekil 4.7. 100PNB'ye ait kılcal su emme oranları



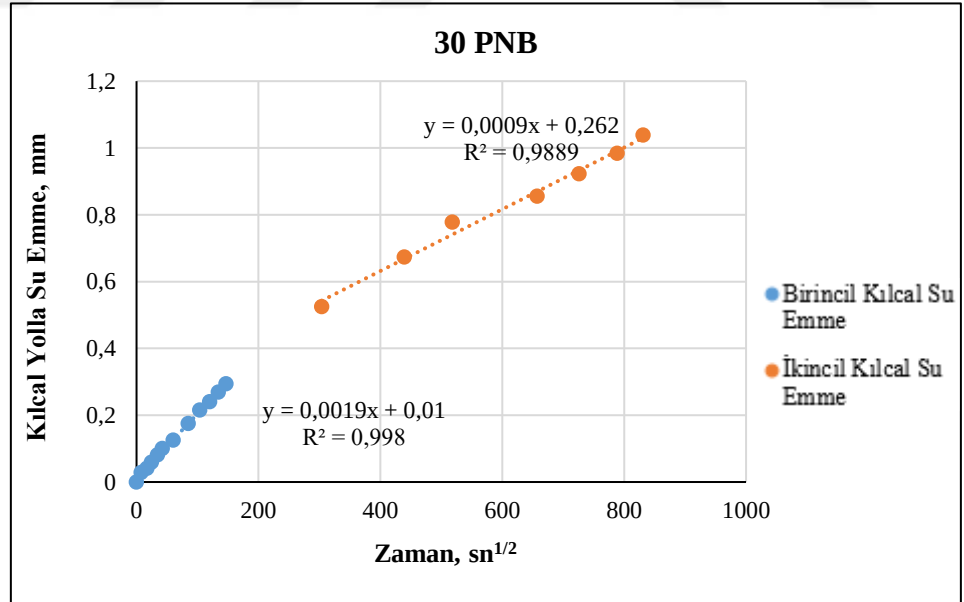
Şekil 4.8. 70GNB'ye ait kılcal su emme oranları



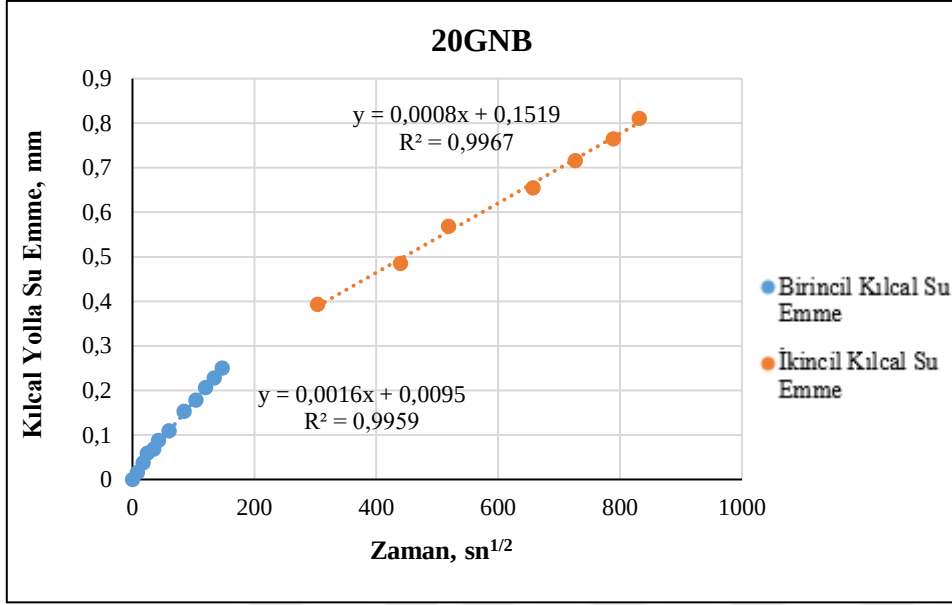
Şekil 4.9. 70PNB'ye ait kılcal su emme oranları



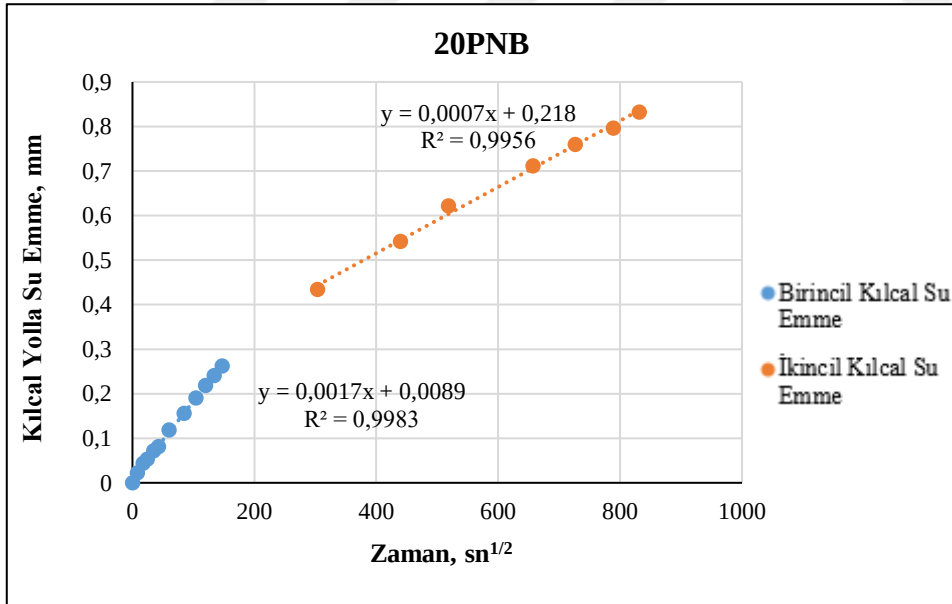
Şekil 4.10. 30GNB'ye ait kılcal su emme oranları



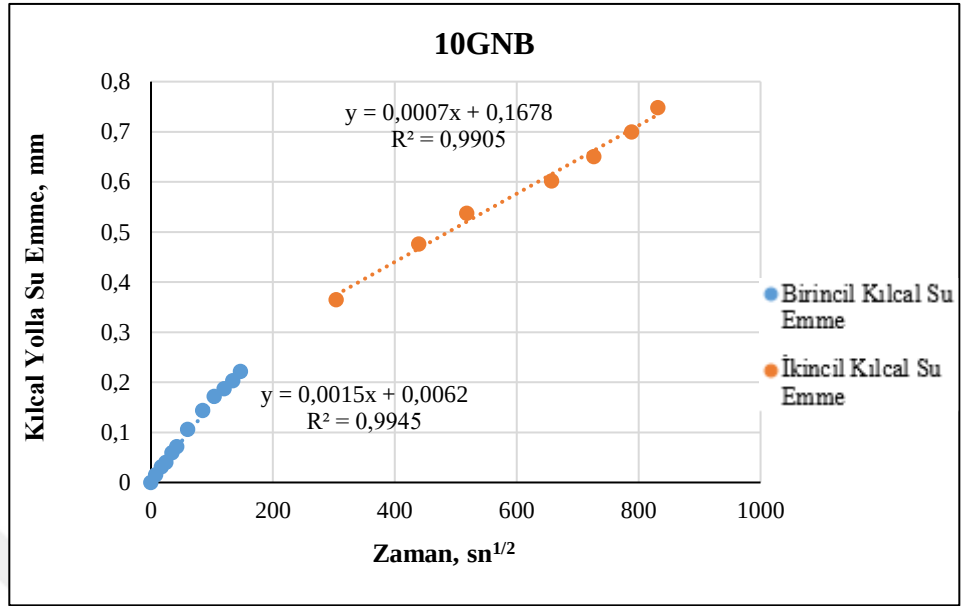
Şekil 4.11. 30PNB'ye ait kılcal su emme oranları



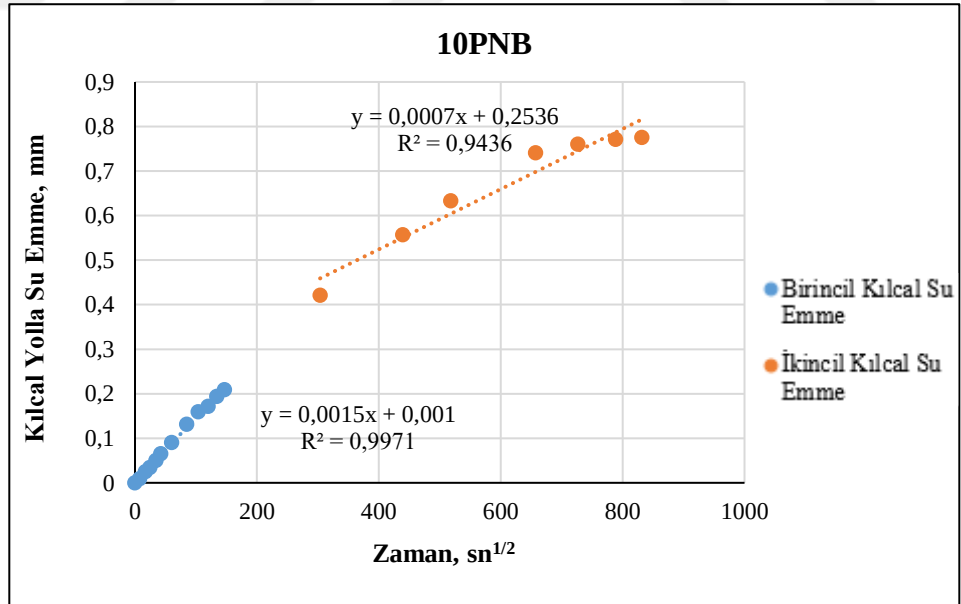
Şekil 4.12. 20GNB'ye ait kılcal su emme oranları



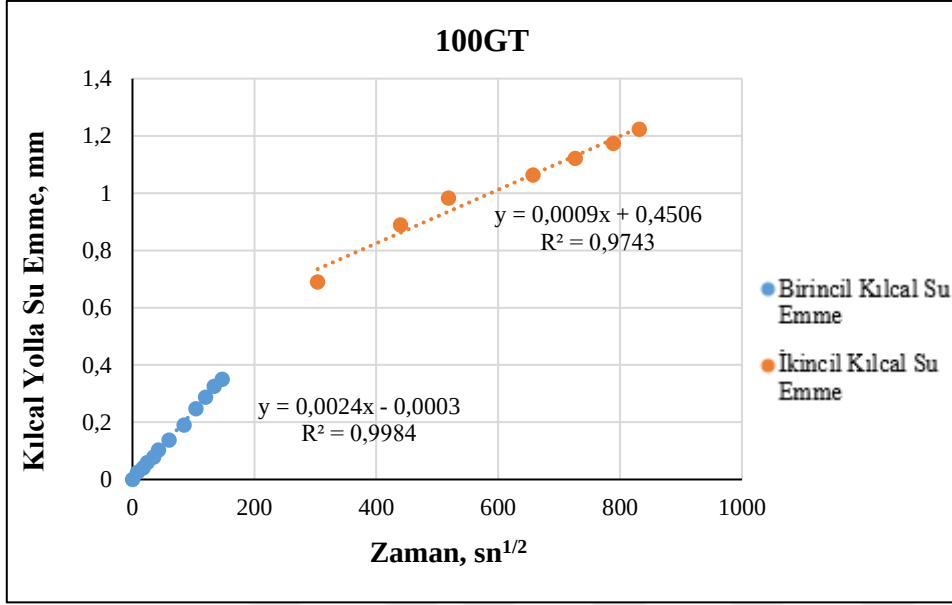
Şekil 4.13. 20PNB'ye ait kılcal su emme oranları



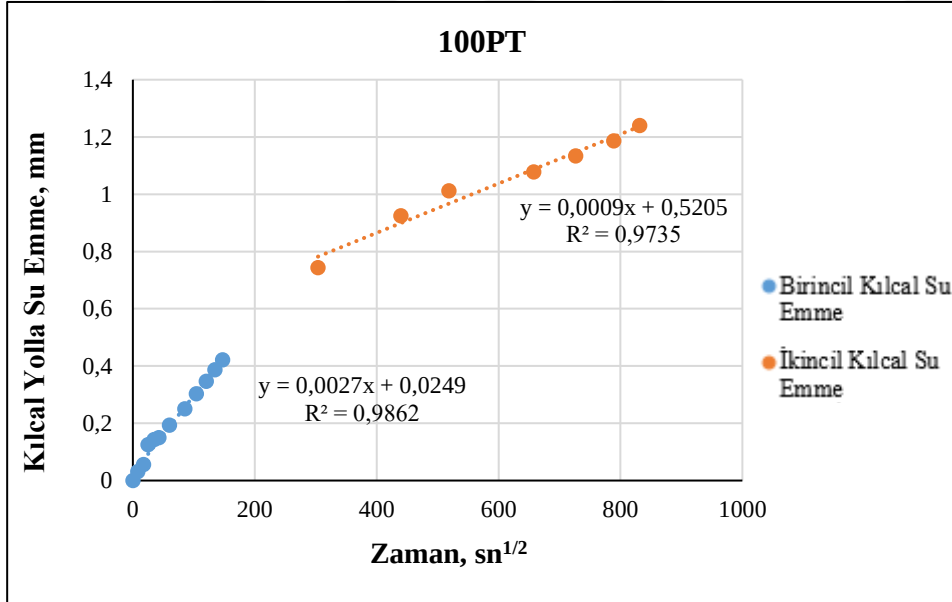
Şekil 4.14. 10GNB'ye ait kılcal su emme oranları



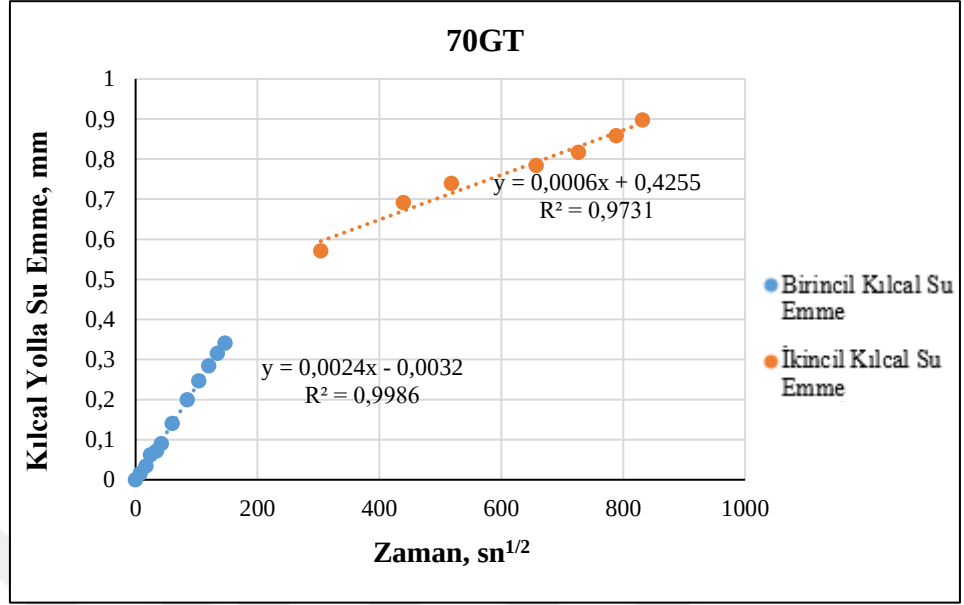
Şekil 4.15. 10PNB'ye ait kılcal su emme oranları



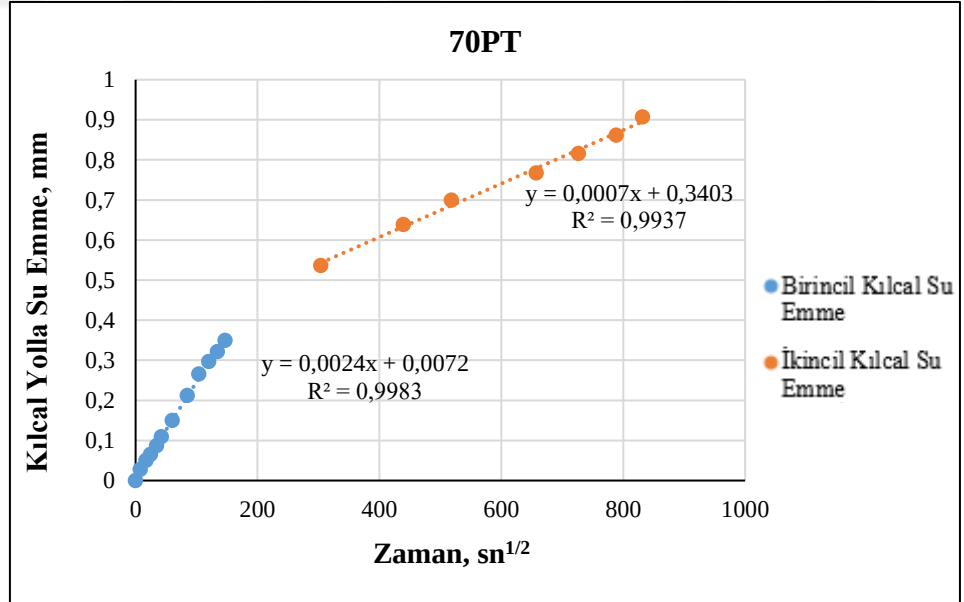
Şekil 4.16. 100GT'ye ait kılcal su emme oranları



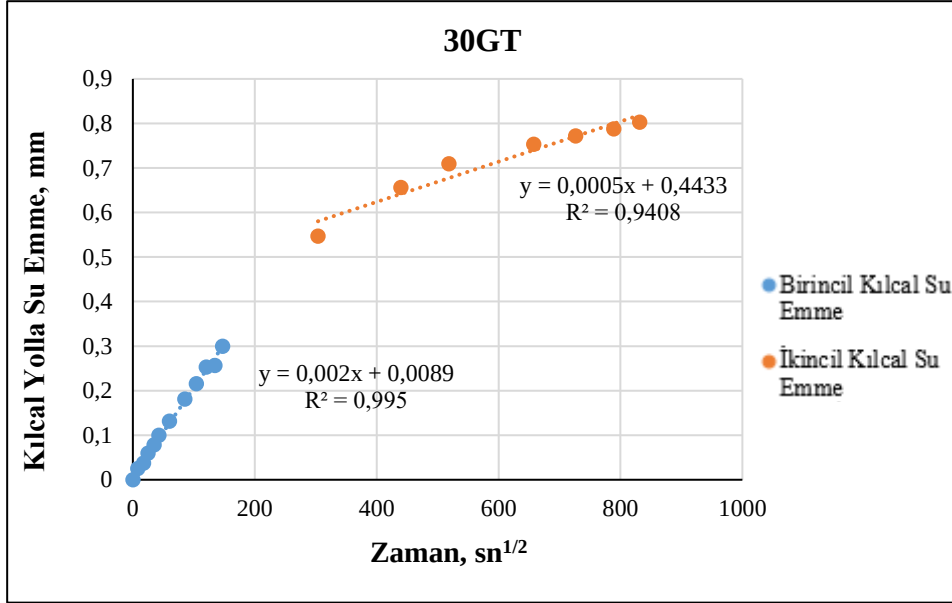
Şekil 4.17. 100PT'ye ait kılcal su emme oranları



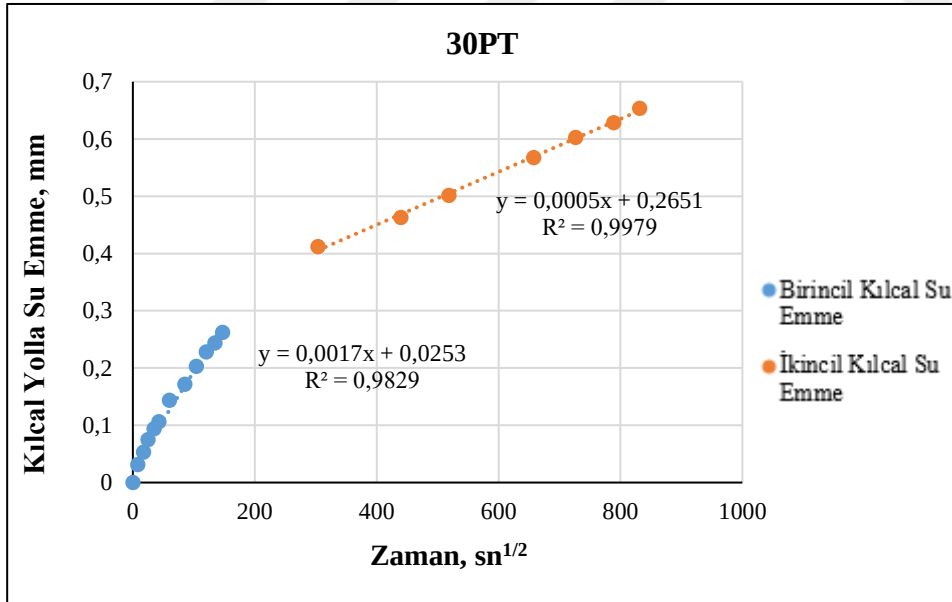
Şekil 4.18. 70GT'ye ait kılcal su emme oranları



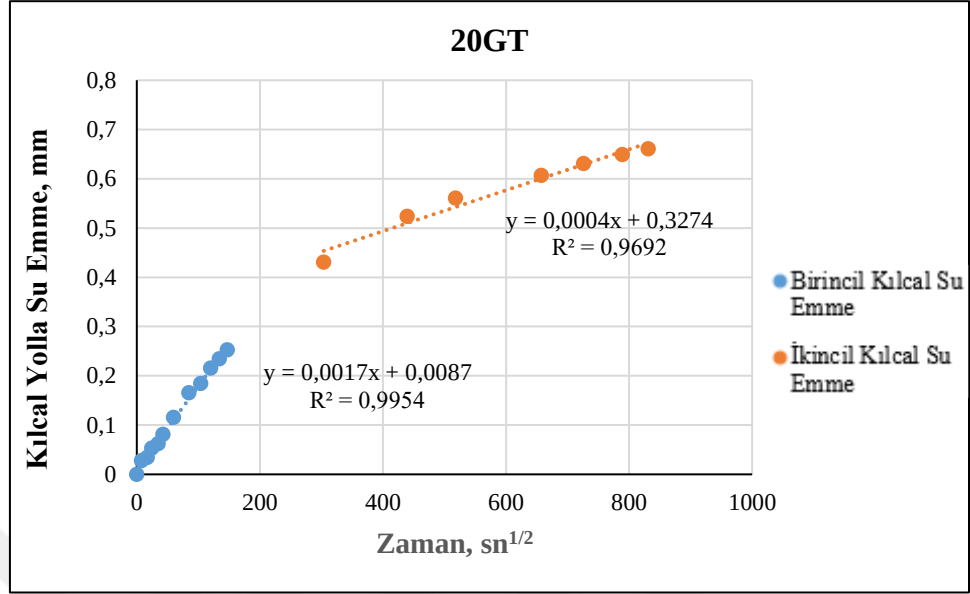
Şekil 4.19. 70PT'ye ait kılcal su emme oranları



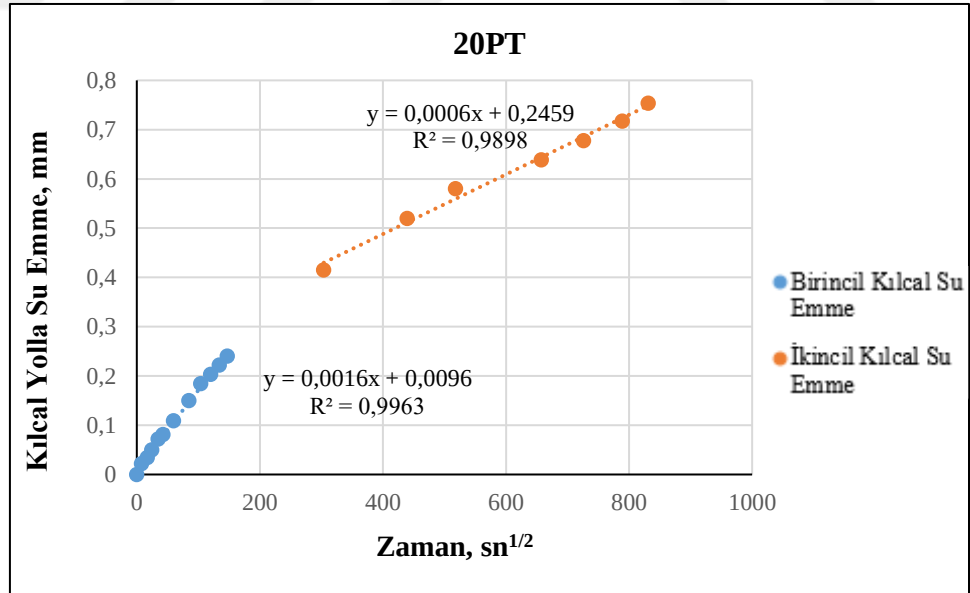
Şekil 4.20. 30GT'ye ait kılcal su emme oranları



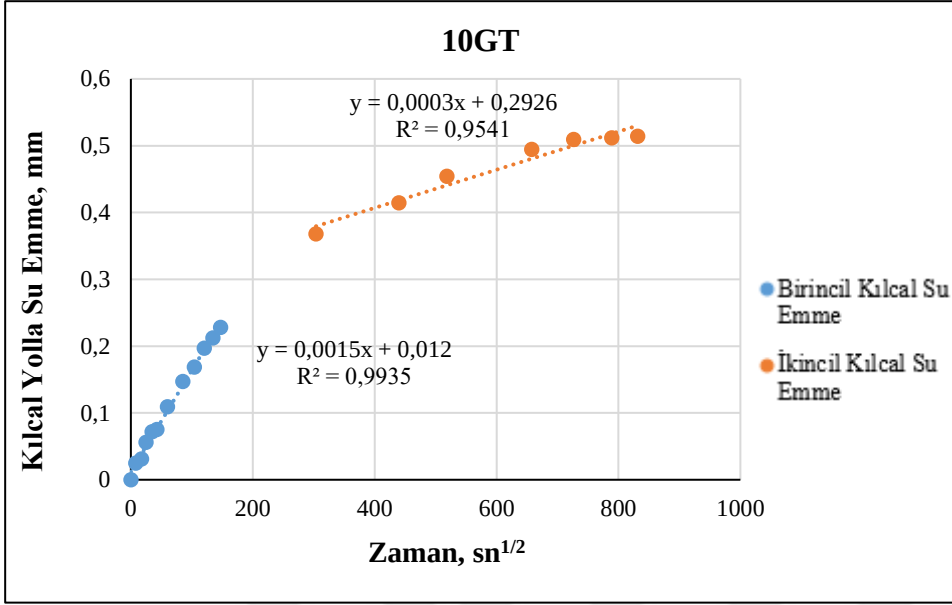
Şekil 4.21. 30PT'ye ait kılcal su emme oranları



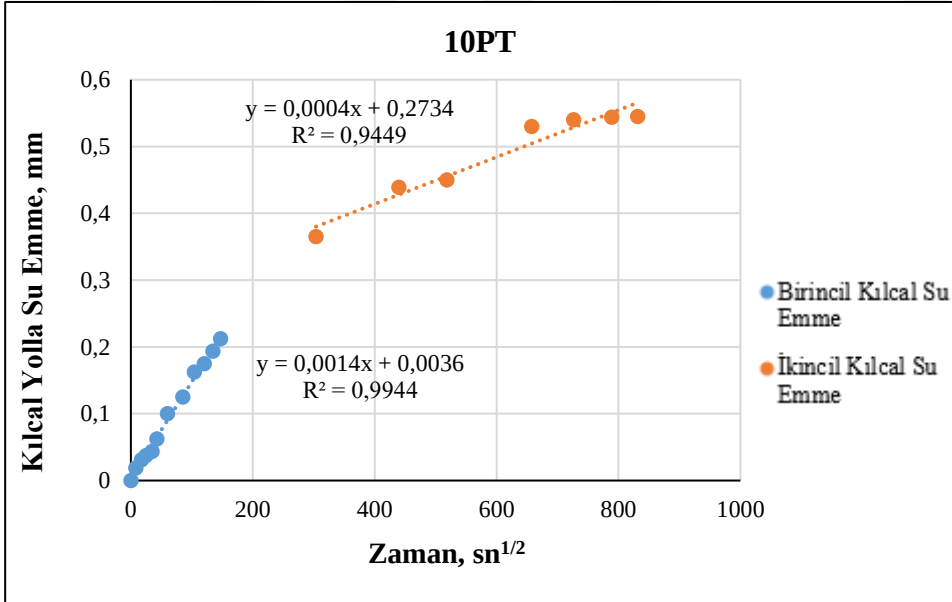
Şekil 4.22. 20GT'ye ait kılcal su emme oranları



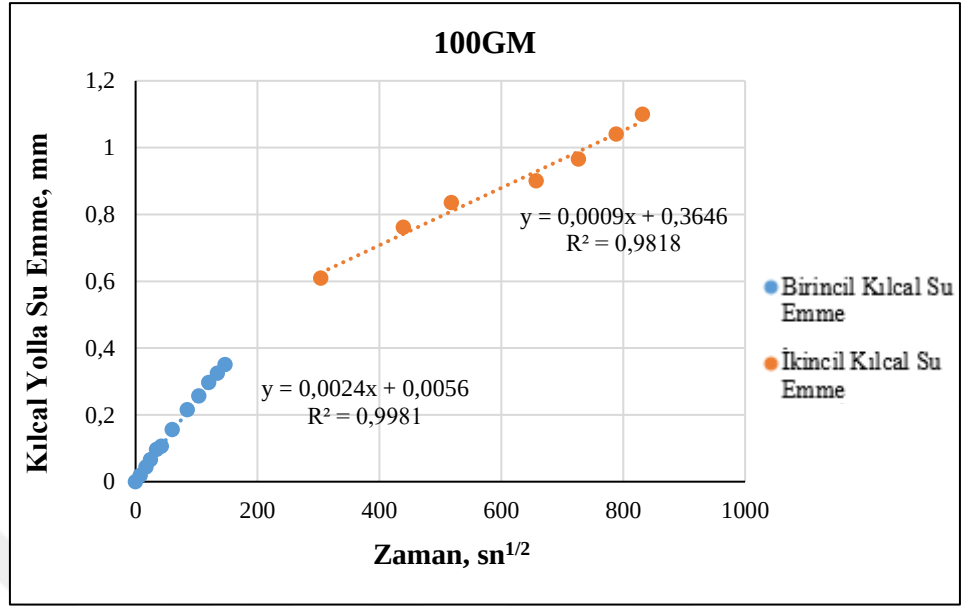
Şekil 4.23. 20PT'ye ait kılcal su emme oranları



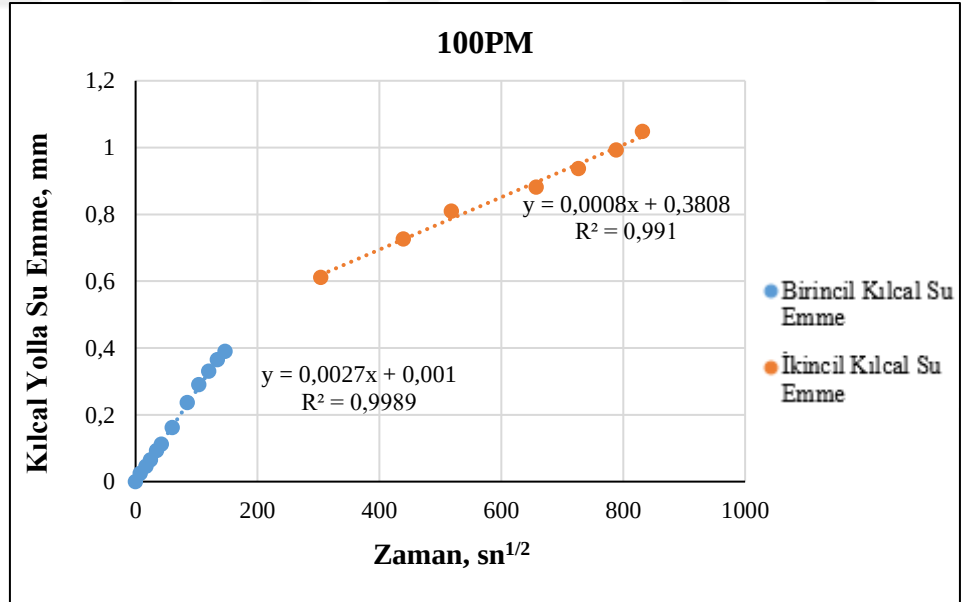
Şekil 4.24. 10GT'ye ait kılcal su emme oranları



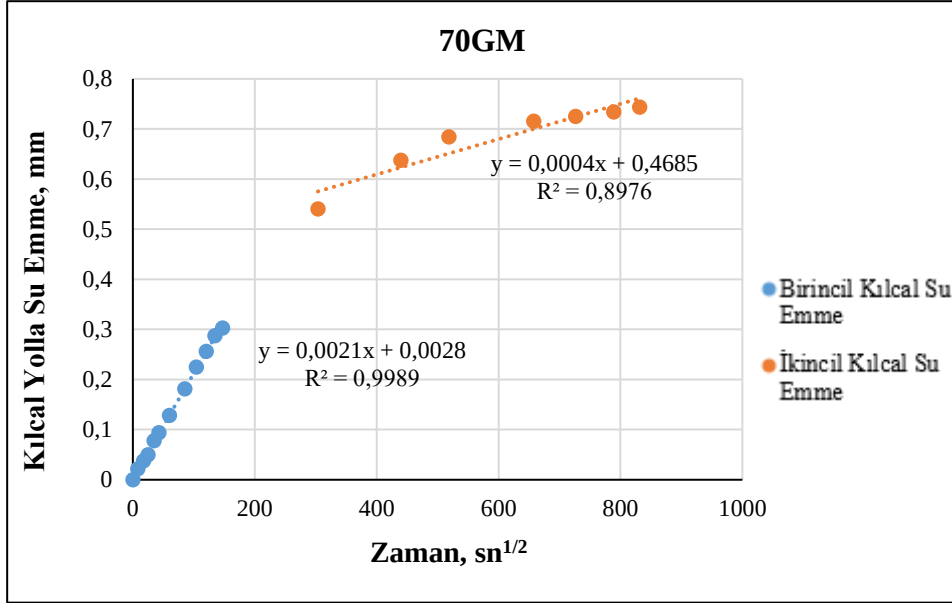
Şekil 4.25. 10PT'ye ait kılcal su emme oranları



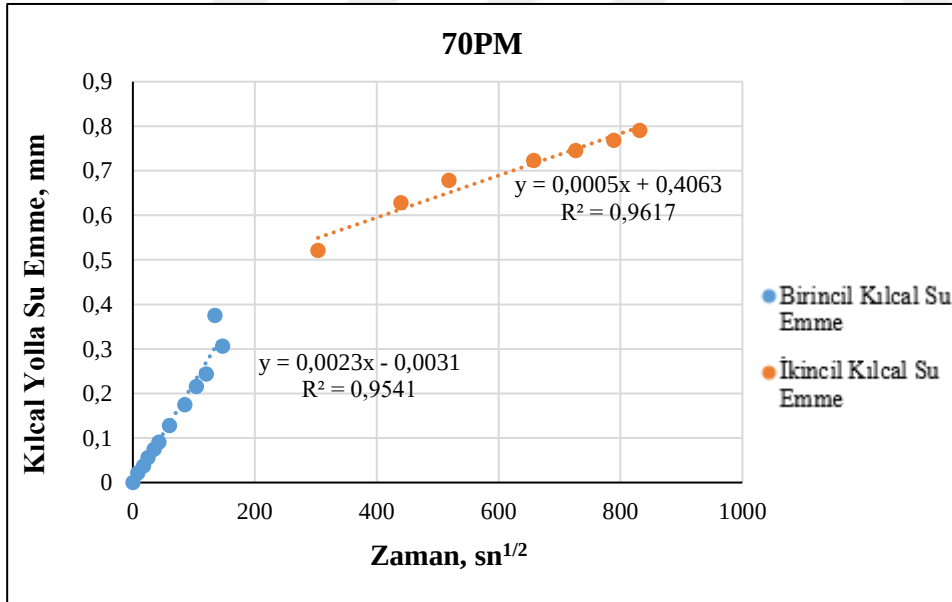
Şekil 4.26. 100GM'ye ait kılcal su emme oranları



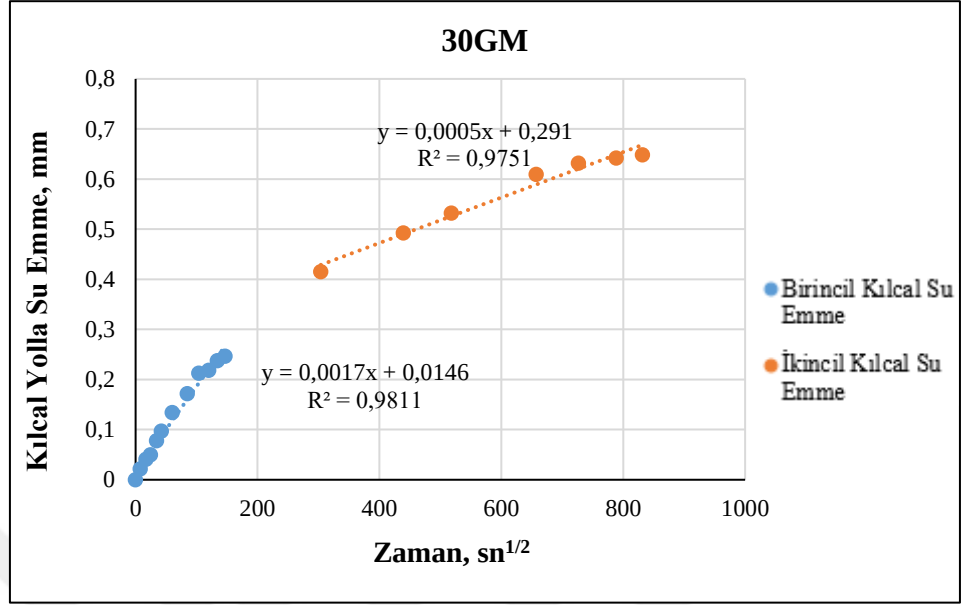
Şekil 4.27. 100PM'ye ait kılcal su emme oranları



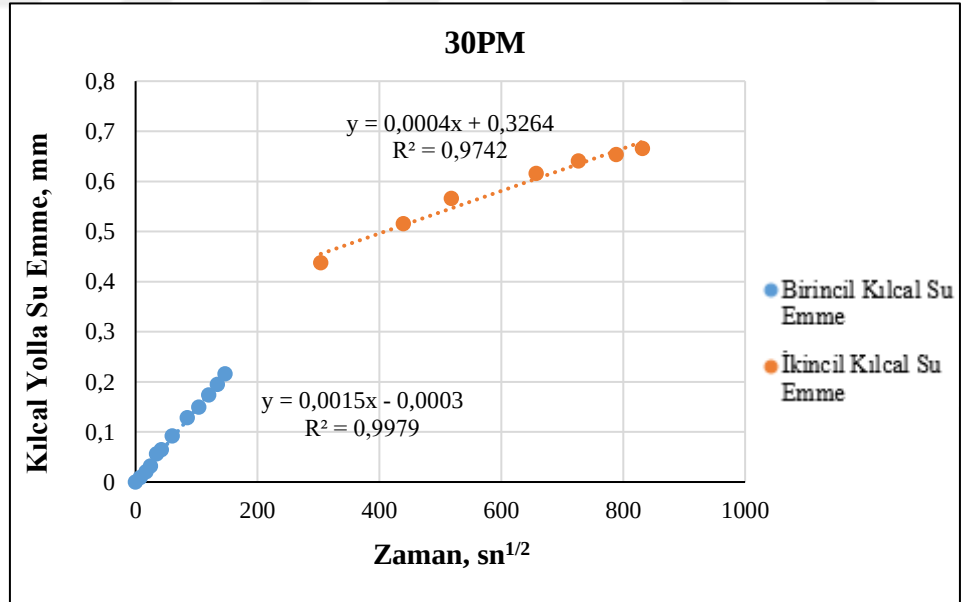
Şekil 4.28. 70GM'ye ait kılcal su emme oranları



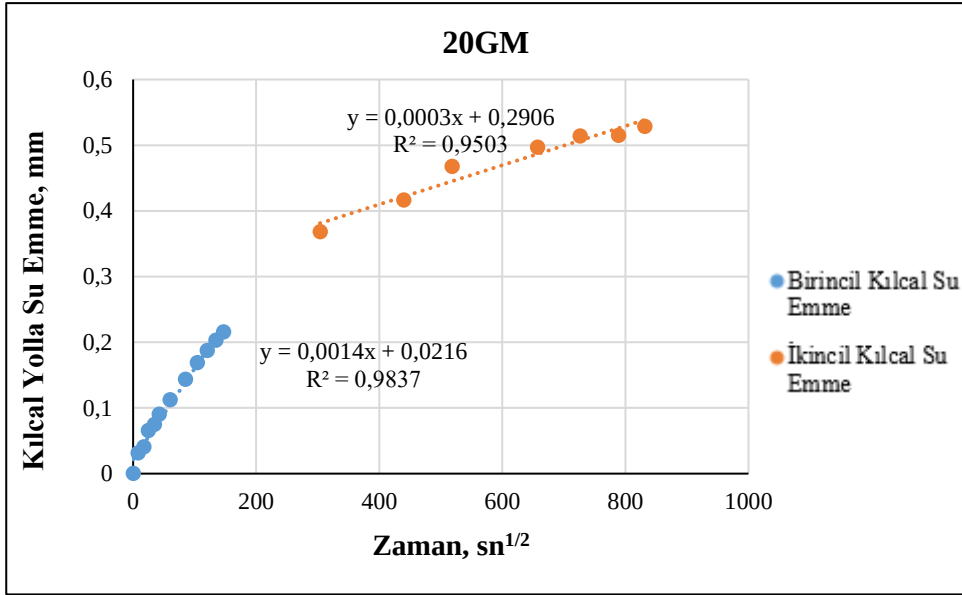
Şekil 4.29. 70PM'ye ait kılcal su emme oranları



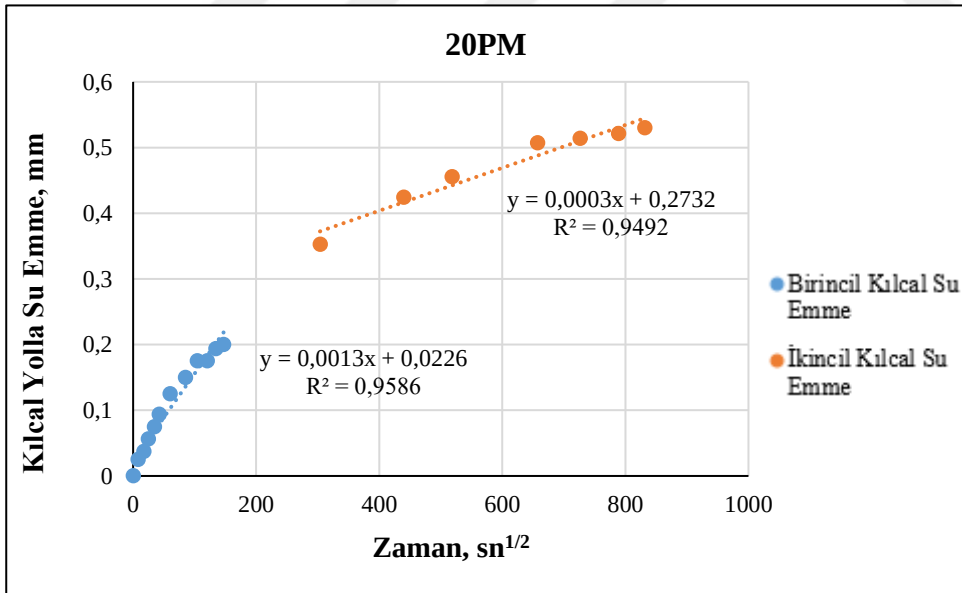
Şekil 4.30. 30GM'ye ait kılcal su emme oranları



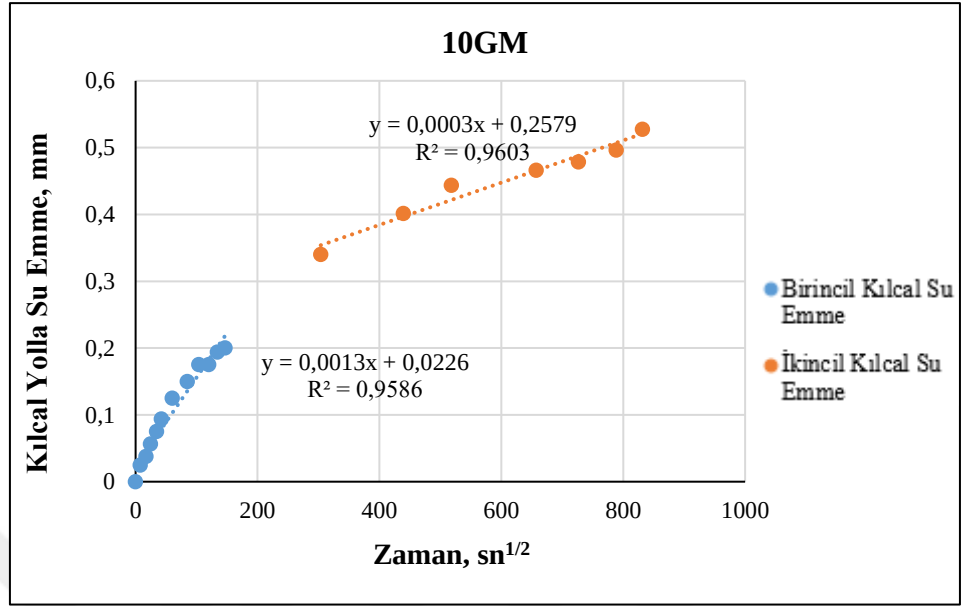
Şekil 4.31. 30PM'ye ait kılcal su emme oranları



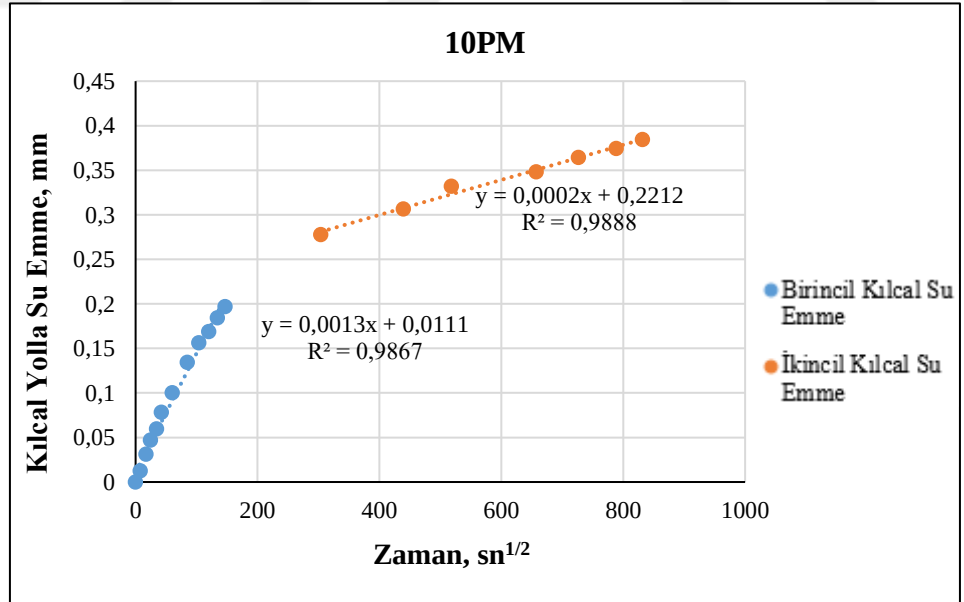
Şekil 4.32. 20GM'ye ait kılcal su emme oranları



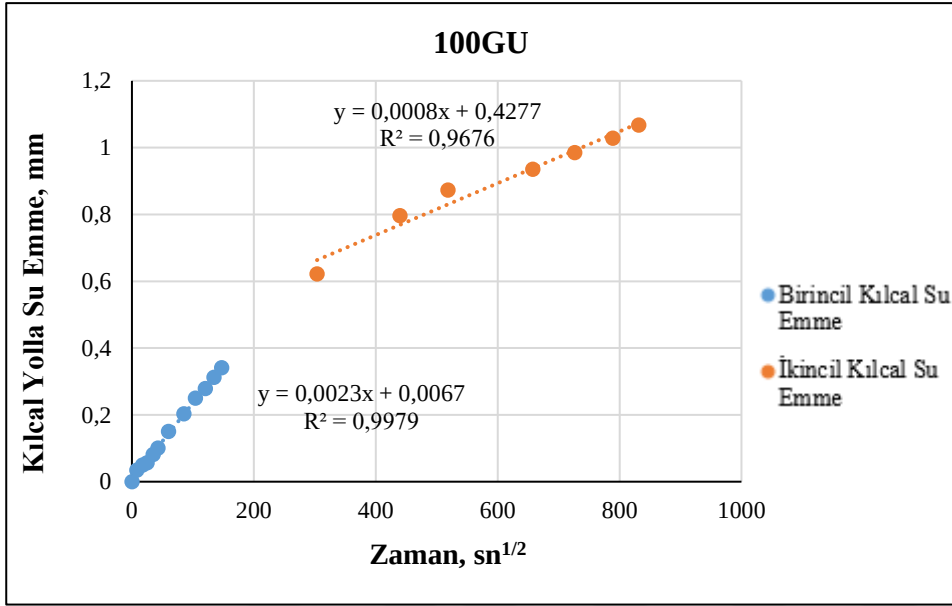
Şekil 4.33. 20PM'ye ait kılcal su emme oranları



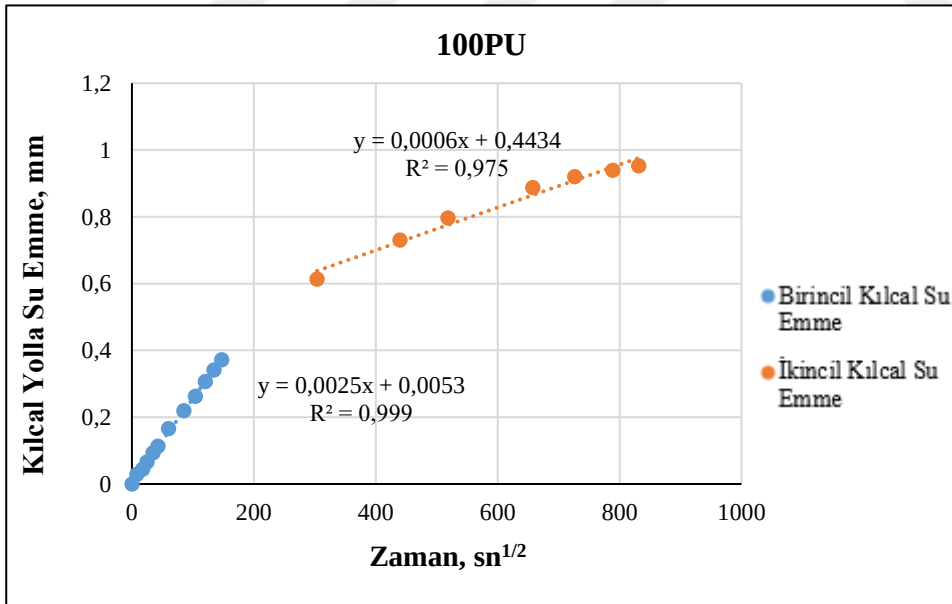
Şekil 4.34. 10GM'ye ait kılcal su emme oranları



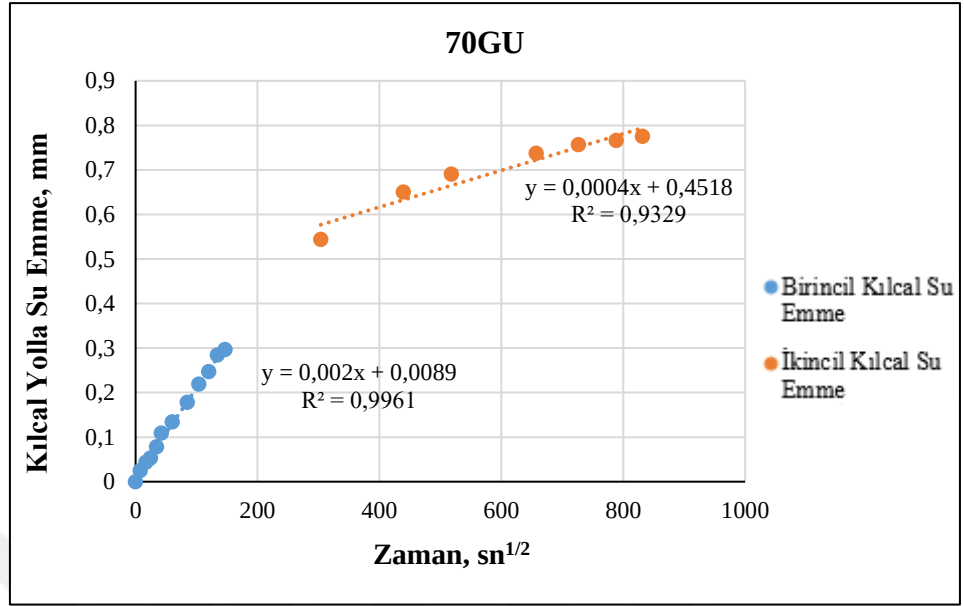
Şekil 4.35. 10PM'ye ait kılcal su emme oranları



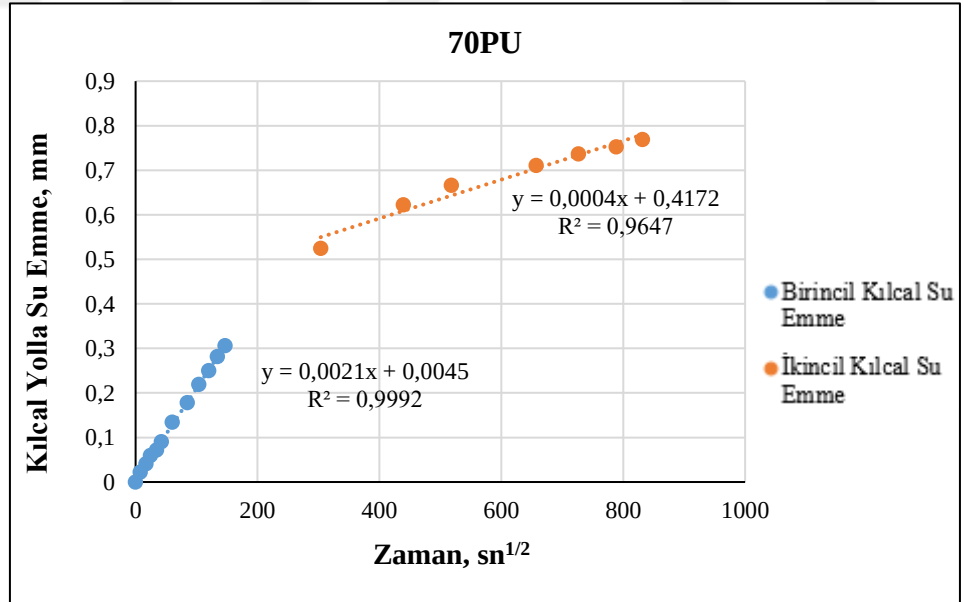
Şekil 4.36. 100GU'ya ait kılcal su emme oranları



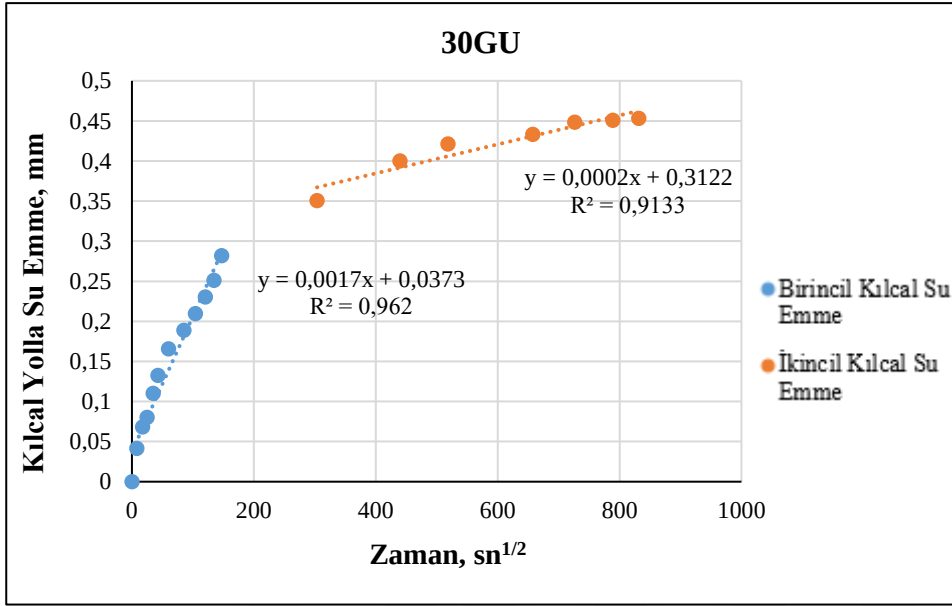
Şekil 4.37. 100PU'ya ait kılcal su emme oranları



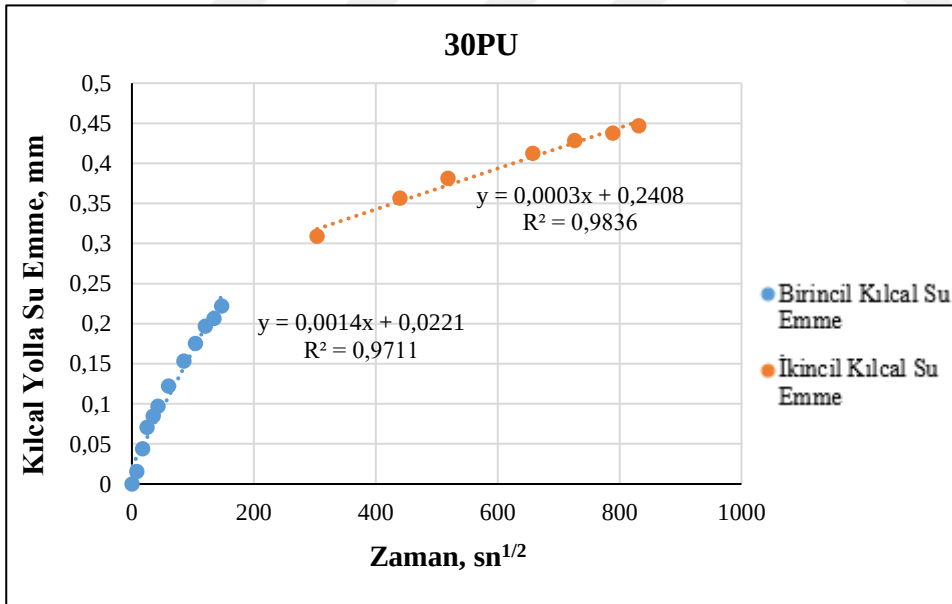
Şekil 4.38. 70GU'ya ait kılcal su emme oranları



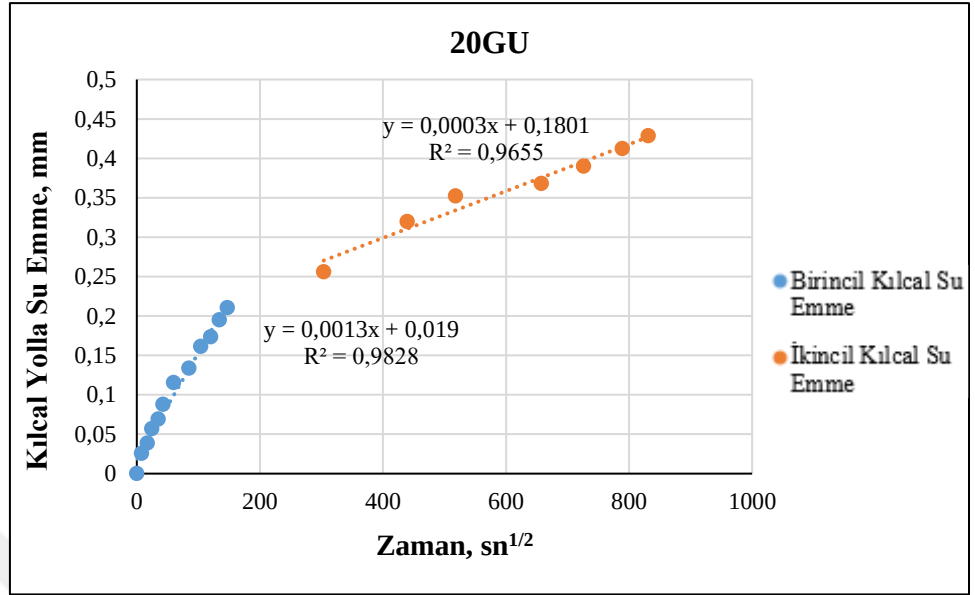
Şekil 4.39. 70PU'ya ait kılcal su emme oranları



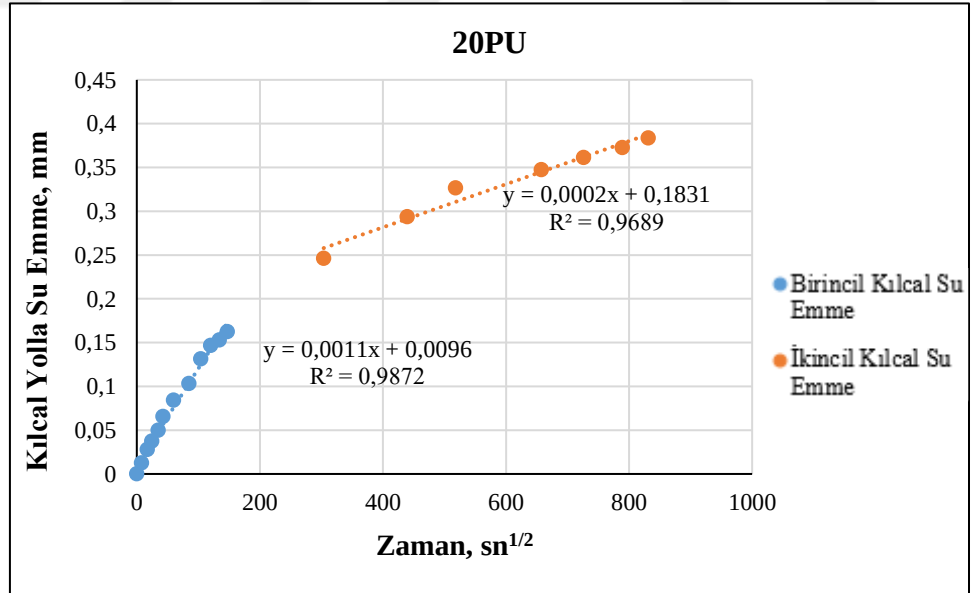
Şekil 4.40. 30GU'ya ait kılcal su emme oranları



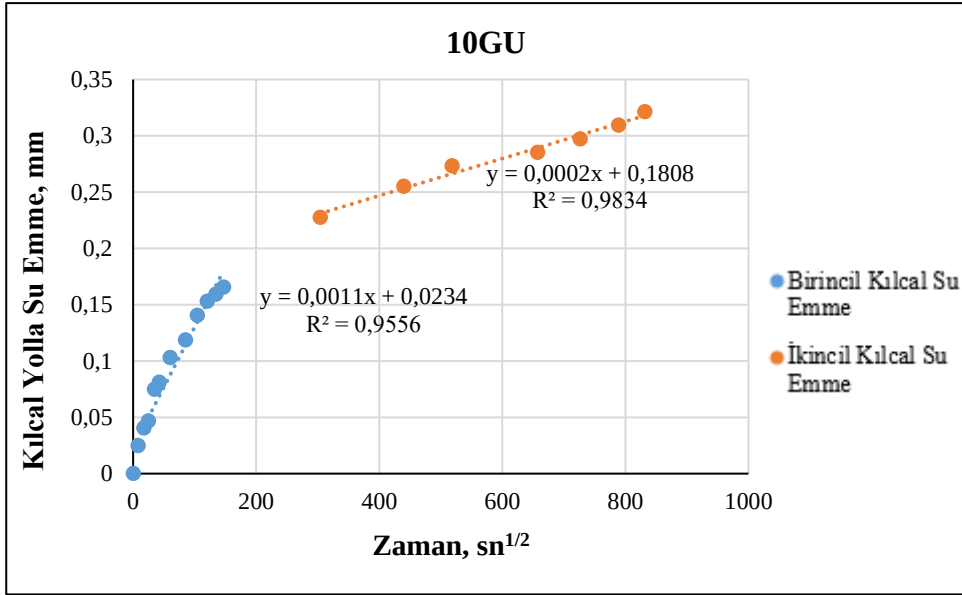
Şekil 4.41. 30PU'ya ait kılcal su emme oranları



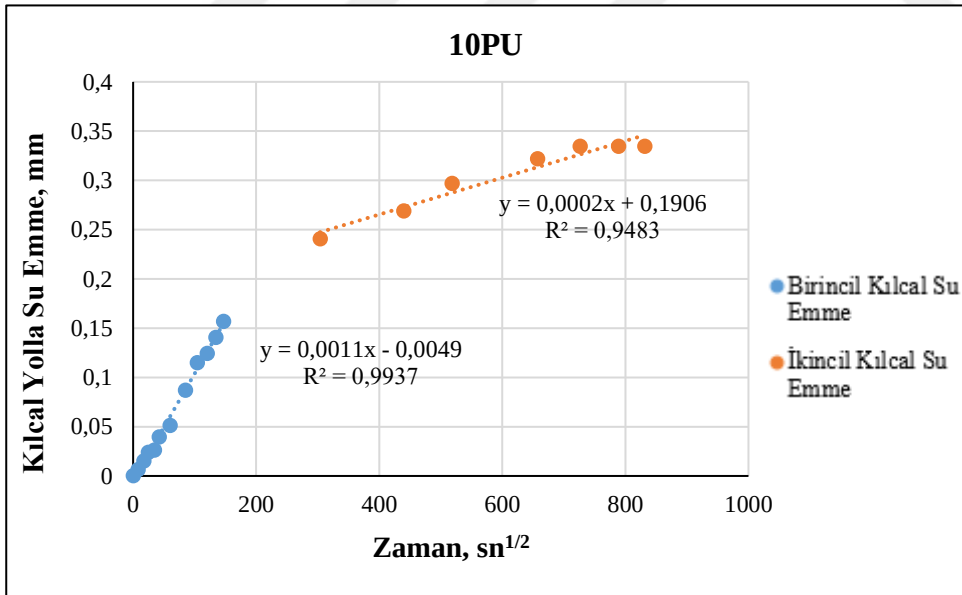
Şekil 4.42. 20GU'ya ait kılcal su emme oranları



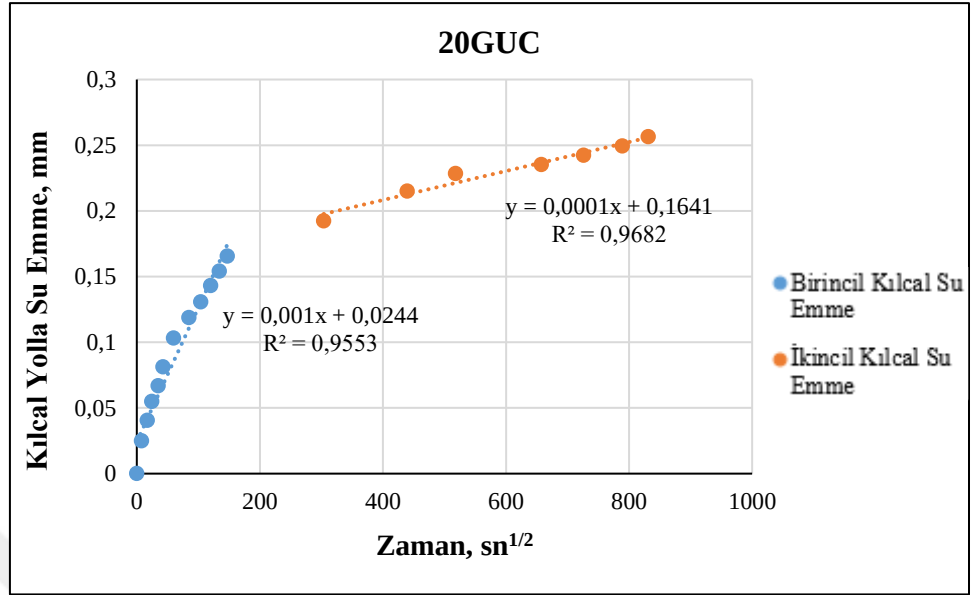
Şekil 4.43. 20PU'ya ait kılcal su emme oranları



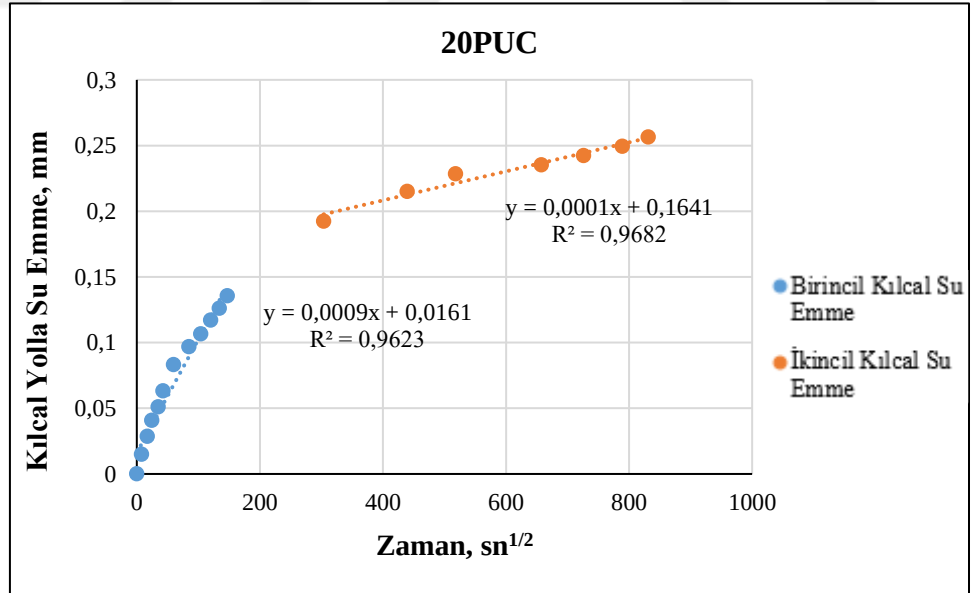
Şekil 4.44. 10GU'ya ait kılcal su emme oranları



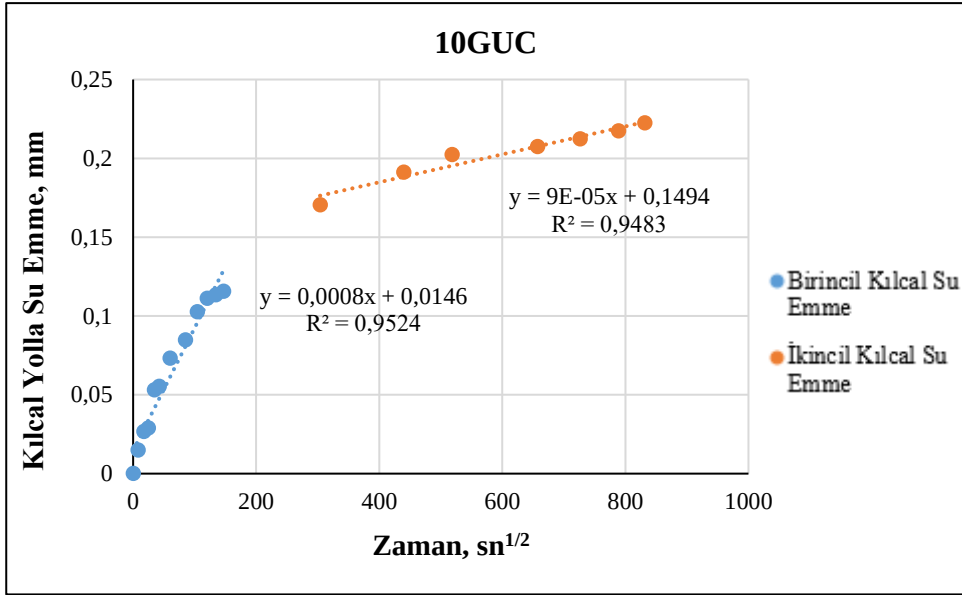
Şekil 4.45. 10PU'ya ait kılcal su emme oranları



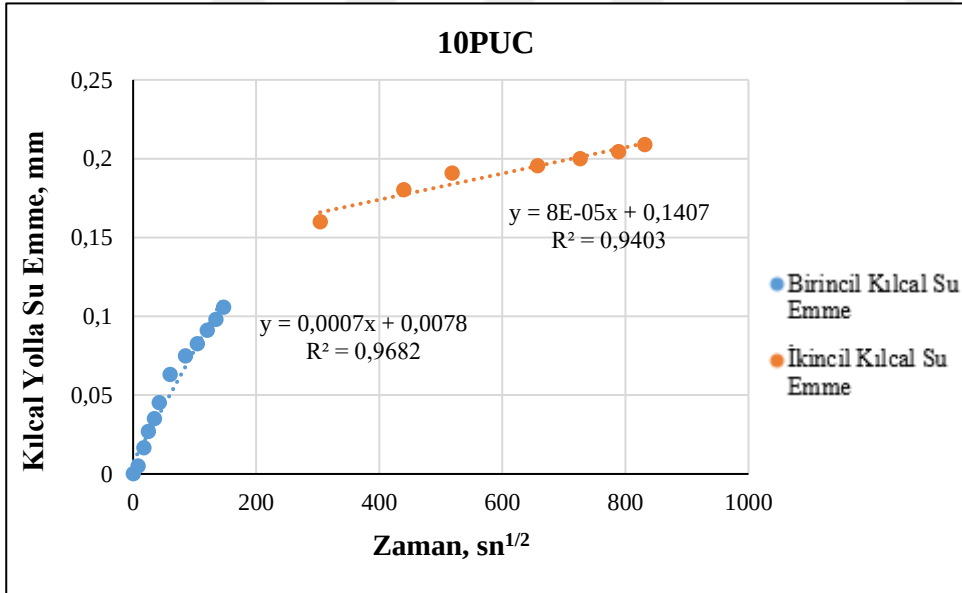
Şekil 4.46. 20GUC'ye ait kılcal su emme oranları



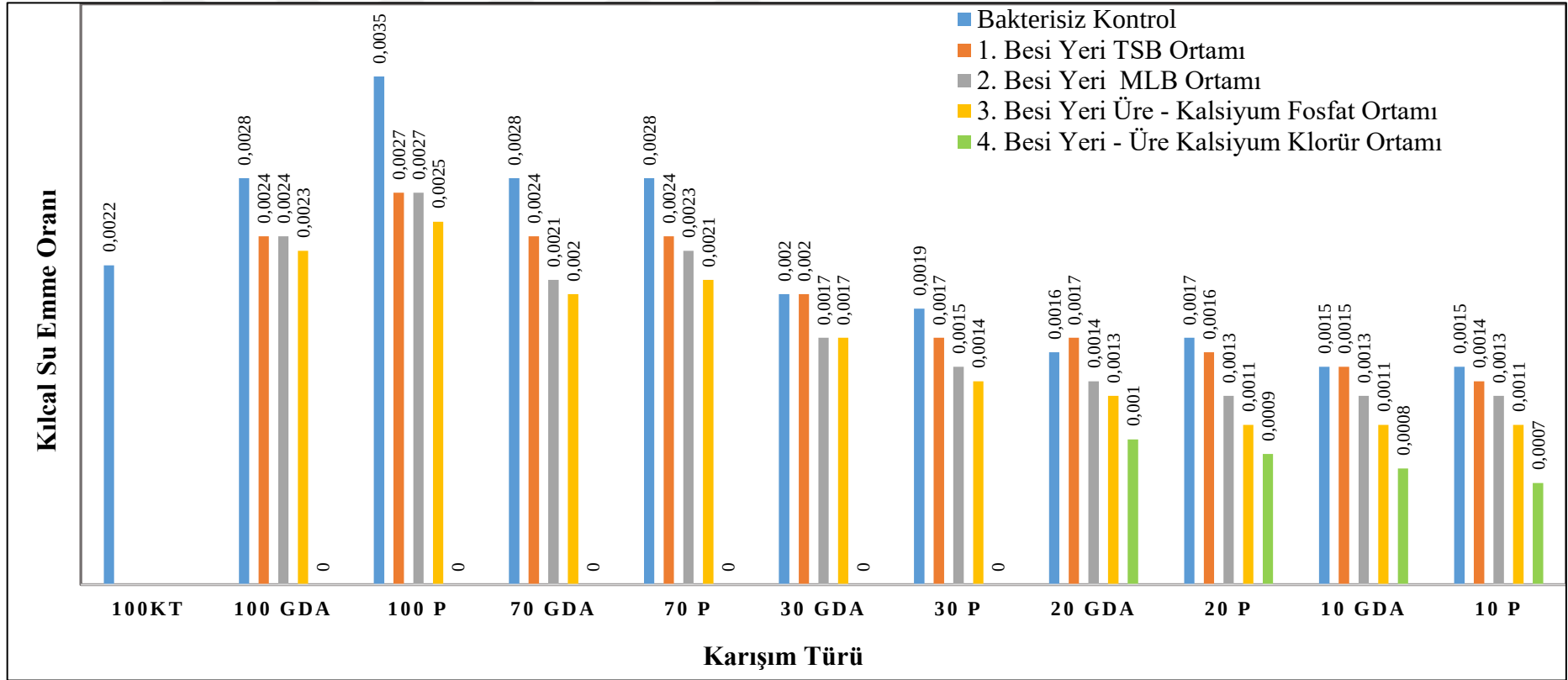
Şekil 4.47. 20PUC'ye ait kılcal su emme oranları



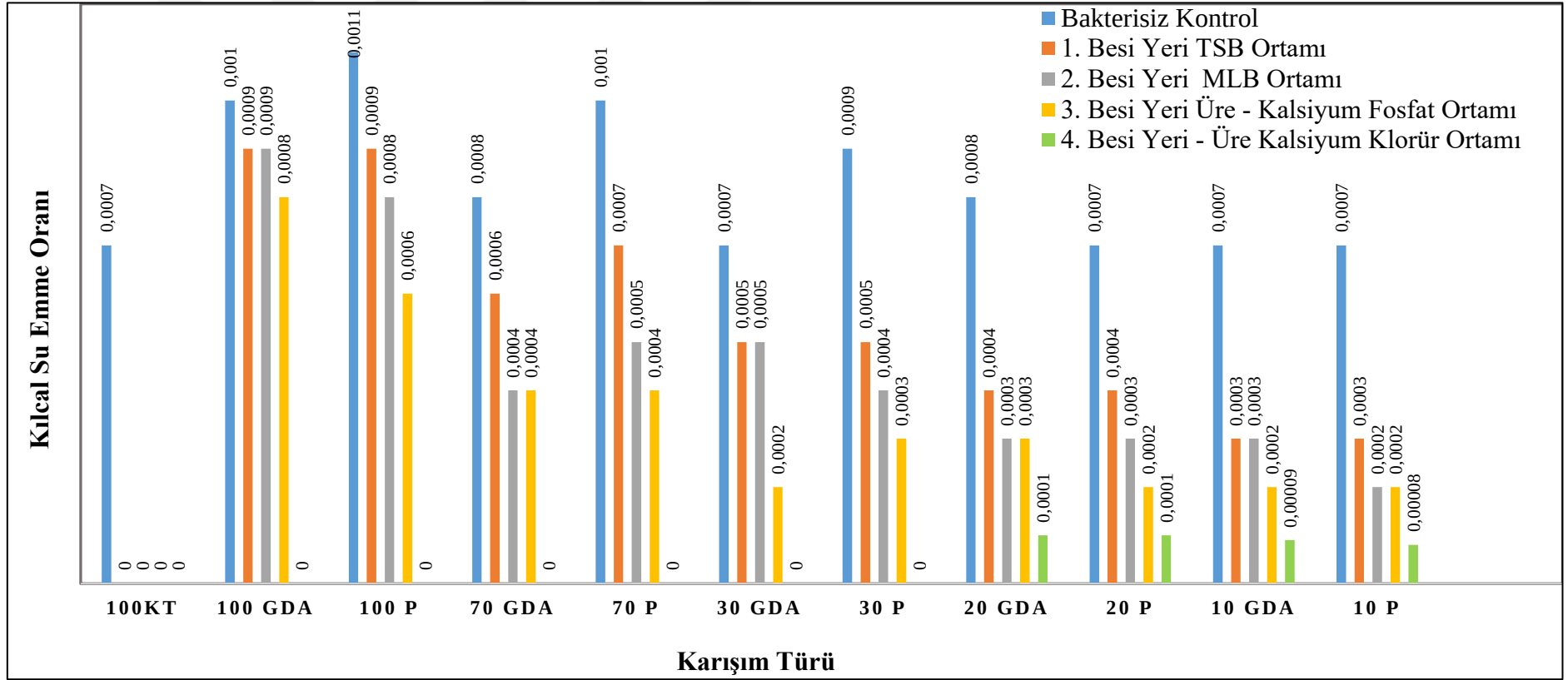
Şekil 4.48. 10GUC'ye ait kılcal su emme oranları



Şekil 4.49. 10PUC'ye ait kılcal su emme oranları



Şekil 4.50. Birincil kılcal su emme oranı ($\text{mm/s}^{1/2}$)



Şekil 4.51. İkincil kılcal su emme oranı ($\text{mm/s}^{1/2}$)

Şekil 4.5-49 incelendiğinde, numunelerin su emme miktarlarını gösteren şekillerde korelasyon katsayısı (R^2), 1 değerine yaklaşmıştır. Buna göre sonuçlar kendi içerisinde tutarlıdır. Şekil 4.50 ve 4.51’de birincil ve ikincil su emme hızları karşılaştırıldığında, bakterisiz karışımların kılcal su emme hızı bakterili olanlara göre daha yüksektir. Bakteri kullanımının kılcal su emme hızını azalttığı, kılcal boşlukları CaCO_3 birikmesiyle kapattığı gözlemlenmiştir. %20 ve altında 4. Besi yeri kapsüllenmiş GDA ve pomza ikame edilmiş karışımlar en iyi performansı göstermiştir.

Literatür incelendiğinde Bhaskar vd.(2017) 120 günlük lifli harç numuneleri üzerinde yapılan çalışmalar sonucu kontrol karışımlarına kıyasla *s.pasteurii* ve *s.ureae* bakterilerinin ilavesinin birincil kılcal su emme hızında sırasıyla %53 ve %46’lık düşüşe neden olduğunu belirtmiştir. Gubta vd. (2018) çalışmalarında *Bacillus sphaericus* bakterisini biyokömür (biochar) içerisine kapsülleyerek harç karışımlarında kullanmıştır. Çalışmalarının sonucunda ise kontrol karışımlarına kıyasla bakteri kullanımının birincil kılcal su emme hızında %33, ikincil kılcal su emme hızında ise %40’lık bir düşüşe neden olduğunu belirtmişlerdir. Bu tez kapsamında yapılan çalışmaların sonucunda da literatür ile uyumlu olarak bakteri kullanımının birincil kılcal su emme hızında %53’e varan oranlarda azalmaya neden olduğu görülmüştür. İkincil kılcal su emme hızları incelendiğinde ise bakteri kullanımının %10 ile %89 aralığında düşüş sağladığı gözlemlenmiştir.

4.7. Kapsülleme Etkisi Deney Sonuçları

TSB, MLB ve üre-kalsiyum fosfat ortamları içerisinde bakterilerin kapsüllendiği agregalardan fiziksel ve mekanik özellikler açısından en iyi sonuç veren, bakterili üre-kalsiyum fosfat ortamının kapsüllendiği 30GDA ve 30P karışımlardır. Kapsüllemenin etkisinin incelenmesi için aynı karışımlara bakterili üre-kalsiyum fosfat ortamları kapsüllemenmeden karışım suyuna eklenerek tatbik edilmiştir. Tablo 4.9-10'da 28 günlük basınç dayanımları ve kontrol karışımına bağlı değişimleri karşılaştırmalı olarak gösterilmiştir.

Tablo 4.9. 28 günlük basınç dayanımları (MPa)

Zaman	30GDA			30P		
	Bakterisiz	Kapsüllenmiş	Kapsüllenmemiş	Bakterisiz	Kapsüllenmiş	Kapsüllenmemiş
3 gün	23,38	31,56	26,52	24,24	25,92	32,74
7 gün	30,84	40,02	36,26	30,64	36,16	35,16
28 gün	41,63	47,02	43	39,12	43,94	42

Tablo 4.10. 28 günlük bağıl basınç dayanımı oranları (%)

Zaman	30GDA			30P		
	Bakterisiz	Kapsüllenmiş	Kapsüllenmemiş	Bakterisiz	Kapsüllenmiş	Kapsüllenmemiş
3 gün	100	135	113	100	107	135
7 gün	100	130	118	100	118	115
28 gün	100	113	103	100	112	107

Sonuçlar incelendiğinde, kapsüllenmemiş GDA karışımları bakterisiz ortama göre basınç dayanımını 3. gün %13, 7. gün %18 arttırırken, 28. gün %3 oranında arttırmıştır. Kapsüllemenmeden pomza agregası kullanılan karışımlarda basınç dayanımı 3. gün %35, 7. gün %15 ve 28. günde %7 oranında artarken, GDA karışımına göre pomza karışımı daha iyi performans göstermiştir. Fakat bakterinin kapsüllendiği agrega karışımlarının basınç dayanımları karşılaştırıldığında kapsül kullanımının bakterinin etkinliğini arttırdığı ve basınç dayanımının kapsüllenmemiş karışımlara göre daha fazla oranda arttığı görülmektedir.

Tablo 4.11-12'de 28 günlük eğilme dayanımları, fiziksel özellikleri ve bunların kontrol karışımına bağlı değişimleri karşılaştırmalı olarak gösterilmiştir.

Tablo 4.11. 28 günlük eğilme dayanımı (MPa) ve fiziksel özellikler

	30GDA			30P		
	Bakterisiz	Kapsüllenmiş	Kapsüllenmemiş	Bakterisiz	Kapsüllenmiş	Kapsüllenmemiş
Eğilme (MPa)	8,2	8,79	8,4	8,3	8,91	8,6
Porozite (%)	17,8	6,9	8,6	18,9	8,5	9,5
Su Emme (%)	11,1	4,3	4,9	11,8	5,3	5,4
1. Kılcal Su Emme (%)	0,002	0,0017	0,0019	0,0019	0,0014	0,0016
2. Kılcal Su Emme (%)	0,0007	0,0002	0,0004	0,0009	0,0003	0,0003
UPV (m/sn)	3295	4178	3900	3378	4180	3900

Tablo 4.12. 28 günlük bağıl eğilme dayanımı (MPa) ve bağıl fiziksel özelliklerin oranları (%)

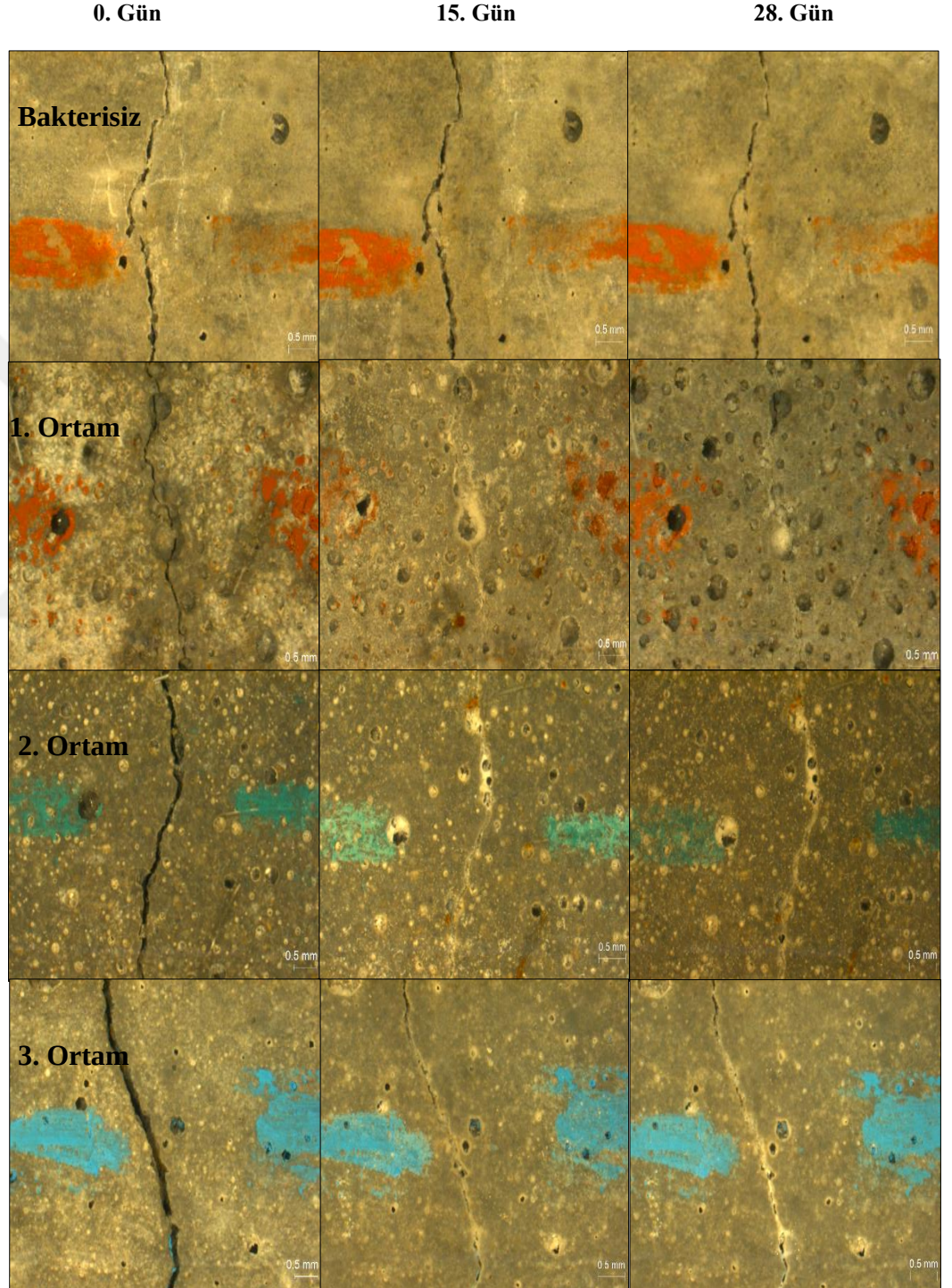
	30GDA			30P		
	Bakterisiz	Kapsüllenmiş	Kapsüllenmemiş	Bakterisiz	Kapsüllenmiş	Kapsüllenmemiş
Porozite	100	39	48	100	45	50
Su Emme	100	39	44	100	45	46
1. Kılcal Su Emme	100	85	95	100	74	84
2. Kılcal Su Emme	100	29	57	100	33	33
UPV	100	127	118	100	124	115
Eğilme	100	107	103	100	107	103

Eğilme dayanımı ve fiziksel özellikler karşılaştırıldığında kapsüllenmemiş karışımlar bakterisiz kontrol karışımlarına göre daha iyi performans sergilerken, yine de kapsülenmiş karışımlara göre daha zayıf özellikler göstermişlerdir. Kapsülleme yönteminin kapsüllenme yapılmamış karışımlara göre harçların özelliklerini daha da geliştirdiği gözlemlenmiştir. Fiziksel ve mekanik özellikler karşılaştırıldığında kapsülleme yapılmasının bakterinin yaşaması için daha uygun ortam koşulları sağladığı, bakteri etkinliğini arttırdığı ve bunun neticesinde de bakteriyel etkiyle oluşan kalsiyum karbonat birikmesini geliştirerek harç özelliklerini iyileştirdiği düşünülmektedir.



4.8. Çatlak Onarımı Deney Sonuçları

0,1-0,3 mm arası genişliğe, 30-35 mm arası derinliğe sahip çatlakların zaman içerisinde onarımı Şekil 4.52-61 arasında gösterilmiştir.

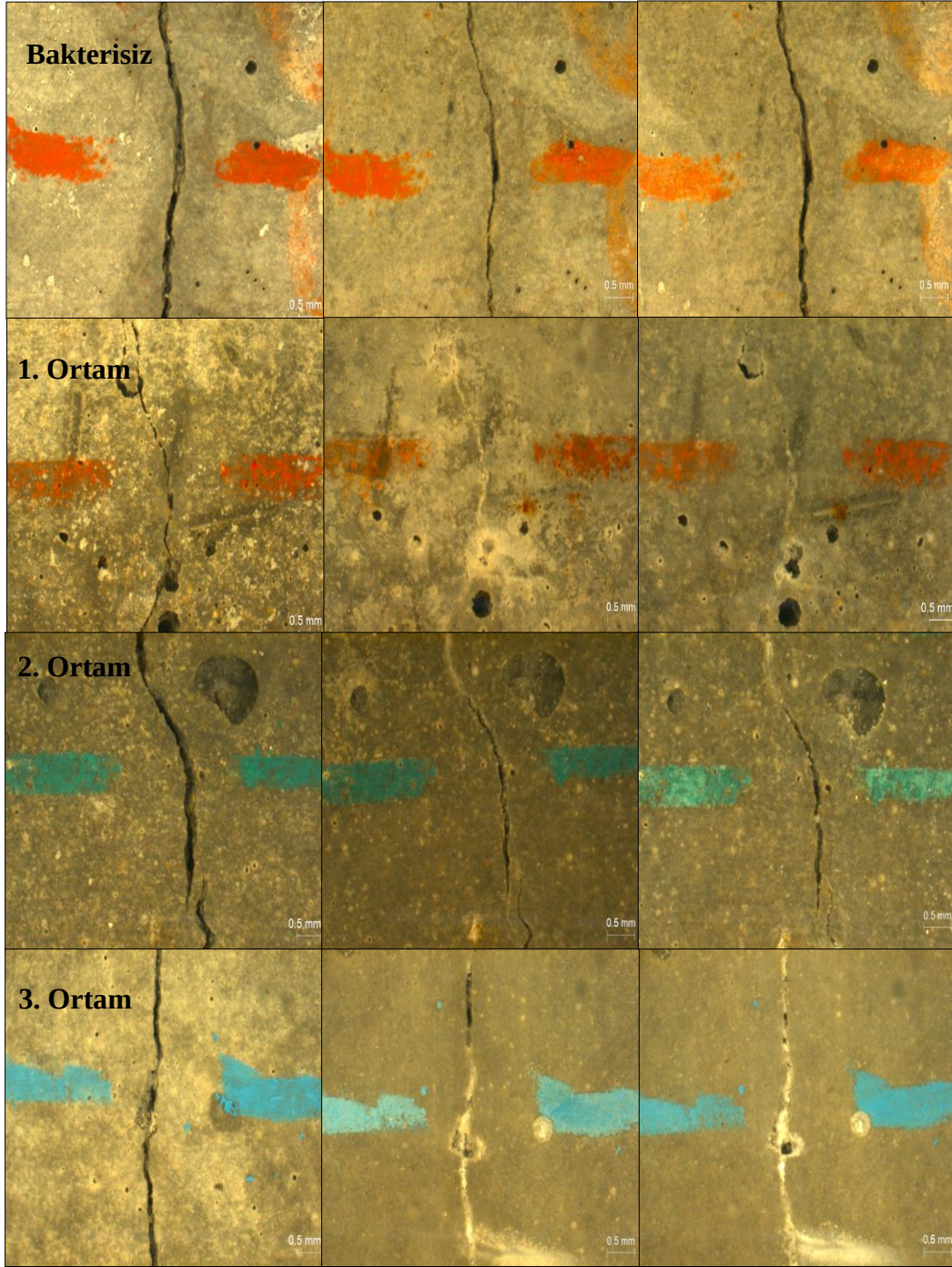


Şekil 4.52. %100 GDA içeren numuneler

0. Gün

14. Gün

28. Gün

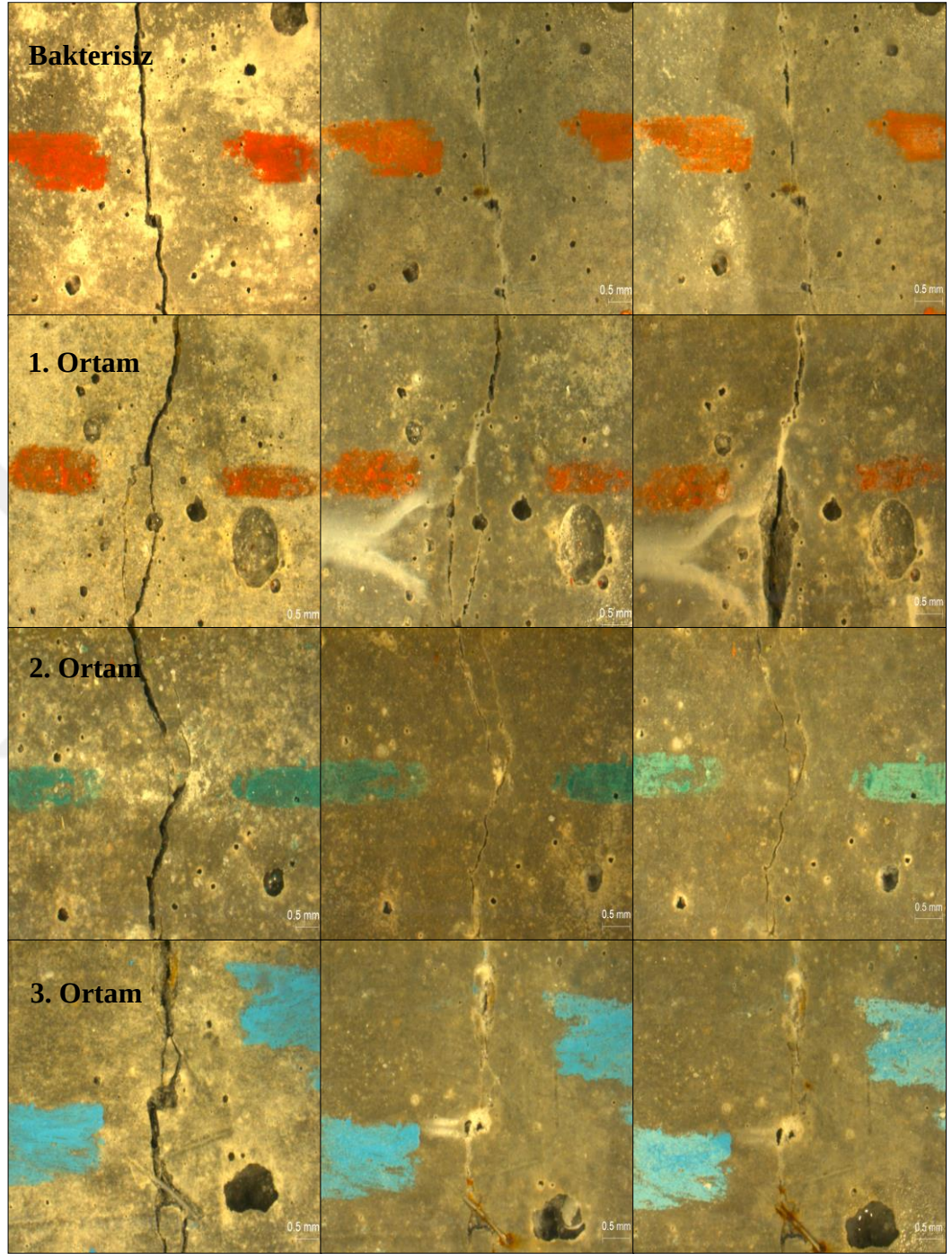


Şekil 4.53. %70 GDA içeren numuneler

0. Gün

14. Gün

28. Gün

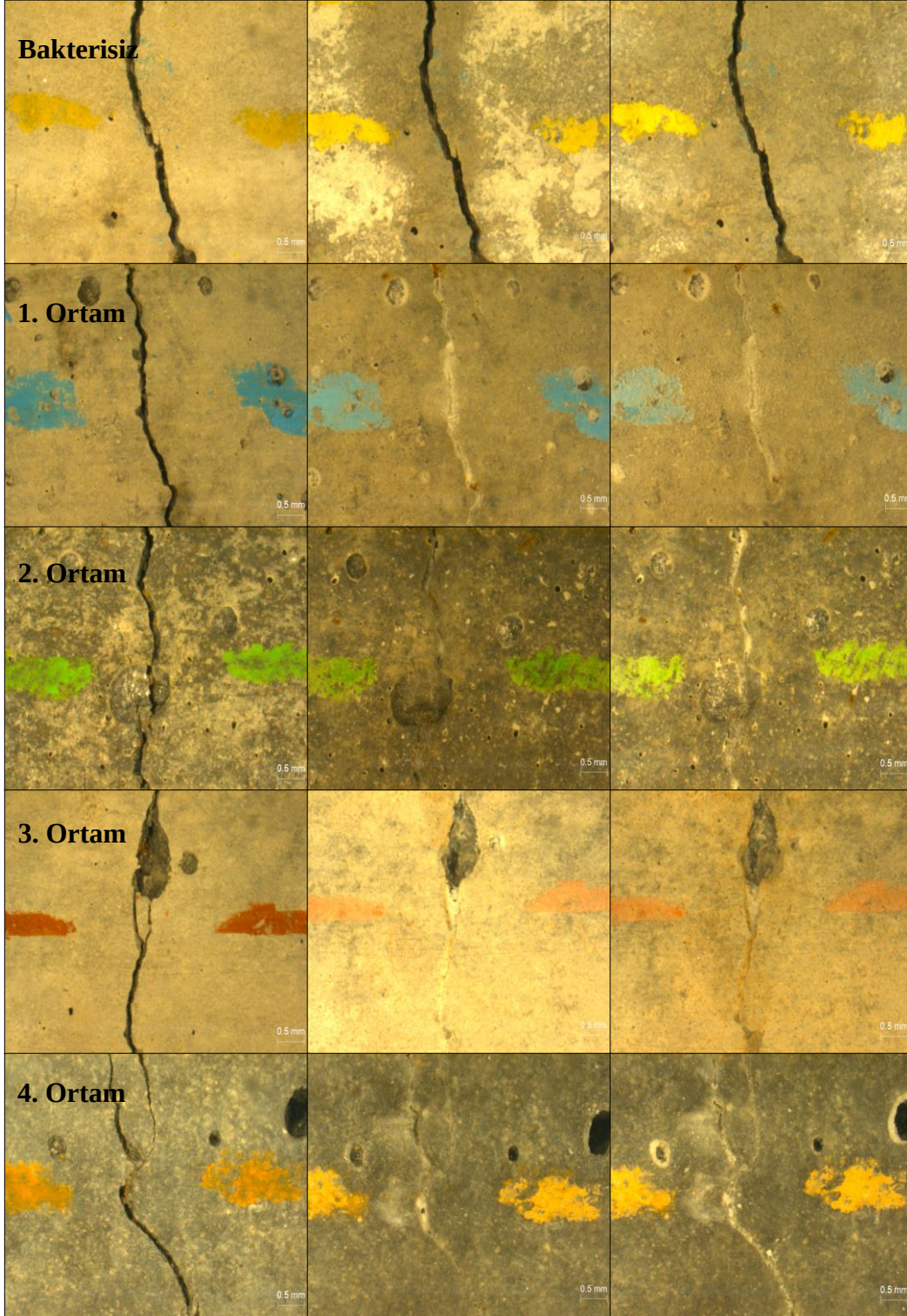


Şekil 4.54. %30 GDA içeren numuneler

0. Gün

14. Gün

28. Gün

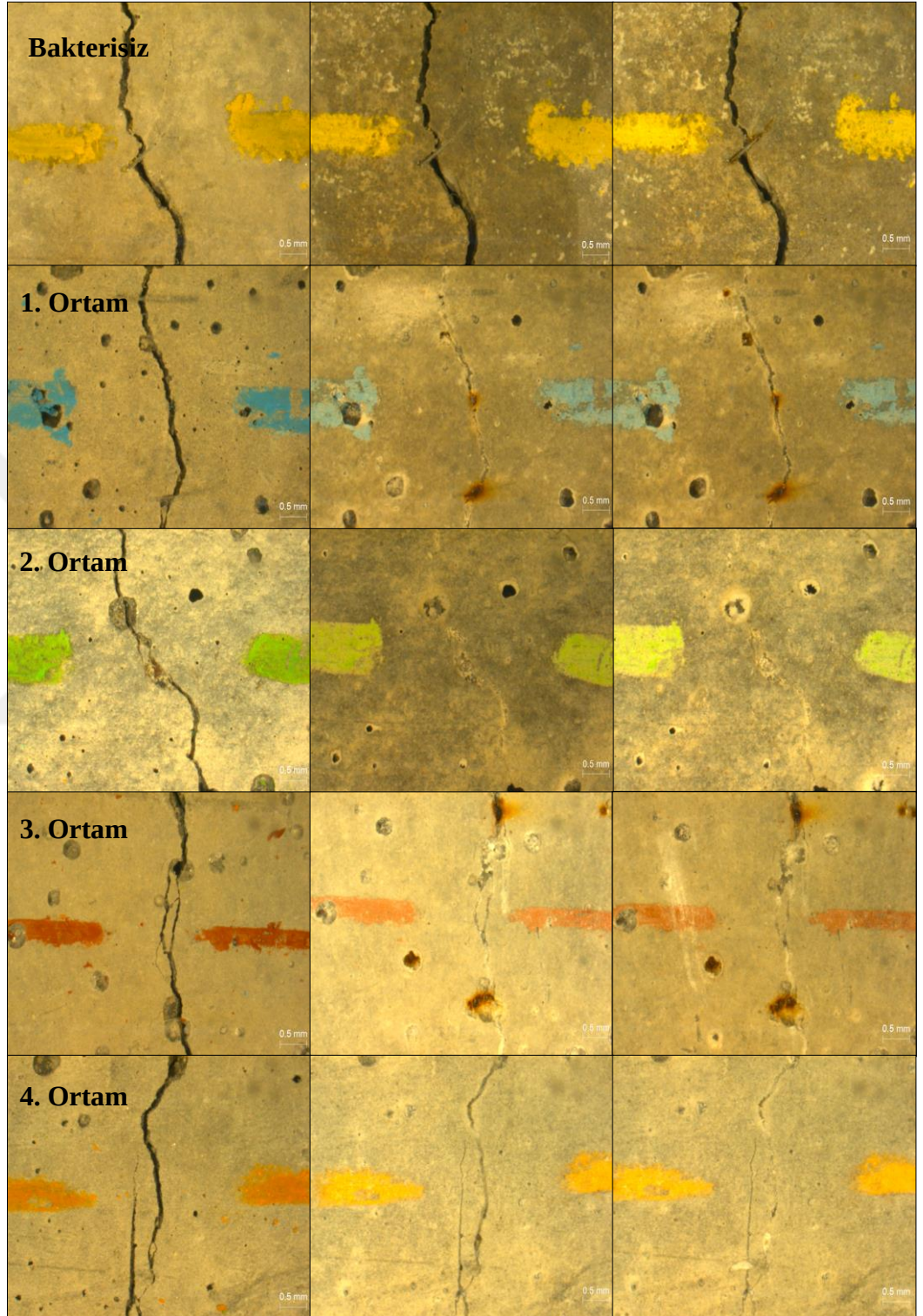


Şekil 4.55. %20 GDA içeren numuneler

0. Gün

14. Gün

28. Gün

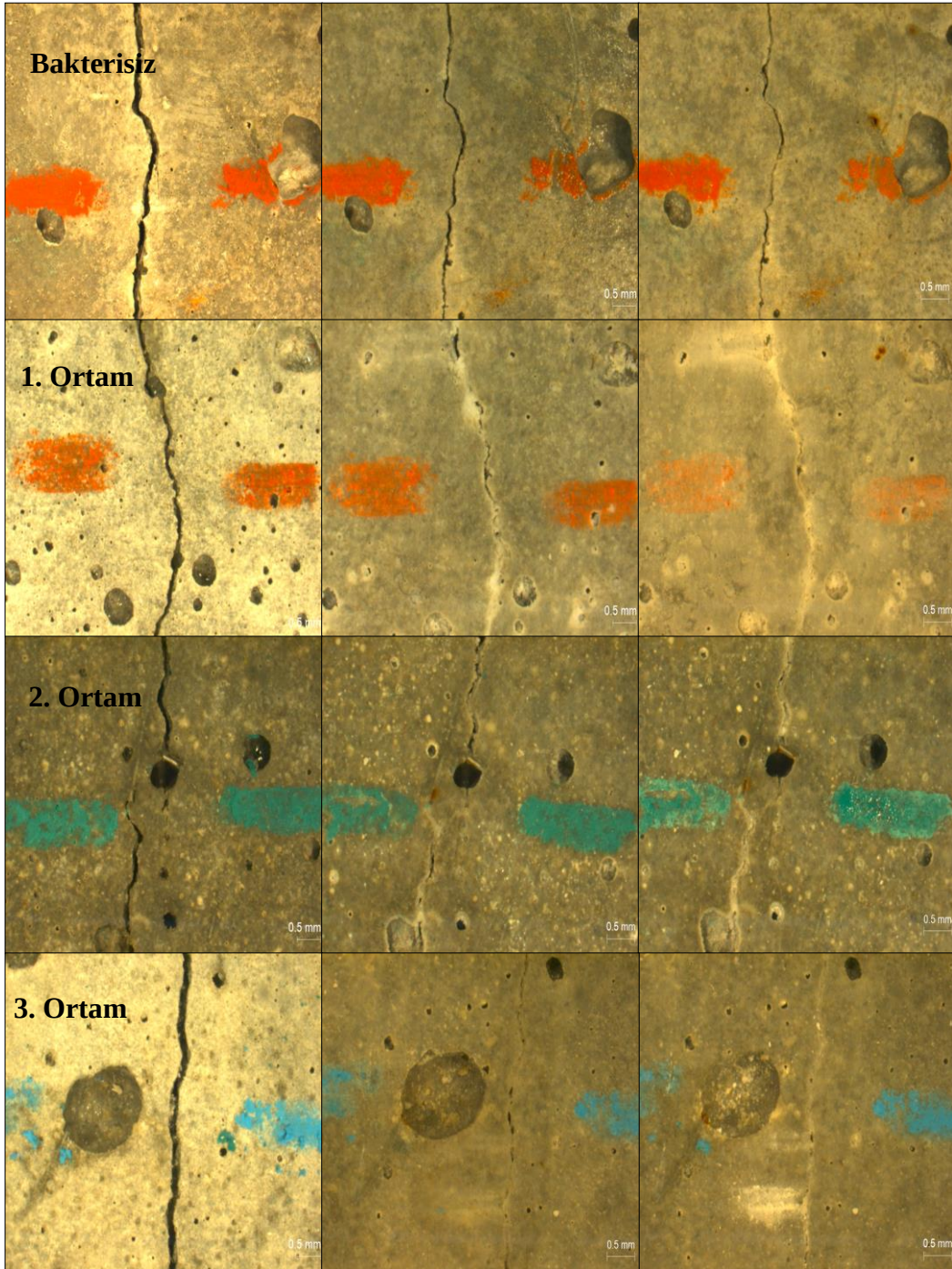


Şekil 4.56. %10 GDA içeren numuneler

0. Gün

14. Gün

28. Gün

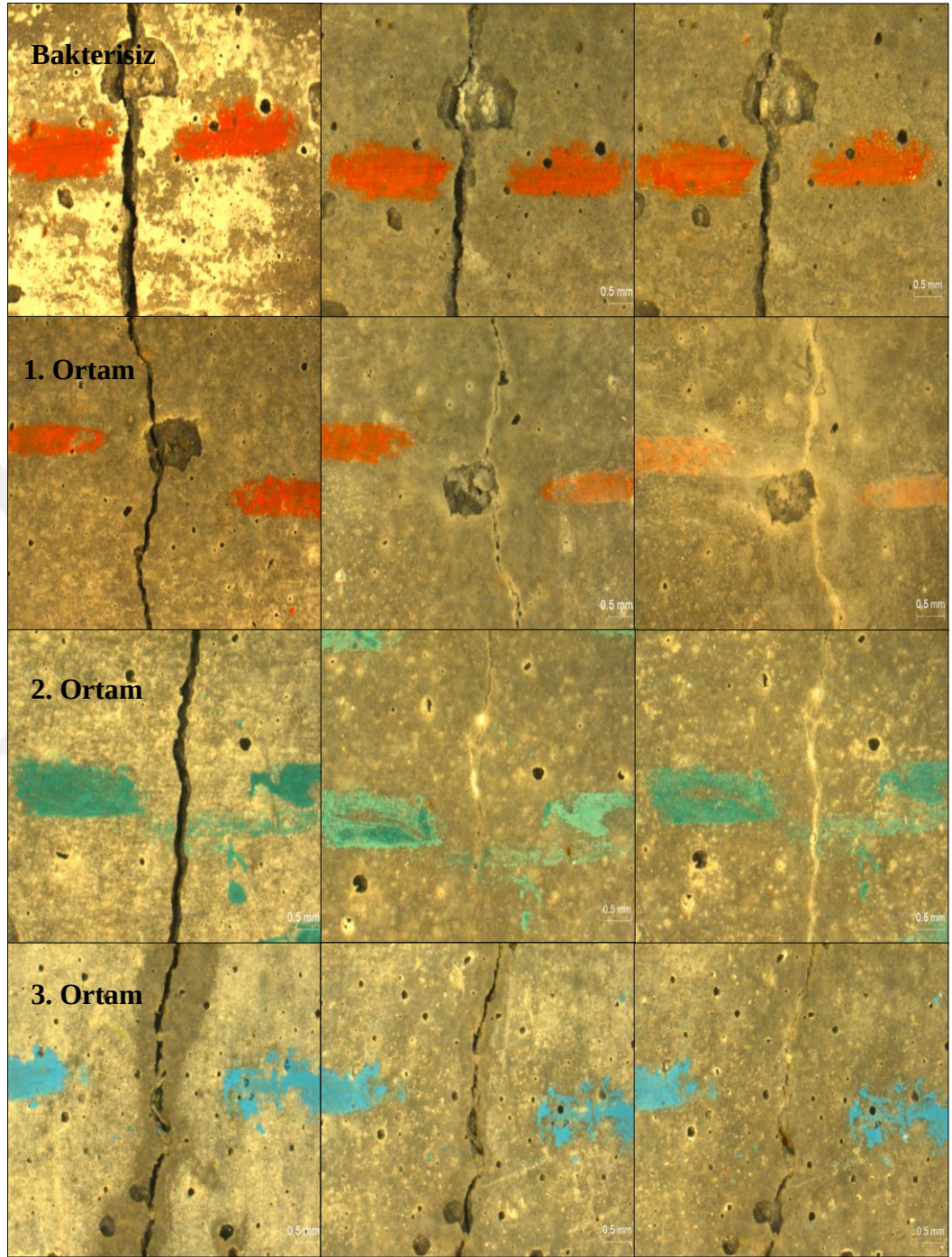


Şekil 4.57. %100 Pomza içeren numuneler

0. Gün

14. Gün

28. Gün

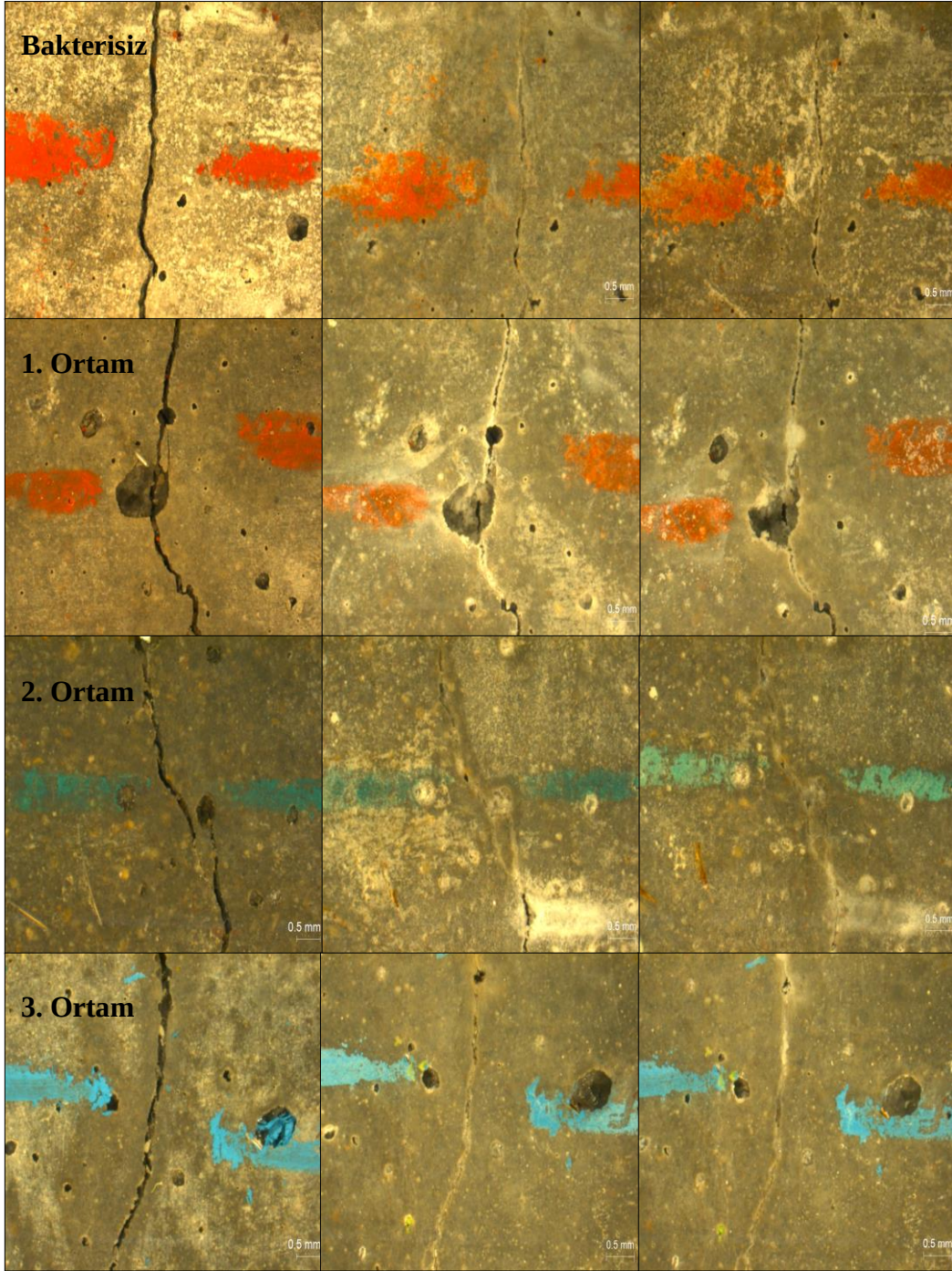


Şekil 4.58. %70 Pomza içeren numuneler

0. Gün

14. Gün

28. Gün

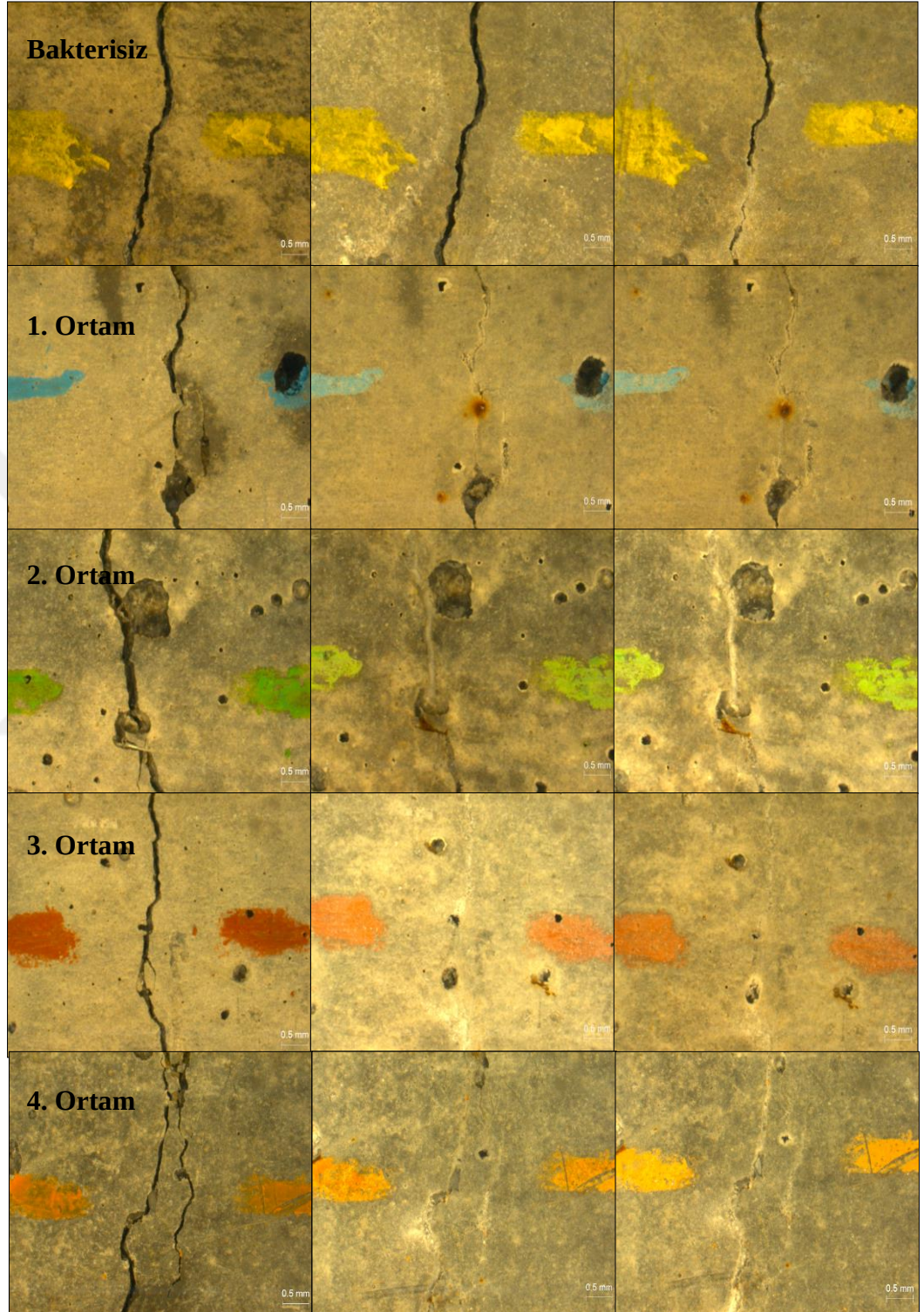


Şekil 4.59. %30 Pomza içeren numuneler

0. Gün

14. Gün

28. Gün

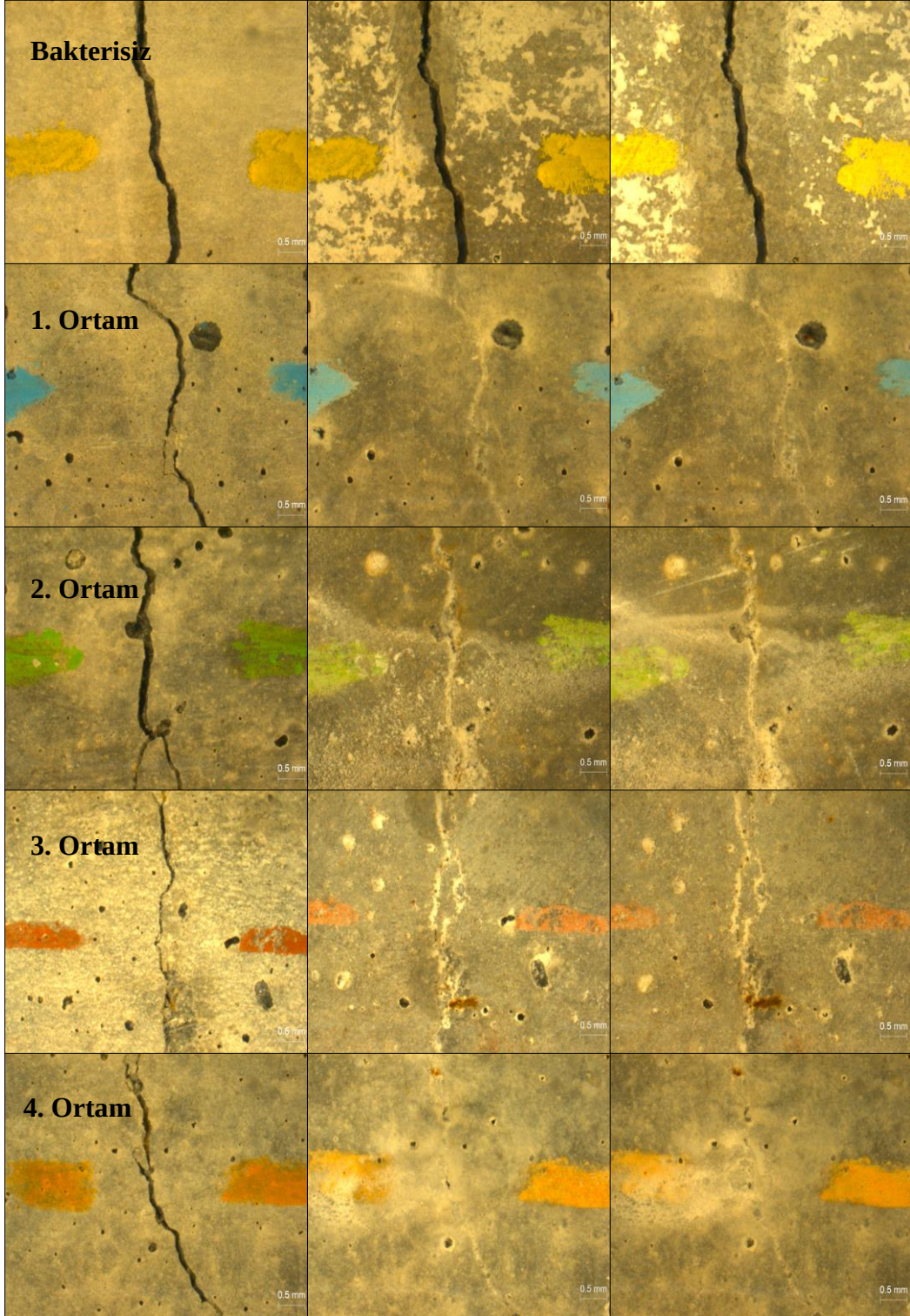


Şekil 4.60. %20 Pomza içeren numuneler

0. Gün

14. Gün

28. Gün



Şekil 4.61. %10 Pomza içeren numuneler

Şekil 4.52–61’de görüldüğü üzere çatlak onarımları incelendiğinde su içerisinde kürlenene numunelerde, 28. güne kadar genişliği 0,1-0,3 mm arası, derinliği 30-35 mm arasında olan çatlakların tüm bakterili karışımlarda iyileştiği gözlemlenmiştir. Bakterinin çatlakların doldurulmasındaki etken madde olan CaCO_3 birikmesini arttırdığı net bir şekilde görülmüştür.

Konu ile ilgili literatürde yer alan çalışmalar incelendiğinde; Jadhav vd. (2018) *S. pasteurii* bakterisi kullanılarak yaptıkları çalışmada bakteri kullanımının çatlak iyileştirme yönünden etkilerini incelemişlerdir. Çalışmaların sonucunda CaCl_2 içeren üreli besi ortamına bırakılmış bakterili numunelerdeki genişliği 89 ± 3 mikro metre olan çatlakların kapandığını belirtmişlerdir. Bir başka çalışmada ise Zhang vd. (2017) *B. Cohnii* bakterisi kullanarak hazırlanan beton karışımlarında 0.79 mm’ye kadar olan çatlakların kapandığını belirtmişlerdir. Alazhari vd. (2017) yaptığı benzer bir çalışmada genleştirilmiş perlit içerisine *Bacillus pseudofirmus* ve besin maddelerini kapsüllemiştir. Hazırlanan örnekler yüklem makinesiyle yüklem yapılmış ve 0,35 mm genişliğinde çatlak oluşturulduğu zaman makine durdurulmuştur. Numuneler %100 e yakın rölatif nem içerisinde, 30 C° sıcaklıkta bekletilmişlerdir. Çalışmanın sonucunda bakterili numunelerde çatlakların kapandığını gözlemlenmiştir. Huynh vd. (2016) yaptığı çalışmada *Bacillus subtilis* HU58 ve kapsülleme için doğal diyetomit kullanarak betonda ve harçta kendiliğinden iyileşme olgusunu araştırmışlardır. Çalışma sonucunda bakteri içeren numunelerde kontrollü şekilde oluşturulan 1-1.8 mm genişliğindeki çatlakların kapandığı belirtilmiştir. Mondal ve Ghosh (2018) tarafından yapılan çalışmada ise *B. Subtilis* bakterisi kullanılarak hazırlanan beton karışımlarında 0.1- 1.2 mm arasında oluşturulan çatlakların kapandığı gözlemlenmiştir. Bu tez kapsamında yapılan çalışmada da literatürdeki sonuçlara oldukça benzer sonuçlara ulaşılmıştır. Kapsüllenen besi ortamından bağımsız olarak bakteri içeren tüm harç karışımlarında kontrollü bir şekilde oluşturulan, 0.3 mm’ye kadar olan çatlakların 14-28 gün arasında kapandığı gözlemlenmiştir.

4.9. Bakterinin Canlılık Kontrolü Deney Sonuçları

Harç örneklerinin dökümünden 3 ay sonra bakterilerin canlılık kontrolünün yapılması için TSB, MLB, üre-kalsiyum fosfat, üre-kalsiyum klorür besi ortamının kapsüllendiği %100, %30, %10 GDA ve Pomza içeren harç örneklerinden 10 gramlık parçalar kopararak kum tanesi boyutuna kadar ezilmiş ve stomacher poşetinin içine 10'ar gramlık örnekler tartılmıştır. Üzerlerine 90 ml FTS konulmuş sonrasında tüm örnekler seri dilüsyon olacak şekilde 10^{-5} 'e kadar seyreltilmiştir. Petrilere seyreltilen harç örneklerinden 1 ml ve üzerine 15 ml TSA konularak 37°C 'de 48 saat inkübe edilmiş, kontrol olarak da aynı oranlardaki bakterisiz pomza ve GDA örnekleri kullanılmıştır. Sonuçlar Tablo 4.13'de verilmiştir.

Tablo 4.13. Bakteri sayım miktarı (hücre/ml)

Karışım Türü	Kontrol Bakterisiz	1. Besi Yeri TSB Ortamı	2. Besi Yeri MLB Ortamı	3. Besi Yeri Üre - Kalsiyum Fosfat Ortamı	4. Besi Yeri Üre - CaCl_2 Ortamı
100 GDA	Üreme yok	Üreme yok	Üreme yok	156×10^4	-
100 P	10	Üreme yok	Üreme yok	120×10^4	-
30 GDA	10	-	-	Üreme yok	-
30 P	70	-	-	Üreme yok	-
10 GDA	460	Üreme yok,	10	800	Üreme yok
10 P	480	Üreme yok	Üreme yok	Üreme yok	Üreme yok

Tablo 4.13 incelendiğinde bakterisiz kontrol karışımlarında, MLB besi yeri ve üre-kalsiyum fosfat besi yeri içeren 10GDA karışımında çok az miktarda bakteri varlığına rastlanmıştır. Bunun nedenin harç numunelerinin saklanması aşamasında ya da parça koparılıp ezilmesi aşamasında kontaminasyon gerçekleşmesi nedeniyle olduğu düşünülmektedir. Bakterili üre-kalsiyum fosfat besi ortamının kapsüllendiği 100 GDA ve Pomza karışımlarından alınan örneklerde, dökümden 3 ay sonra yapılan canlılık testinde bakterilerin tekrar çoğaltılması sağlanabilmiş, 48 saat inkübasyon sonrasında 100 GDA karışımında 156×10^4 hücre/ml, 100 P karışımında 120×10^4 hücre/ml konsantrasyonunda bakteri sayımı yapılmıştır. Harç numunelerinin fiziksel ve mekanik özellikleri incelendiğinde üre-kalsiyum fosfat ortamı ve üre-kalsiyum klorür ortamının en faydalı besi ortamı olduğu görülmektedir. Bakterinin pozitif etkisinin en çok hissedildiği bu besi ortamlarında 3 ay sonra yapılan canlılık testinde bakterileri tekrardan çoğaltabilmek bakterinin varlığını doğrular niteliktedir. Fakat aynı besi ortamları için daha düşük oranlardaki harç numunelerinden örnek aldığımızda (%30-%10 GDA ve pomza içeren

karışımlardan) bakteri varlığına rastlanamamıştır. GDA ve pomza oranının daha az olması nedeniyle bakteri miktarının da daha az olması sonucunda ya yaşamsal faaliyetini bu süre zarfında sürdürememesi, ya da alınan 10 gramlık örnekte bakterili kısma rastlanamaması nedeniyle bu durumun oluştuğu düşünülmektedir.

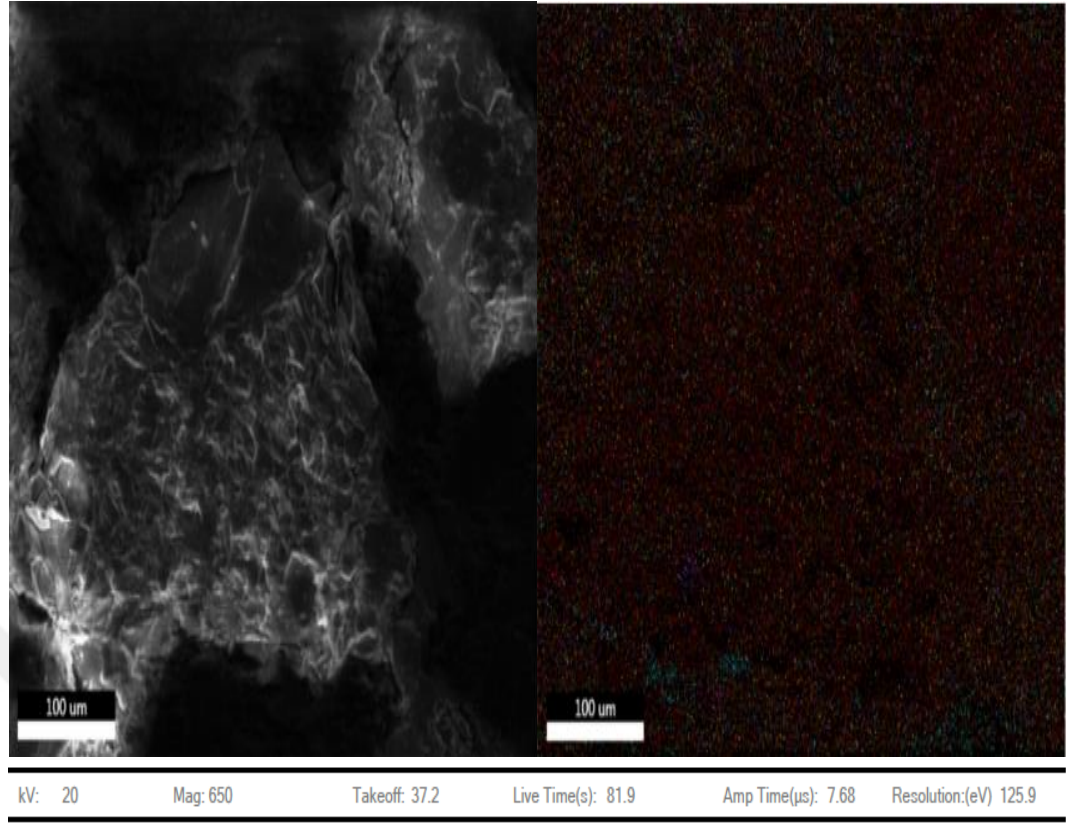


4.10. SEM ve EDS Analizi Deney Sonuçları

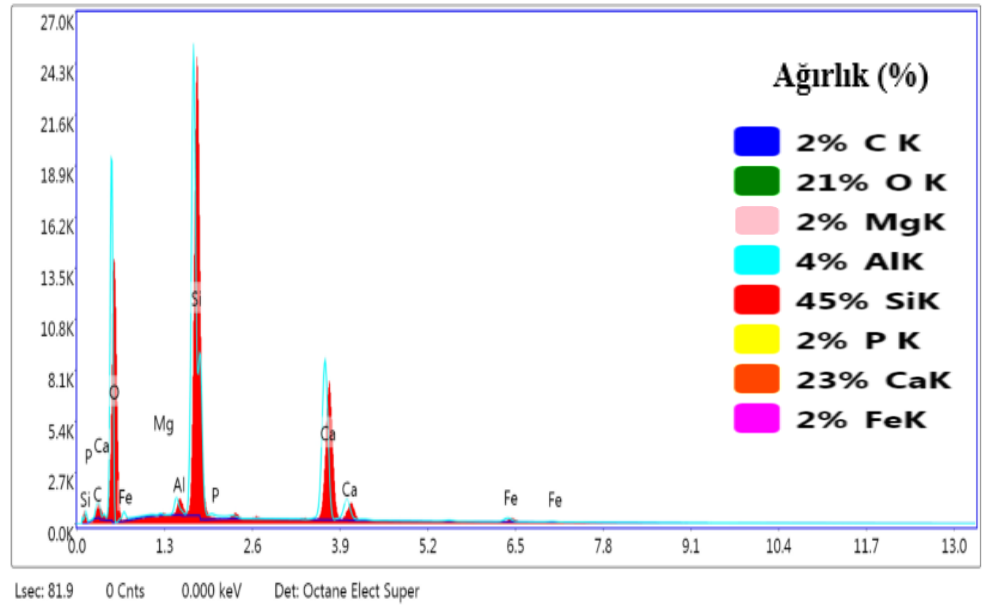
Numunelerin mikro yapısı ve element kompozisyonlarının incelenebilmesi için SEM ve EDS görüntüleri alınmıştır. Numunelerin içerisinden 15x15x15 mm boyutlarında kesilerek çıkarılan parçalar incelenmiştir. Yüzey tarama yöntemiyle içerdikleri element yapıları bulunmuş, renklendirilerek kodlanmıştır. Bakterisiz %100 kireç taşı, bakterisiz %100 ve %10 GDA içeren numuneler, bütün kullanılan bakterili ortamların kapsüllendiği GDA'lar ile karşılaştırılmıştır. GDA içeren %10 ve %100 ikame oranlarının incelenmesinin nedeni, önceki yapılan deneylerde %100 GDA içeren bakterili karışımların, bakterisiz kontrol karışımlarına göre mekanik özellikleri azalırken, %10 GDA içeren bakterili karışımların mekanik özellikleri bakterisiz kontrol karışımlarına göre çoğunlukla gelişmiştir. Tüm bakterili karışımların, bakterisiz kontrol karışımlarına göre fiziksel özelliklerinde gelişmeler gözlemlenmiştir. Bu farklılığın içerdiği element yapısıyla ilişkisinin belirlenmesi amacıyla bu agrega tipi ve karışım oranları tercih edilmiştir.

Gösterimde baştaki sayı agrega ikame oranını, sonrasındaki harf agrega türünü ve sondaki harf veya harfler içerisine kapsüllenen bakterinin ortamını göstermektedir. Geri dönüşüm agregası (G), pomza (P), kireç taşı (K), bakterisiz ortam (NB), TSB ortamı (T), MLB ortamı (M), üre-kalsiyum fosfat ortamını (U), üre-kalsiyum klorür ortamı (UC) olarak simgelenmiştir. Örneğin; 100GNB, %100 oranında geri dönüşüm agregası bulunan bakterisiz ortamdır.

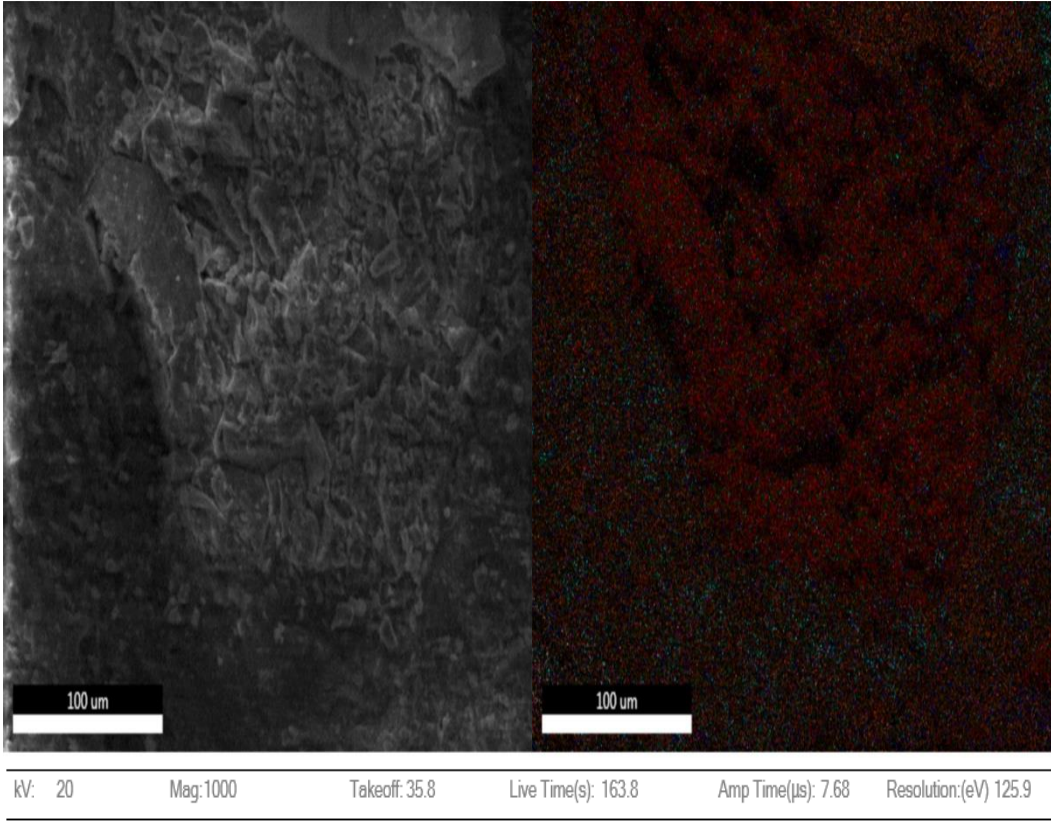
100KNB, 100GNB, 100GT, 100GM, 100GU, 10GNB, 10GT, 10GM, 10GU, 10GUC karışımlarının SEM ve EDS görüntüleri Şekil 4.62 - 4.71 arasında gösterilmiştir.



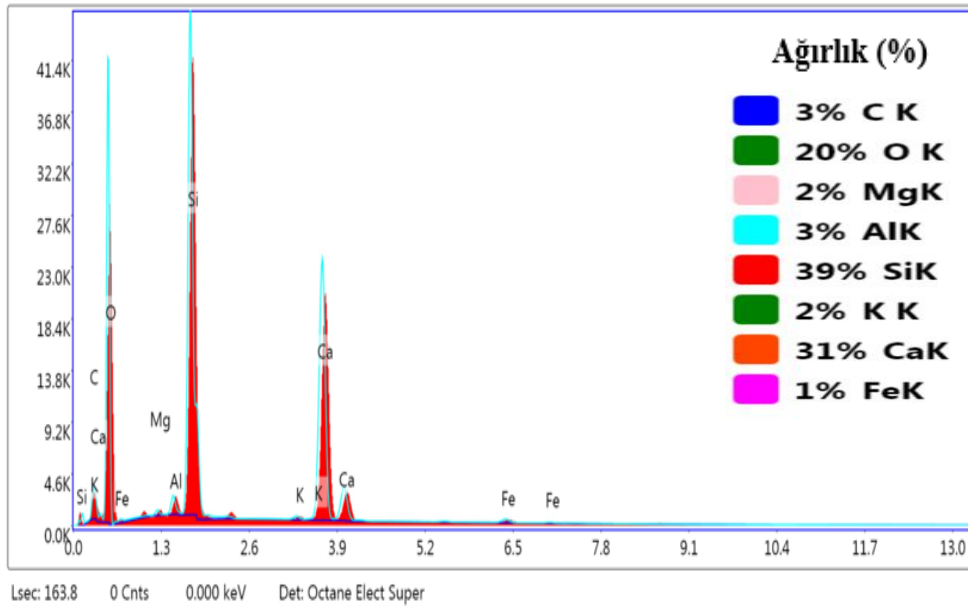
Sum Spectrum



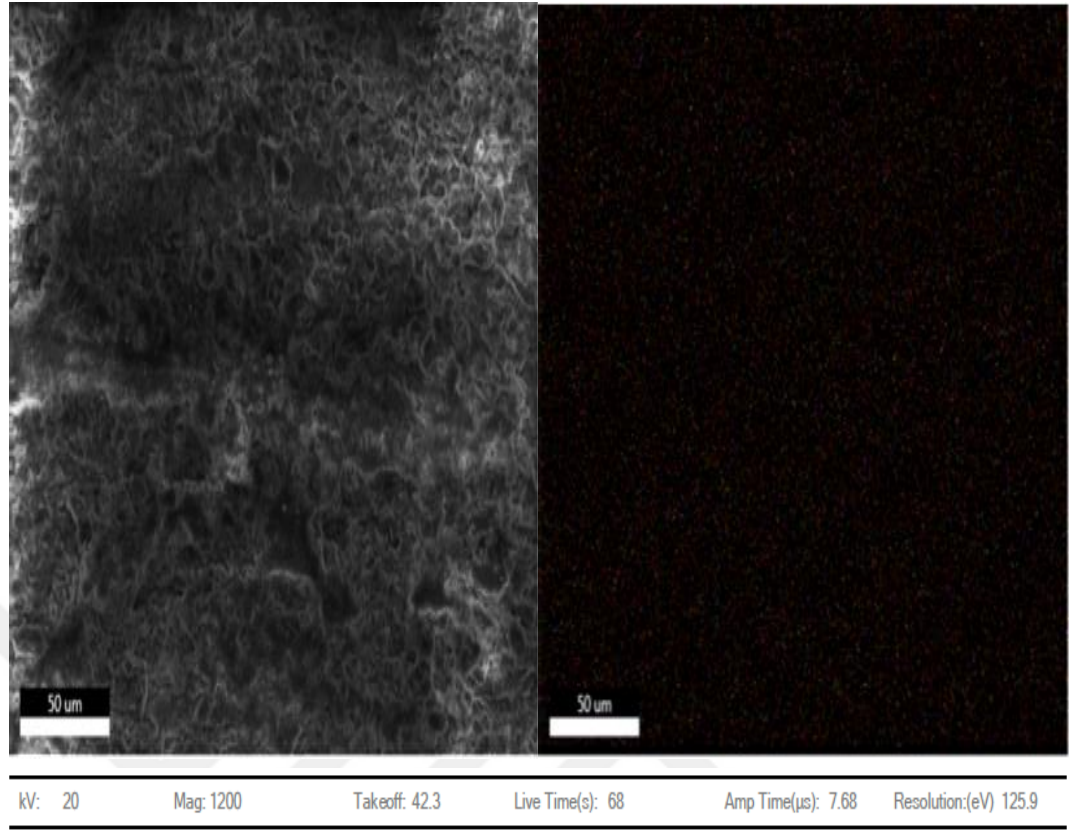
Şekil 4.62. 100KNB karışımının SEM ve EDS görüntüsü



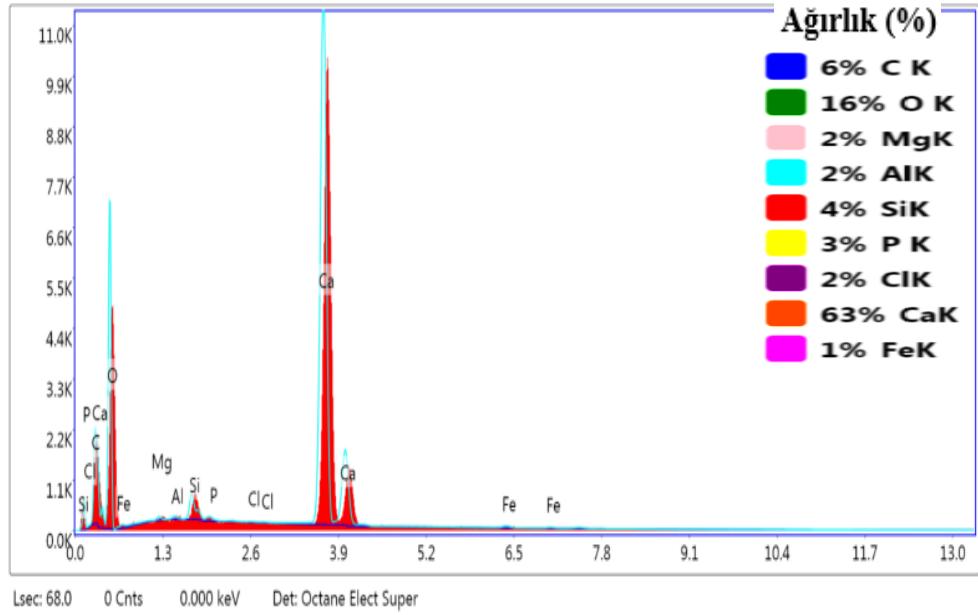
Sum Spectrum



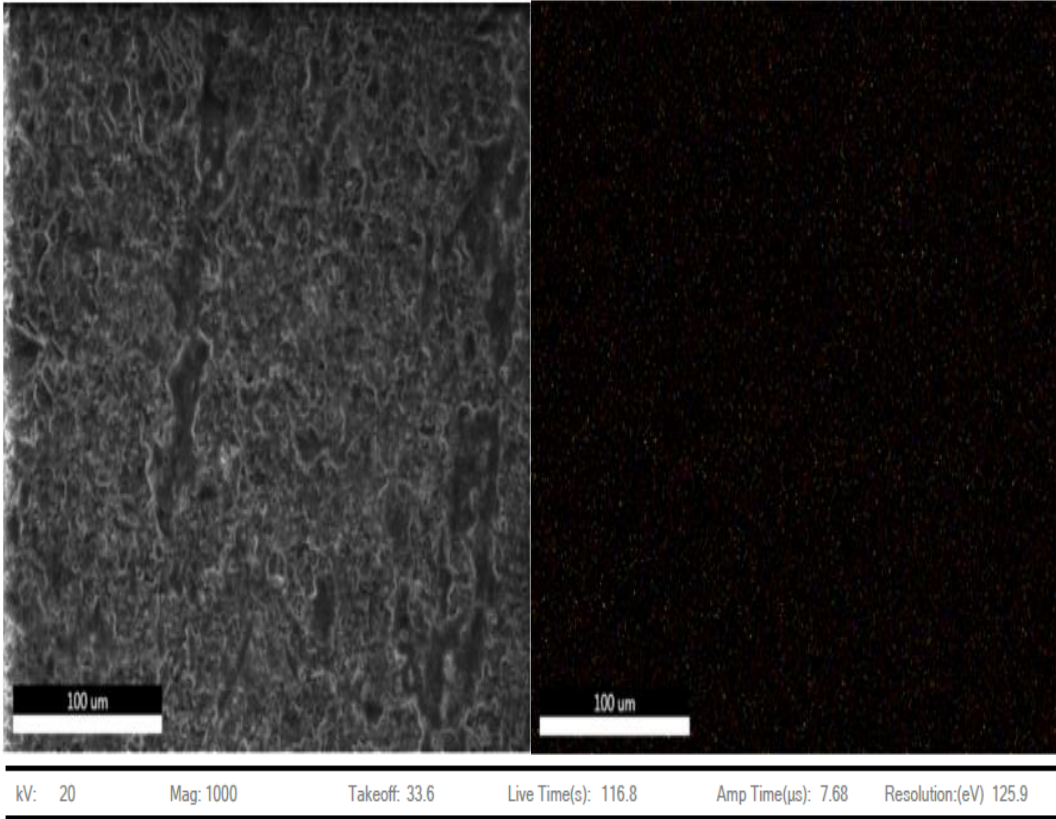
Şekil 4.63. 100GNB karışımının SEM ve EDS görüntüsü



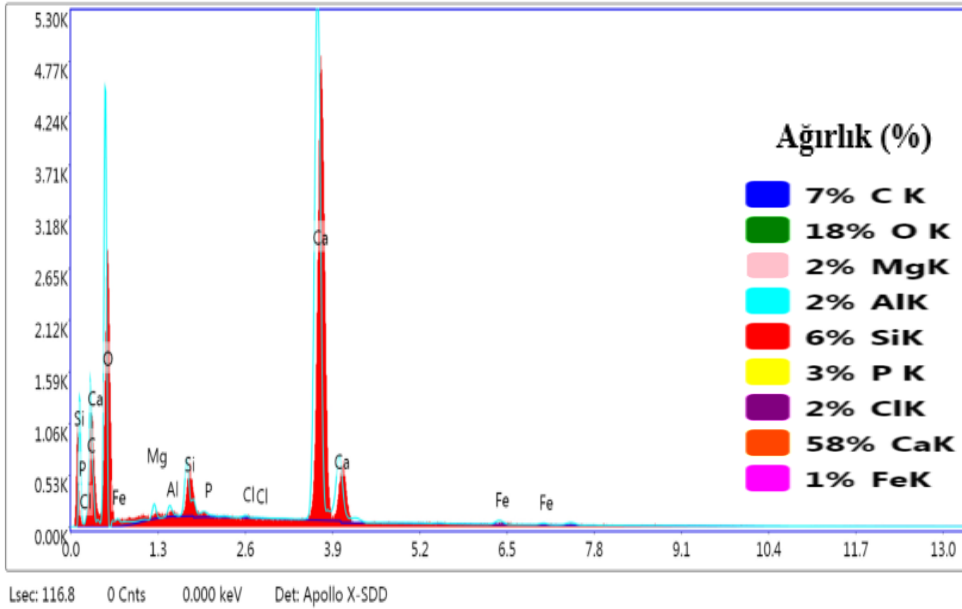
Sum Spectrum



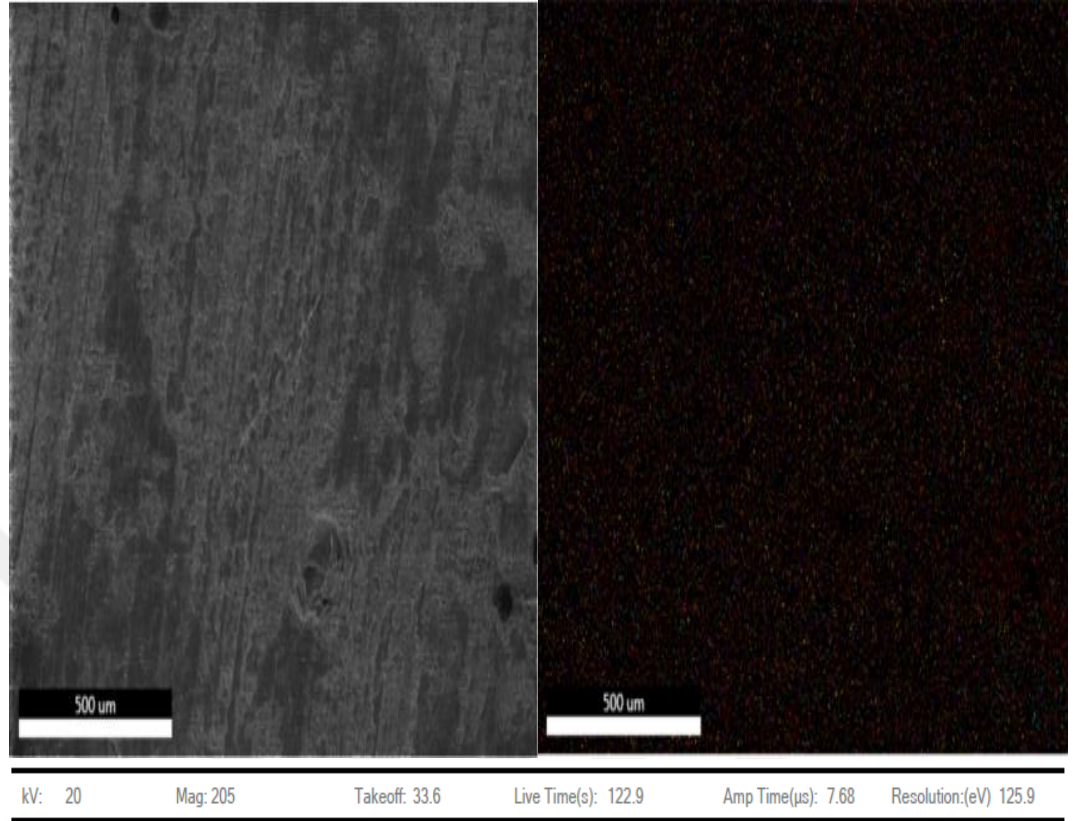
Şekil 4.64. 100GT karışımının SEM ve EDS görüntüsü



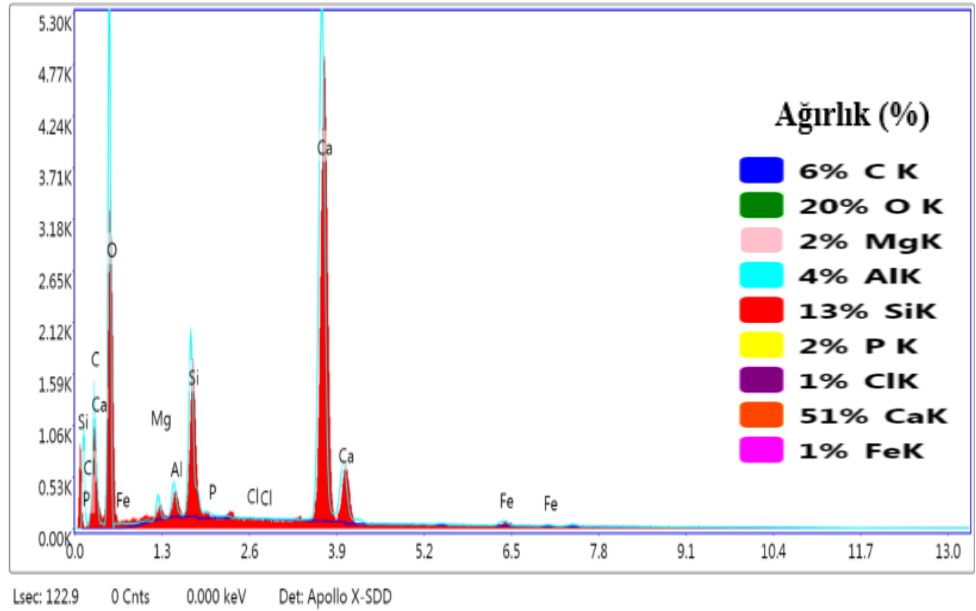
Sum Spectrum



Şekil 4.65. 100GM karışımının SEM ve EDS görüntüsü

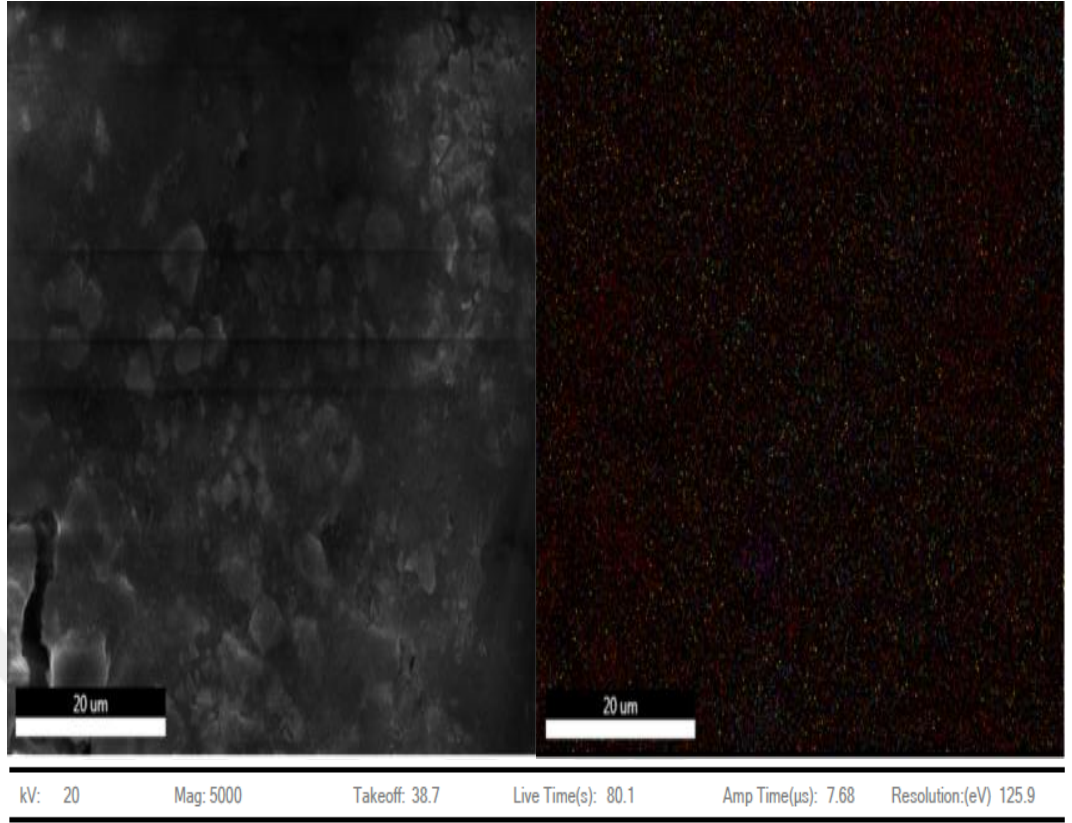


Sum Spectrum

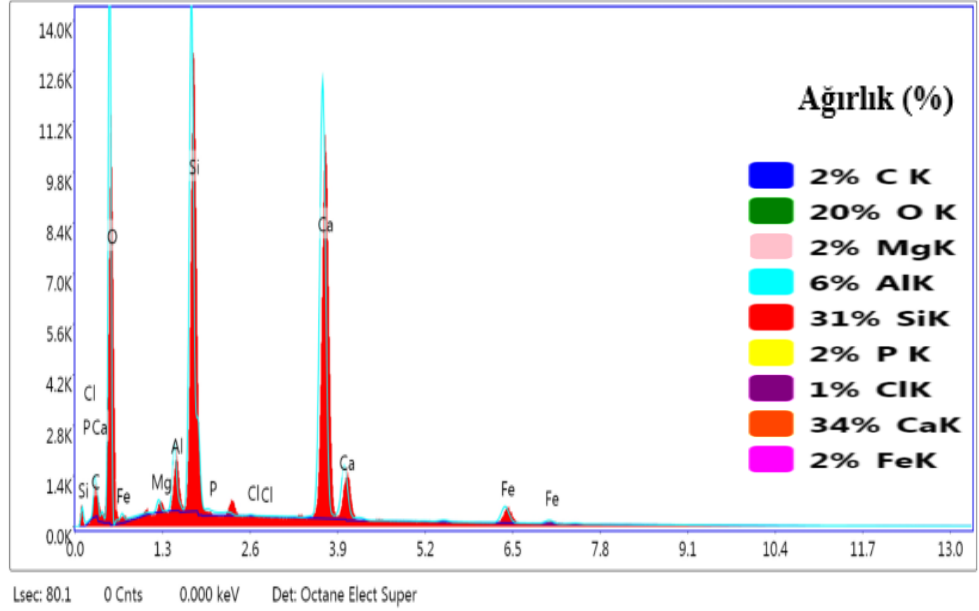


Şekil 4.66. 100GU karışımının SEM ve EDS görüntüsü

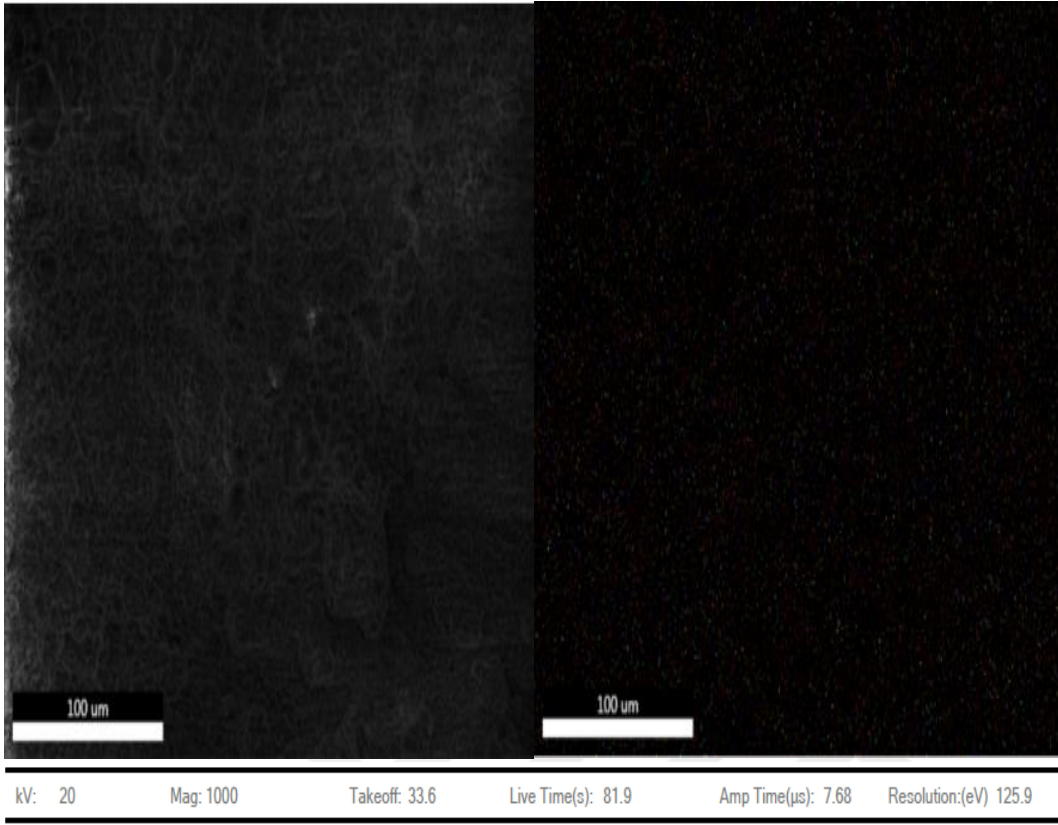
Şekil 4.62-66 incelendiğinde, bakterisiz %100 kireç taşı içeren karışımdan alınan örneğin yüzey taraması neticesinde, kalsiyum oranı %23, silisyum oranı %45, oksijen oranı %21, karbon oranı %2'dir. Temel bağlayıcılık özelliğini sağlayan C-S-H yapısının gözlemlenmesi nedeniyle element oranlarının bu şekilde olduğu düşünülmektedir. Bakterisiz %100 GDA içeren karışımlardan alınan örneğin yüzey taraması neticesinde ise, kalsiyum oranı %31, silisyum oranı %39, oksijen oranı %20, karbon oranı %3'tür. Kalsiyum oranında %8'lik bir artış meydana gelirken, silisyum oranı %6 azalmış, karbon oranı %1 artmıştır. Bunun nedeni kireç taşından farklı olarak GDA'nın karbonatlaşma özelliğine daha fazla sahip olması olabilir. Bakterili %100 GDA içeren karışımlar incelendiğinde ise bakterili tüm besi ortamlarında kalsiyum oranı ve karbon oranı artmıştır. Kalsiyum oranı en fazla bakterisiz %100 GDA içeren karışımlara göre %32 artarak %63, karbon oranı ise %4 artarak %7 olarak bulunmuştur. Kalsiyum ve karbonun artmasının bakteri etkisiyle oluşan kalsiyum karbonat içeriğinin artması nedeniyle olduğu düşünülmektedir.



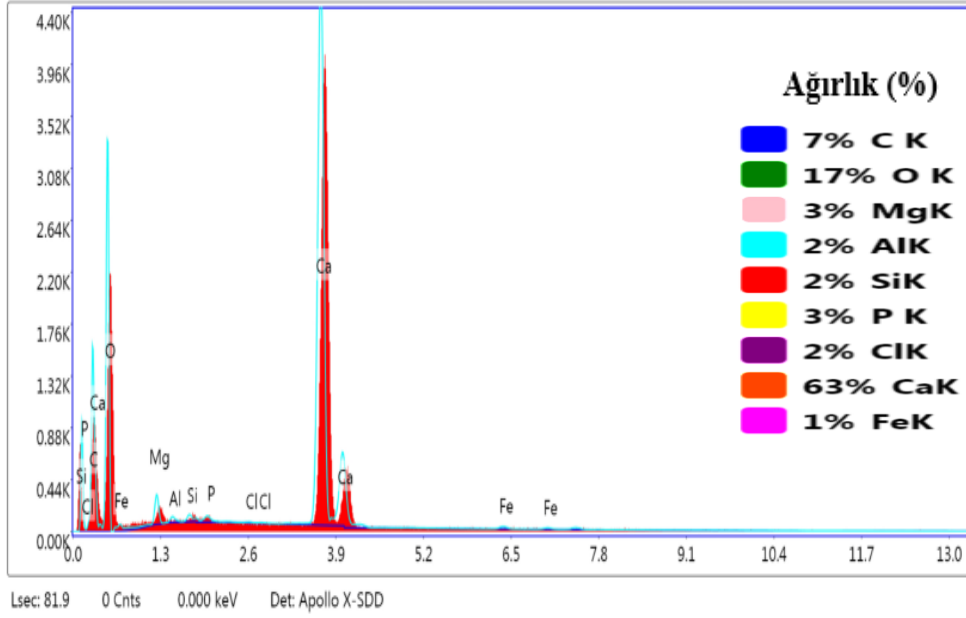
Sum Spectrum



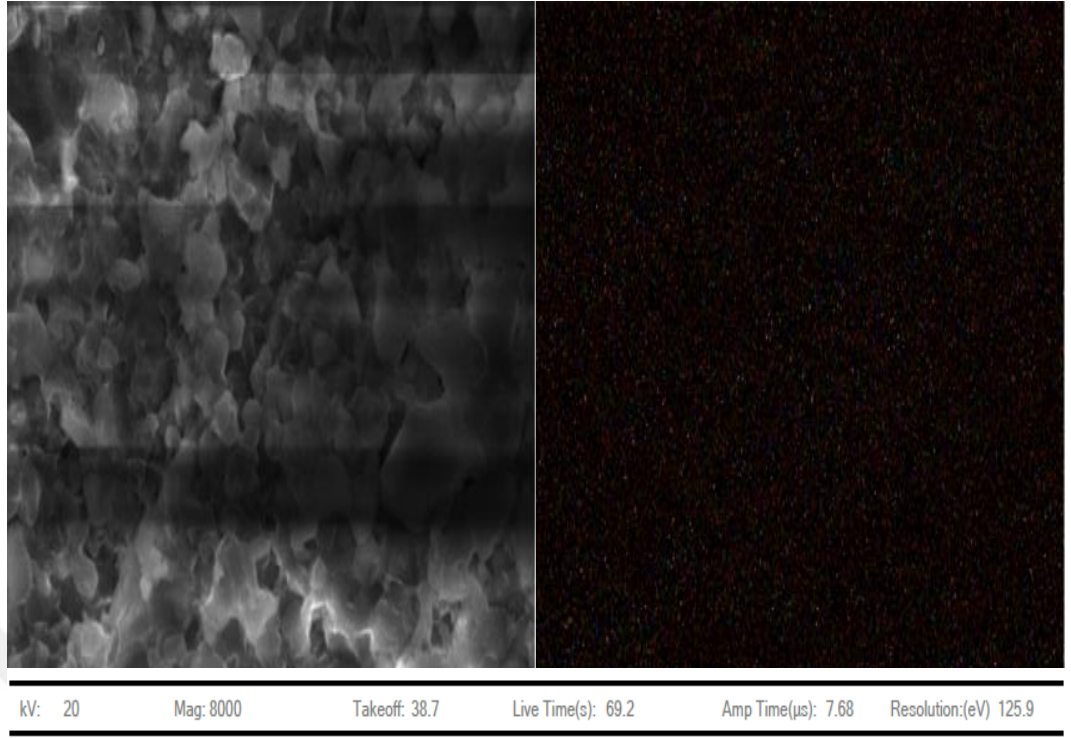
Şekil 4.67. 10GNB karışımının SEM ve EDS görüntüsü



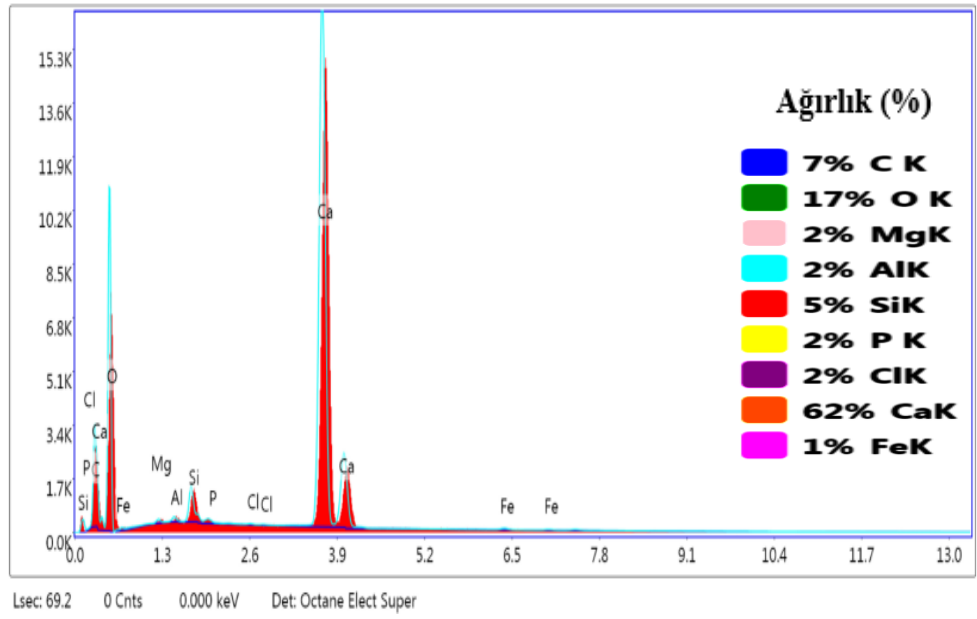
Sum Spectrum



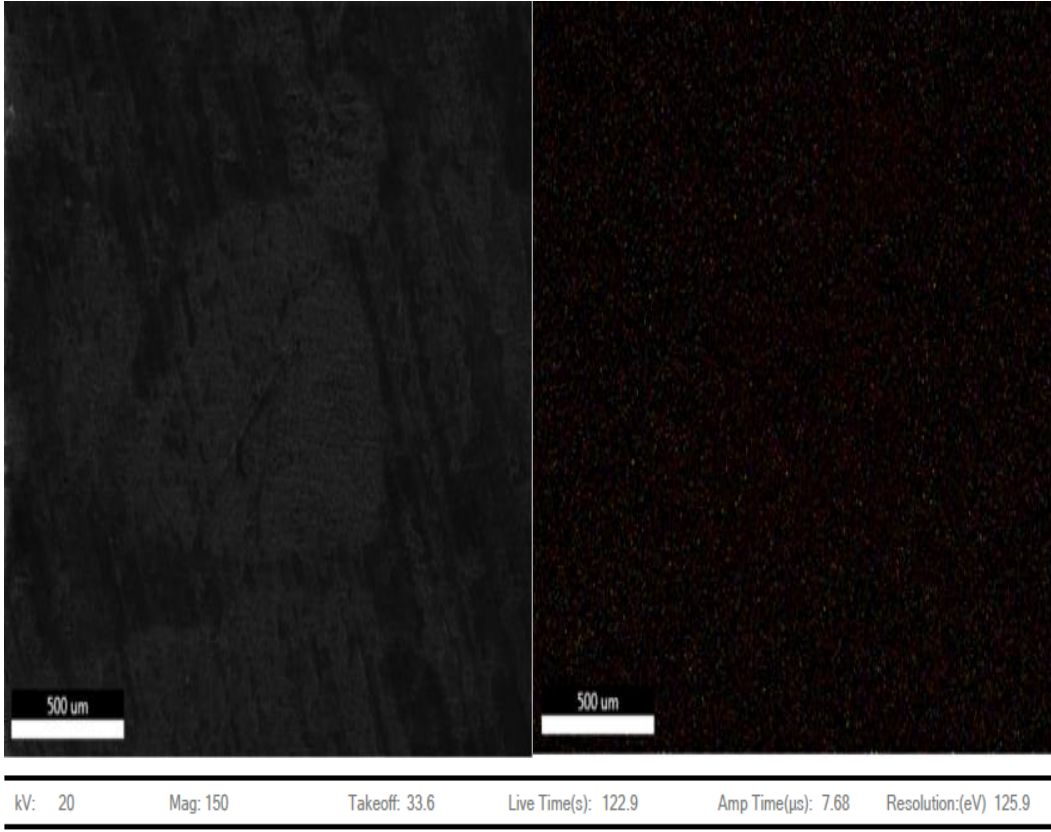
Şekil 4.68. 10GT karışımının SEM ve EDS görüntüsü



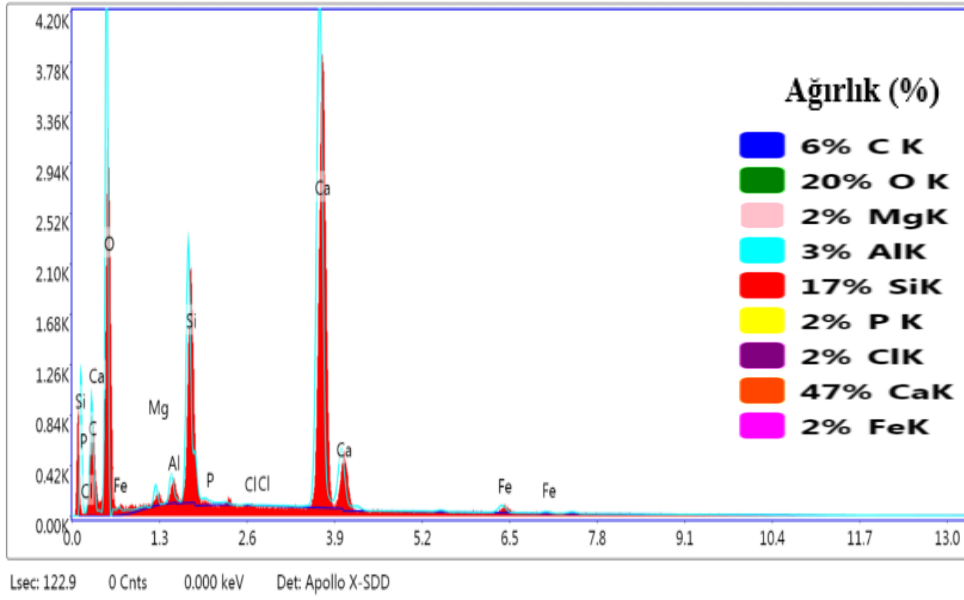
Sum Spectrum



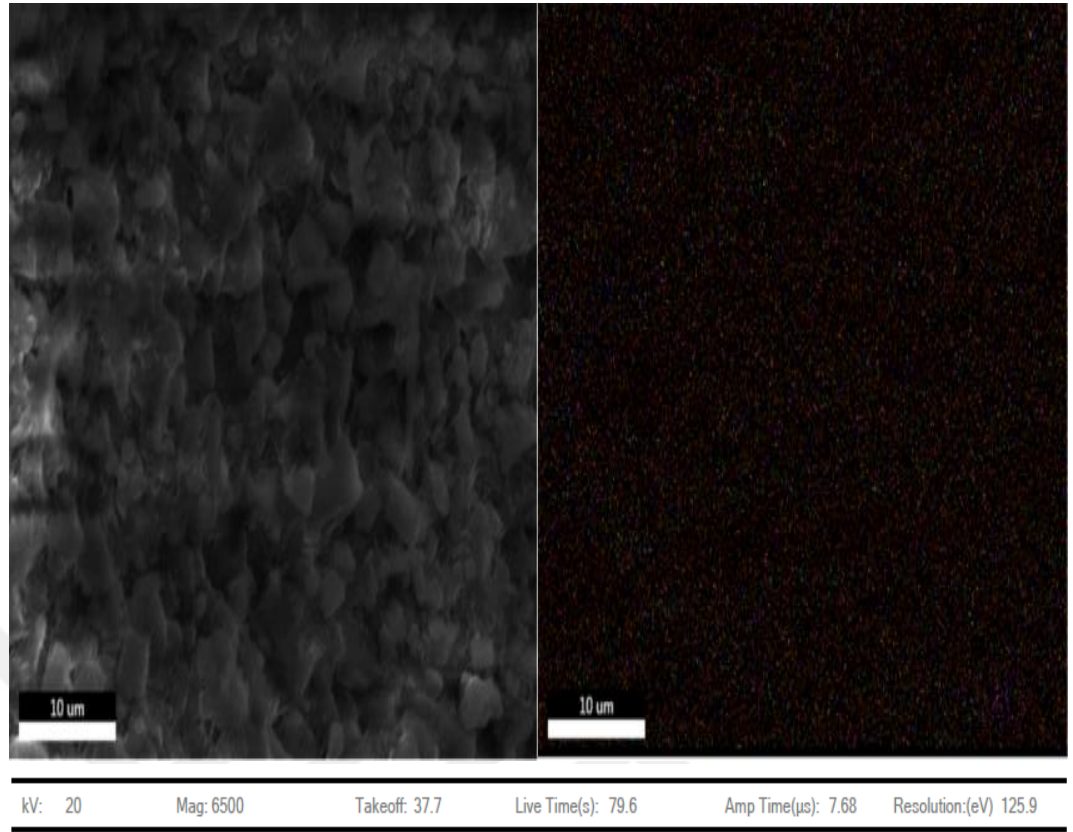
Şekil 4.69. 10GM karışımının SEM ve EDS görüntüsü



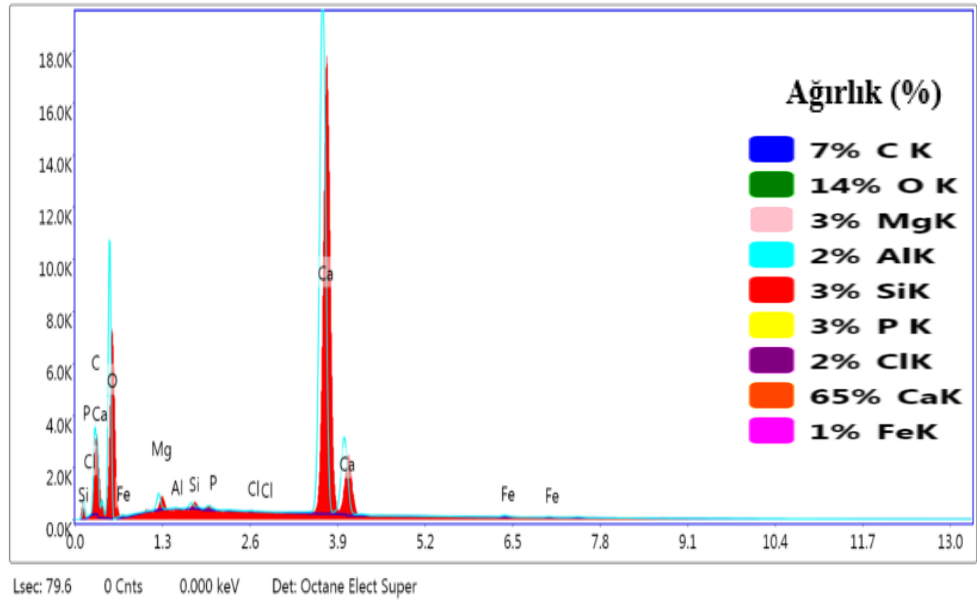
Sum Spectrum



Şekil 4.70. 10GU karışımının SEM ve EDS görüntüsü



Sum Spectrum



Şekil 4.71. 10GUC karışımının SEM ve EDS görüntüsü

Şekil 4.67-71’de karışımlardan alınan örneğin yüzey taraması sonucunda, bakterisiz %10 GDA içeren karışımlarda kalsiyum %34, silisyum %31, oksijen %20, karbon %2 olarak bulunmuştur. Bakterisiz %100 GDA karışımına benzer şekilde C-S-H yapısı nedeniyle element ağırlık oranlarının bu şekilde ortaya

çıktığı düşünülmektedir. Bakterili karışımlar incelendiğinde ise tüm bakterili ortamların kullanıldığı %10 GDA karışımlarında, kalsiyum ve karbon oranları artmış, en fazla sırasıyla %65 ve %7 mertebesine ulaşmıştır. Bu değişime bakteriyel etkiyle numunelerin iç yapısında oluşan kalsiyum karbonatın neden olduğu düşünülmektedir. Bakterili %100 GDA içeren karışımların iç yapılarında bakterili %10 GDA içeren karışımlara göre ciddi boyutta farklılıklar gözlemlenmemiştir.

Literatür incelendiğinde Bhaskar vd.(2017), Siddique ve Chahal (2011), Chahal vd. (2011), Mondal ve Gosh (2018), Nain vd. (2019) çalışmalarında SEM ve EDS analizleri sonucunda benzer sonuçlar elde ederek, kalsiyum karbonat oluşumunu destekleyen kalsiyum ve karbon elementlerinin artışı gözlemlenmiştir.

5. SONUÇLAR

Tez kapsamında dört farklı bakterili besi ortamının GDA ve pomza agregalarına kapsüllenmesiyle hazırlanan, harç karışımlarının üzerinde yapılan deneylerin sonuçlarına dayanarak, aşağıdaki bulgulara ulaşılmıştır.

- Bakterili besi ortamlarından TSB ortamının 100 GDA karışımlarına kapsüllenmesi kontrol karışımına kıyasla 28 günlük basınç dayanımını %63, eğilme dayanımını ise %38 oranında düşürerek en kötü performansı sergilemiştir.

- Bakterili TSB besi yerinin kapsüllendiği GDA ve pomza karışımlarında basınç ve eğilme dayanımı çoğunlukla düşmektedir.

- Bakterili üre-kalsiyum fosfat besi yerinin kapsüllendiği karışımlarda, 100 GDA haricindeki GDA ve pomza ikame oranlarında çoğunlukla basınç ve eğilme dayanımı artmaktadır. Bu besi yerinin kapsüllendiği 30 GDA karışımı 28 günlük basınç dayanımını %13 oranında arttırarak iyi bir sonuç vermiştir.

- Bakterili besi ortamları içerisinde basınç ve eğilme dayanımı açısından en iyi sonucu veren üre-kalsiyum klorür ortamının kapsüllendiği karışımlardır. 10 P karışımı 28 günlük basınç dayanımını %24 oranında, 28 günlük eğilme dayanımını ise %21 oranında arttırarak en iyi performansı göstermiştir.

- En yüksek UPV değeri üre-kalsiyum klorür ortamının kapsüllenmiş olduğu 10 P karışımlarında görülmüş, bakterisiz kontrol karışımına göre %23 oranında UPV değerinde bir artış meydana gelmiştir.

- Bakterili karışımlar bakterisiz kontrol karışımlarına kıyasla fiziksel özellikleri gelişmiştir. En iyi performansı bakterili üre-kalsiyum fosfat, üre-kalsiyum klorür ortamlarının kullanıldığı karışımlar göstermiştir. Bakterisiz karışımlara göre toplam boşluk oranları ve su emme oranları %62 oranında azalmış, birincil kılcal su emme hızlarında %53'e varan oranlarda azalmalar görülürken, ikincil kılcal su emme hızlarında %89'a varan düşüşler gözlemlenmiştir.

- Bakterisiz GDA ve pomza karışımları incelendiğinde pomzanın su emme oranının GDA karışımlarının su emme oranına göre yüksek çıktığı görülmektedir. Bakterili karışımlar incelendiğinde ise %30 ve altı ikame oranlarında pomza karışımlarının su emme oranının, çoğunlukla GDA karışımlarının su emme oranlarına göre daha düşük olduğu görülmektedir.

- Kapsülleme etkisi incelendiğinde, kapsüllenmeden karışıma eklenen bakterili ortamın bakterisiz kontrol karışımlarına kıyasla fiziksel ve mekanik özellikleri geliştirdiği fakat kapsülleme yapılmış olan karışımlara göre daha düşük performans gösterdiği görülmüştür.

- Çalışma kapsamında kullanılan tüm besi ortamlarıyla hazırlanan harç numunelerinde oluşturulan 0,1-0,3 mm arası genişliğe ve 30-35 mm arası derinliğe sahip çatlakların bakteriyel etkiyle CaCO_3 birikmesi sonucunda 15 ile 28 gün arasında onarıldığı gözlemlenmiştir.

- Numunelerinin dökümünden 3 ay sonra harç numunesinden alınan örneklerden, bakterili üre-kalsiyum fosfat ortamının kapsüllendiği 100 GDA ve 100 P karışımlarında canlılık görülmüş ve tekrar bakteri çoğaltılabilmektedir.

- Sonuçlar incelendiğinde bakterili besi ortamlarının kapsüllendiği harç karışımlarında, üre-kalsiyum fosfat ve üre-kalsiyum klorür besi ortamlarının, MLB ve TSB besi ortamlarına göre fiziksel ve mekanik özellikler yönünden daha iyi performans gösterdiği görülmektedir. Bakterininin aktivitesini ve canlılığının üre ve kalsiyum içeriğine sahip besi ortamlarında arttığı belirlenmiştir.

6. ÖNERİLER

Tez çalışması kapsamında elde edilen çıkarımlar ve edinilen tecrübe ile, bu konuda çalışma yapacak araştırmacılara aşağıdaki çalışma alanları önerilebilir.

- Bakterili üre-kalsiyum klorür besi yeri ile %30, %70, %100 ikame oranlarındaki GDA ve pomza agregalarına kapsüllenenek dökülen numunelerin fiziksel ve mekanik özellikleri incelenebilir.
- Harç karışımlarında yapılan bu deneyler beton karışımları için uygulanabilir.
- Hazırlanan numunelerdeki bakterilerin fiziksel ve mekanik özelliklere etkisi 3 ay, 6 ay ve 1 yıl gibi daha uzun süreçler için incelenebilir.
- Bakterilerin canlılık kontrolleri daha uzun süreçlerde incelenebilir.
- Bakteri konsantrasyonunun ve bakteri besi ortamlarındaki içeriklerin değiştirilmesiyle optimizasyonlar yapılarak besi ortamları çeşitlendirilebilir.
- Daha büyük çatlak açıklıklarında daha uzun süreli iyileştirme özellikleri incelenebilir.
- Beton üretim endüstrisinde kullanılabilmesi için fizibilite çalışmaları yapılarak maliyetleri belirlenebilir.



KAYNAKLAR DİZİNİ

- ACI Committee 224--Cracking**, 2007, Causes, Evaluation, and Repair of Cracks in Concrete Structures. American Concrete Institute.
- Alazhari, M., Sharma, T., Heath, A., Cooper, R. and Paine, K.**, 2018, Application of expanded perlite encapsulated bacteria and growth media for self-healing concrete. *Construction and Building Materials*, 160, pp.610-619.
- ASTM C1585**, 2013, Standard Test Method for Measurement of Rate of Absorption of Water by Hydraulic-Cement Concretes, Annual Book of ASTM Standards, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, PA, USA
- ASTM C597**, 2016, Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete Annual Book of ASTM Standards, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, PA, USA
- Bai, C.P. and Varghese, S.**, 2014, An Experimental Investigation on The Strength Properties of Fly Ash Based Bacterial Concrete. *International Journal of Innovative Research in Advanced Engineering*, 3(8), pp.64-69.
- Bhaskar, S., Hossain, K.M.A., Lachemi, M., Wolfaardt, G. and Kroukamp, M.O.**, 2017, Effect of self-healing on strength and durability of zeolite-immobilized bacterial cementitious mortar composites. *Cement and Concrete Composites*, 82, pp.23-33.
- Chahal, N., Siddique, R. and Rajor, A.**, 2012, Influence of bacteria on the compressive strength, water absorption and rapid chloride permeability of fly ash concrete. *Construction and Building Materials*, 28(1), pp.351-356.
- Chen, H., Qian, C. and Huang, H.**, 2016, Self-healing cementitious materials based on bacteria and nutrients immobilized respectively. *Construction and Building Materials*, 126, pp.297-303.
- De Belie, N., Wang, J., Bundur, Z.B. and Paine, K.**, 2018, Bacteria-based concrete. In *Eco-efficient repair and rehabilitation of concrete infrastructures* (pp. 531-567). Woodhead publishing.
- Evangelista, L., Guedes, M., De Brito, J., Ferro, A.C. and Pereira, M.F.**, 2015, Physical, chemical and mineralogical properties of fine recycled aggregates made from concrete waste. *Construction and building materials*, 86, pp.178-188

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Ghosh, P., Mandal, S., Chattopadhyay, B.D. and Pal, S.,** 2005, Use of microorganism to improve the strength of cement mortar. *Cement and Concrete Research*, 35(10), pp.1980-1983.
- Gupta, S., Kua, H.W. and Dai Pang, S.,** 2018, Healing cement mortar by immobilization of bacteria in biochar: An integrated approach of self-healing and carbon sequestration. *Cement and Concrete Composites*, 86, pp.238-254.
- Huynh, N.N.T., Phuong, N.M., Toan, N.P.A. and Son, N.K.,** 2017, Bacillus subtilis HU58 Immobilized in micropores of diatomite for using in self-healing concrete. *Procedia engineering*, 171, pp.598-605.
- Jadhav, U.U., Lahoti, M., Chen, Z., Qiu, J., Cao, B. and Yang, E.H.,** 2018, Viability of bacterial spores and crack healing in bacteria-containing geopolymer. *Construction and Building Materials*, 169, pp.716-723.
- Jonkers, H.M., Thijssen, A., Muyzer, G., Copuroglu, O. and Schlangen, E.,** 2010, Application of bacteria as self-healing agent for the development of sustainable concrete. *Ecological engineering*, 36(2), pp.230-235.
- Khaliq, W. and Ehsan, M.B.,** 2016, Crack healing in concrete using various bio influenced self-healing techniques. *Construction and Building Materials*, 102, pp.349-357.
- Ling, H. and Qian, C.,** 2017, Effects of self-healing cracks in bacterial concrete on the transmission of chloride during electromigration. *Construction and Building Materials*, 144, pp.406-411.
- Luo, J., Chen, X., Crump, J., Zhou, H., Davies, D.G., Zhou, G., Zhang, N. and Jin, C.,** 2018, Interactions of fungi with concrete: Significant importance for bio-based self-healing concrete. *Construction and Building Materials*, 164, pp.275-285.
- McNeil, K. and Kang, T.H.K.,** 2013, Recycled concrete aggregates: A review. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 7(1), pp.61-69.
- Mondal, S. and Ghosh, A.D.,** 2018, Investigation into the optimal bacterial concentration for compressive strength enhancement of microbial concrete. *Construction and Building Materials*, 183, pp.202-214.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Mondal, S., Das, P. and Chakraborty, A.K.**, 2017, Application of bacteria in concrete. *Materials Today: Proceedings*, 4(9), pp.9833-9836.
- Nain, N., Surabhi, R., Yathish, N.V., Krishnamurthy, V., Deepa, T. and Tharannum, S.**, 2019, Enhancement in strength parameters of concrete by application of Bacillus bacteria. *Construction and Building Materials*, 202, pp.904-908.
- NRMCA National Ready Mix Concrete Assosiation**, 2012, Concrete CO₂ Fact Sheet <https://www.nrmca.org/sustainability/CONCRETE%20CO2%20FACT%20SHEET%20FEB%202012.pdf>, (Erişim Tarihi 22 Şubat 2019)
- Ramachandran, S.K., Ramakrishnan, V. and Bang, S.S.**, 2001, Remediation of concrete using micro-organisms. *ACI Materials Journal-American Concrete Institute*, 98(1), pp.3-9.
- Rostam, S.**, 2005, Service life design of concrete structures-a challenge to designers as well as to owners.
- Siddique, R., Jameel, A., Singh, M., Barnat-Hunek, D., Ait-Mokhtar, A., Belarbi, R. and Rajor, A.**, 2017, Effect of bacteria on strength, permeation characteristics and micro-structure of silica fume concrete. *Construction and Building Materials*, 142, pp.92-100.
- Silva, F.**, 2015, Up-scaling the production of bacteria for self-healing concrete application. PHd Thesis *Ghent University, Ghent*, p.220 (Published)
- Statista**, 2017, Globally Cement Production Statistic <https://www.statista.com/statistics/219343/cement-production-worldwide/>, (Erişim Tarihi: 22 Şubat 2019)
- Strategic Development Council**, 2006, A Vision for the Concrete Repair, Protection and Strengthening Industry, vision 2020
- TS EN 1097-6**, 2013, Agregaların mekanik ve fiziksel özellikleri için deneyler bölüm 6: Tane yoğunluğuve su emme oranının tayini, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 12390-3**, 2010, Beton-Sertleşmiş Beton Deneyleri- Bölüm 3: Deney Numunelerinde Basınç Dayanımının Tayini, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- TS EN 12390-5**, 2010, Beton - Sertleşmiş beton deneyleri - Bölüm 5: Deney numunelerinde eğilme dayanımının tayini, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 196-1**, 2016, Çimento deney metotları - Bölüm 1: Dayanım tayini, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 480-11**, 2008, Kimyasal katkıları - Beton, harç ve şerbet için - Deney metotları - bölüm 11: Sertleşmiş betonda hava boşluğu özelliklerinin tayini, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 933-1**, 2012, Agregaların Geometrik Özellikleri İçin Deneyler-Bölüm 1: Tane Büyüklüğünün Dağılımının- Eleme Yöntemi, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- Türkiye Hazır Beton Birliği**, 2017, Türkiye Hazır Beton Sektörü İstatistikleri, <http://www.thbb.org/media/290192/thbb-%C4%B0statistikler-2017.pdf>, (Erişim Tarihi: 21 Şubat 2019)
- Van Breugel, K.**, 2007, April. Is there a market for self-healing cement-based materials. In *Proceedings of the first international conference on self-healing materials* (pp. 1-9).
- Van Tittelboom, K. and De Belie, N.**, 2013, Self-healing in cementitious materials—A review. *Materials*, 6(6), pp.2182-2217.
- Vijay, K., Murmu, M. and Deo, S.V.**, 2017, Bacteria based self healing concrete—A review. *Construction and Building Materials*, 152, pp.1008-1014.
- Wang, J., Van Tittelboom, K., De Belie, N. and Verstraete, W.**, 2012, Use of silica gel or polyurethane immobilized bacteria for self-healing concrete. *Construction and building materials*, 26(1), pp.532-540.
- Wu, M., Johannesson, B. and Geiker, M.**, 2012, A review: Self-healing in cementitious materials and engineered cementitious composite as a self-healing material. *Construction and Building Materials*, 28(1), pp.571-583.
- Zhang, J., Liu, Y., Feng, T., Zhou, M., Zhao, L., Zhou, A. and Li, Z.**, 2017, Immobilizing bacteria in expanded perlite for the crack self-healing in concrete. *Construction and Building Materials*, 148, pp.610-617.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

Zhang, J.L., Wu, R.S., Li, Y.M., Zhong, J.Y., Deng, X., Liu, B., Han, N.X. and Xing, F., 2016, Screening of bacteria for self-healing of concrete cracks and optimization of the microbial calcium precipitation process. *Applied microbiology and biotechnology*, 100(15), pp.6661-6670.





TEŞEKKÜR

Bu çalışma süresince emeği geçen herkese, özellikle kıymetli görüşlerinden yararlandığımız ve yakın ilgisini esirgemeyen, değerli katkılarını aldığımız tez yöneticimiz, sayın danışmanımız Prof. Dr. Şemsi YAZICI'ya, laboratuvar deneylerinde verdiği bilgi ve gösterdiği ilgiden dolayı Yük. İnş. Müh. Hojjat HOSSEINNEZHAD'a, laboratuvardaki ve tez yazımında yardımlarından dolayı Yük. İnş. Müh. Şevket ORHAN, Yük. İnş. Müh. Onurcan BOYACI ve Yük. İnş. Müh. Daniel HATUNGİMANA'ya, bakteri temini ve bakteriyle ilgi deneyler için desteklerini aldığım Ege Üniversitesi Biyokimya Bölümü'nden Doç. Dr. Alper AKKAYA, Melis KILIÇ, Sevinç AKSOY, Fulya BÖREKÇİ ve Emine ERDOĞAN ÖZŞEKER'e, malzeme temininden dolayı İSTAÇ'a, Ege Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'ne teşekkürü bir borç bilirim.

ÖZGEÇMİŞ

Canberk GÜLLER, 1989 yılında Eskişehir’de doğdu. İlköğretim ve liseyi Eskişehir’de tamamladıktan sonra 2013 yılında Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü’nden mezun oldu. 2015 yılında Ege Üniversitesi Fen bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Yapı Malzemesi Bilim Dalı’nda eğitimine başladı. İleri düzeyde İngilizce ve orta düzeyde Fransızca bilmektedir.

