



**VİRİDİBACİLLUS ARENOSİİ VE BACİLLUS
PASTEURİİ BAKTERİLERİNİN KENDİ KENDİNİ
ONARAN BETON DAYANIMINA ETKİSİ**

Majid ATASHAFRAZEH

**Doktora Tezi
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
Doç. Dr. A. Ferhat BİNGÖL
2018
Her hakkı saklıdır**

**ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

DOKTORA TEZİ

**VİRİDİBACİLLUS ARENOSİİ VE BACİLLUS PASTEURİİ
BAKTERİLERİNİN KENDİ KENDİNİ ONARAN BETON
DAYANIMINA ETKİSİ**

Majid ATASHAFRAZEH

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**ERZURUM
2018**

Her hakkı saklıdır



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



TEZ ONAY FORMU

**VİRİDİBACİLLUS ARENOSİİ VE BACİLLUS PASTEURİİ BAKTERİLERİNİN
KENDİ KENDİNİ ONARAN BETON DAYANIMINA ETKİSİ**

Doç. Dr. A. Ferhat BİNGÖL danışmanlığında, Majid ATASHAFRAZEH tarafından hazırlanan bu çalışma 16/03/2018 Tarihinde aşağıdaki jüri tarafından İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı – Yapı Bilim Dalı’nda Doktora tezi olarak **oybirliği/oy çokluğu (5/5)** ile kabul edilmiştir.

Başkan: Prof. Dr. Kambiz RAMYAR

İmza:

Üye: Prof. Dr. Şemsi YAZICI

İmza:

Üye: Prof. Dr. Remzi ŞAHİN

İmza:

Üye: Prof. Dr. Osman Nuri ATA

İmza:

Üye: Doç. Dr. A. Ferhat BİNGÖL

İmza:

Yukarıdaki sonuç;

Enstitü Yönetim Kurulu. 19.03.2018 tarih ve. 16 / ... 32 nolu kararı ile onaylanmıştır.

**Prof. Dr. Cavit KAZAZ
Enstitü Müdürü**

Not: Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaklardan yapılan bildirilerin, çizelge, şekil ve fotoğrafların kaynak olarak kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir.

ÖZET

Doktora Tezi

VİRİDİBACİLLUS ARENOSII VE BACİLLUS PASTEURİİ BAKTERİLERİNİN KENDİ KENDİNİ ONARAN BETON DAYANIMINA ETKİSİ

Majid ATASHAFRAZEH

Atatürk Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
Yapı Bilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. A. Ferhat BİNGÖL

Günümüzde en yaygın kullanılan yapı malzemesi olan betonda zaman içerisinde farklı sebeplerle çeşitli miktar ve boyutlarda çatlaklar gelişmektedir. Bu çatlaklar zamanla ilerleyip betonda hasara yol açar. Dolayısıyla çatlak gelişimin engellemesi betonun ömrünü uzatmak için önemli bir husustur. Bu amaçla son yıllarda kendi kendini onaran beton kavramı ortaya çıkmış ve araştırmacılar farklı yöntemler kullanarak beton çatlaklarını engellemek için çeşitli çalışmalar yapmışlardır. Bu yöntemler arasında betonda içi boş lifler, mikro enkapsülasyon, şişen maddeler ve mineral katkılar, bakteriler ve şekil bellekli malzemelerin kullanımı sayılabilir.

Bu çalışmada bakterilerin betonun kendi kendini onarımı üzerine etkisi araştırılmıştır. Daha önce yapılan çalışmalarda genellikle Bacillus Pasteurii kullanıldığı belirlenmiştir. Yapılan deneysel çalışmada literatürde yer alan araştırma sonuçları ile kıyaslamak üzere B. Pasturii ve daha önce betonda kullanılmamış olan Viridibacillus Arenosii kullanılarak harç ve beton numuneleri üretilmiştir. Her iki bakteri türü 10^7 , 10^8 ve 10^9 CFU (canlı hücre/ml) konsantrasyonlarında numunelere ilave edilmiştir. Bazı gruplara besin olarak kalsiyum laktat eklenmiştir. Ayrıca kür koşullarının etkisini belirlemek için normal su kürü ve bakterili su kürü uygulanmıştır. Numuneler üzerinde basınç ve çekme dayanımları belirlenmiş ve alınan örnekler üzerinde SEM fotoğrafları çekilmiş ve XRD ölçümleri yapılmıştır.

Deneysel sonuçlar her iki bakterinin de 10^8 CFU oranında kullanıldığında en yüksek dayanımları sağladığını ortaya koymuştur. Gerek deney sonuçları ile belirlenen dayanım artışı, gerekse de SEM fotoğraflarında elde edilen görüntüler bakterilerin betonda besini tüketerek CaCO_3 (kalsit) oluşturduğunu ve böylece betondaki çatlak gelişimini engellediğini göstermiştir. Sonuç olarak B. Pasturii ve V. Arenosii bakterilerinin uygun besin ile birlikte kullanılması durumunda, betonda çatlak gelişimini engellemede olumlu etki yaptığı ve dayanımlarda artışa sebep olduğu belirlenmiştir.

2018, 100 sayfa

Anahtar Kelimeler: Kendi Kendini Onaran Beton, Çatlak, Bakteri, Bacillus Pasteurii, Viridibacillus Arenosii, Kalsit.

ABSTRACT

Ph.D. Thesis

EFFECT OF VIRIDIBACILLUS ARENOSII AND BACILLUS PASTEURII BACTERIA ON THE STRENGTH OF SELF-HEALING CONCRETE

Majid ATASHAFRAZEH

Atatürk University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Civil Engineering
Structural Mechanics Division

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. A. Ferhat BİNGÖL

Concrete, which is the most widely used building material today, develops cracks in various amounts and sizes with different reasons over time. These cracks progress over time and cause damage to the concrete. Therefore, the prevention of crack growth is an important factor in extending the life of concrete. For this purpose, the concept of self-healing concrete has emerged in recent years and researches have made various studies to prevent concrete cracks by using different methods. These methods for self-healing concrete include hollow fibers, microencapsulation, inflatable materials and mineral additives, bacteria and shape memory materials.

In this study, the effect of bacteria on self-healing concrete was investigated. Previous studies have generally used *Bacillus Pasteurii*. In this experimental study, mortar and concrete specimens were produced by using *B. Pasturii* and also *Viridibacillus Arenosii*, which were not studied previously, in order to compare with *B. Pasturii* research results. Both bacterial species were added to the samples in quantities of 10^7 , 10^8 and 10^9 CFU (Coloni Forming Unit). Some groups were supplemented with calcium lactate as nutrient. In addition, normal water and bacterial water cure have been applied to determine the effect of curing conditions. compressive and tensile strengths were determined on the samples and SEM photographs and XRD measurements were take on the specimens chosen from the test specimens.

The experimental results showed that the best results were obtained in the case of using 10^8 CFU bacteria in both group. Both the increment in strength determined by the test results and the SEM photographs show that the bacteria consume nutrients in the concrete to form CaCO_3 (calcite) and thus prevent crack growth in the concrete.

As a result, *B. Pasturii* and *V. Arenosii* bacteria were found to have a beneficial effect on preventing crack growth in concrete upon using with a proper nutrition.

2018, 100 pages

Keywords: Self-healing Concrete, Crack, Bacteria, *Bacillus Pasteurii*, *Viridibacillus Arenosii*, Calcite.

TEŞEKKÜR

Doktora tezinin her aşamasında çalışmalarına tecrübeleri ile yön veren, bilgisini, teşvik ve desteğini esirgemeyen danışman hocam Sayın Doç. Dr. A. Ferhat BİNGÖL'e teşekkür borç bilirim.

Tez çalışmam boyunca bir araya gelerek bilgi, fikir ve tecrübeleri ile önemli katkılar sağlayan Sayın Prof. Dr. Osman Nuri ATA ve Sayın Doç. Dr. Remzi ŞAHİN ve Sayın Doç. Dr. Özlem BARIŞ'a içten teşekkürlerimi sunarım.

Deneyisel çalışma esnasında büyük yardım ve desteklerini gördüğüm Akgün İnşaat Ltd. Şti. ve Fors Yapı Ltd. Şti.'ye ve ayrıca laboratuvar teknisyeni Sayın İlhami AYHAN'a teşekkür ederim.

Çalışmada emeği geçen ismini sayamadığım herkese teşekkür ederim.

Hayatımın her döneminde yanımda olan, destek ve yardımlarını hiçbir zaman esirgemeyen kıymetli ailemin bütün bireylerine minnet ve teşekkürlerimi sunarım.

Majid ATASHAFRAZEH

Mart 2018

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ	x
1. GİRİŞ.....	1
2. KAYNAK ÖZETLERİ	5
3. MATERYAL ve YÖNTEM.....	15
3.1. Materyal.....	15
3.1.1. Deneylerde kullanılan malzemeler.....	15
3.1.1.a. Çimento	15
3.1.1.b. Beton ve harçta kullanılan bakteriler.....	17
3.1.1.c. Bakteri inokülasyonu	18
3.1.1.d. Agrega	18
3.1.1.e. Karışım suyu.....	19
3.1.2. Bakteri ekimi için kullanılan malzemeler	19
3.1.2.a. Üre ($\text{CH}_4\text{N}_2\text{O}$).....	20
3.1.2.b. Kalsiyum klorür dihidrat ($\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$).....	20
3.1.2.c. Sodyum bikarbonat (NaHCO_3).....	20
3.1.2.d. Amonyum klorür (Ammonium Chloride)- NH_4Cl	21
3.1.2.e. Besin TSB (Tryptic Soy Broth)	21
3.1.2.f. Kalsiyum laktat (Calcium lactate).....	22
3.1.2.g. Ultura saf su.....	22
3.1.2.h. HCl (Hidroklorik asit) ve NaOH (Sodyum hidroksit).....	22
3.1.3. Harç ve beton numuneler için laboratuvar malzemeleri	22
3.1.4. Bakteri ekimi için kullanılan alet ve cihazlar	23
3.1.5. İyapı incelemeleri için kullanılan cihazlar.....	26
3.2. Yöntem	26
3.2.1. Agrega deneylerinde uygulanan yöntemler.....	26

3.2.2. Bakteri ekimi için karışım hesapları.....	27
3.2.3. Bakteri Sayımı.....	30
3.2.4. Ön deneme harç numuneleri için karışım hesabı	31
3.2.5. Harç numuneleri için karışım hesabı.....	32
3.2.6. Beton numuneleri için karışım hesabı	33
3.2.7. Betonun kürü (bakımı)	34
3.2.8. Betonun basınç dayanımı tayini yöntemi	35
3.2.9. Betonun eğilme dayanımı tayini yöntemi	35
3.2.10. XRD cihazı ölçüm yöntemi.....	37
3.2.11. SEM Cihazının Çalışma Prensipleri.....	41
4. ARAŞTIRMA BULGULARI	42
4.1. Agrega Deneyleri	42
4.1.1. Elek analizi (Granülometri).....	42
4.1.2. Birim ağırlık	43
4.1.3. Organik madde tayini	43
4.1.4. İnce madde oranı tayini	44
4.1.5. Tane yoğunluğu ve su emme oranı tayini	44
4.2. Taze Betonda Çökme Deneyi.....	45
4.3. Ön Deneme Harç Numunelerinin Basınç Dayanımı	46
4.4. Harç Numunelerin Basınç Dayanımı	48
4.5. Beton Numunelerin Basınç Dayanımı.....	51
4.5.1. Normal su kürü uygulanan beton numunelerinin basınç dayanımı.....	51
4.5.2. Bakterili su kürü uygulanan beton numunelerinin basınç dayanımı	55
4.5.3. Betonun basınç dayanımında bakteri miktarının etkisi	60
4.5.4. Betonun basınç dayanımında bakteri türünün etkisi	60
4.5.5. Betonun basınç dayanımında kür koşullarının etkisi	61
4.6. Beton Numunelerin Eğilme Dayanımı	61
4.6.1. Normal su kürü uygulanan beton numunelerinin eğilme dayanımı	61
4.6.2. Bakterili su kürü uygulanan beton numunelerinin eğilme dayanımı	66
4.6.3. Betonun eğilme dayanımında bakteri miktarının etkisi	70
4.6.4. Betonun eğilme dayanımında bakteri türünün etkisi.....	70
4.7. Beton Numunelerinin XRD Ölçümleri.....	71

4.7.1. V. Arenosii bakterili numunelerin XRD sonuçları.....	71
4.7.2. B. Pasteurii bakterili numunelerin XRD sonuçları.....	75
4.8. Beton Numunelerinin EDAX Grafikleri ve SEM Görüntüleri.....	77
4.8.1. Beton numunelerinin EDAX grafikleri	77
4.8.2. Beton numunelerinin SEM görüntüleri	84
4.9. Beton Numunelerinde Kalsit Oluşumu ile Çatlak ve Boşlukların Kapanması ...	92
5. SONUÇ ve ÖNERİLER.....	93
KAYNAKLAR	96
ÖZGEÇMİŞ.....	101

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. Kendi kendini onaran beton	2
Şekil 1.2. Bakterilerin kalsit oluşturarak çatlakları doldurması	3
Şekil 3.1. Bakteri üretim aşaması (otoklav içerisinde bakteri üretimi).....	17
Şekil 3.2. Bacillus esaslı bakteri	18
Şekil 3.3. Besiyer hazırlanması	28
Şekil 3.4. Çözelti hazırlanması.....	28
Şekil 3.5. Çözeltinin steril filtreden geçirilme işlemi	29
Şekil 3.6. Çözeltinin besine eklenme işlemi	29
Şekil 3.7. Bakteri ekim işlemi	30
Şekil 3.8. McFarland Standartları	30
Şekil 3.9. Ön deneme harç numuneleri	32
Şekil 3.10. Eğilme deneyi yöntemi	36
Şekil 3.11. XRD cihazı.....	37
Şekil 3.12. X-ışınlarının (X-rays) kırılması	40
Şekil 3.13. Şematik olarak SEM cihazının çalışması.....	41
Şekil 4.1. Karışımda kullanılan agreganın granülometri eğrisi.....	43
Şekil 4.2. Karışımda kullanılan agregada organik madde tayini deneyi.....	44
Şekil 4.3. Ön deneme harç numunelerinin hazırlanıp kür edilmesi	48
Şekil 4.4. Harç numunelerinin 7 ve 28 günlük basınç dayanımları	50
Şekil 4.5. Normal su kürü uygulanan beton numunelerinin 7 günlük basınç dayanımları	54
Şekil 4.6. Normal su kürü uygulanan beton numunelerinin 28 günlük basınç dayanımları	54
Şekil 4.7. Bakterili su kürü uygulanan beton numunelerinin 7 günlük basınç dayanımları	58
Şekil 4.8. Bakterili su kürü uygulanan beton numunelerinin 28 günlük basınç dayanımları	58
Şekil 4.9. Bakterili su ve normal suda kür edilen beton numuneleri	59
Şekil 4.10. Eğilme deneyi için hazırlanan beton numuneleri.....	62

Şekil 4.11. Normal su kürü uygulanan beton numunelerinin 7 günlük eğilme dayanımları	65
Şekil 4.12. Normal su kürü uygulanan beton numunelerinin 28 günlük eğilme dayanımları	65
Şekil 4.13. Bakterili su kürü uygulanan beton numunelerinin 7 günlük eğilme dayanımları	69
Şekil 4.14. Bakterili su kürü uygulanan beton numunelerinin 28 günlük eğilme dayanımları	69
Şekil 4.15. XRD difroktagramı (Kontrol)	71
Şekil 4.16. XRD difroktagramı (Kontrol + Besin).....	71
Şekil 4.17. XRD difroktagramı (10^7 V. Arenosii)	72
Şekil 4.18. XRD difroktagramı (10^7 V. Arenosii + Besin)	72
Şekil 4.19. XRD difroktagramı (10^8 V. Arenosii)	73
Şekil 4.20. XRD difroktagramı (10^8 V. Arenosii + Besin)	73
Şekil 4.21. XRD difroktagramı (10^9 V. Arenosii)	74
Şekil 4.22. XRD difroktagramı (10^9 V. Arenosii +Besin)	74
Şekil 4.23. XRD difroktagramı (10^7 B. Pasteurii)	75
Şekil 4.24. XRD difroktagramı (10^8 B. Pasteurii)	75
Şekil 4.25. XRD difroktagramı (10^9 B. Pasteurii)	76
Şekil 4.26. Kalsit pikleri.....	77
Şekil 4.27. EDAX grafiği (Kontrol).....	78
Şekil 4.28. EDAX grafiği (Kontrol + Besin)	78
Şekil 4.29. EDAX grafiği (10^7 V. Arenosii)	79
Şekil 4.30. EDAX grafiği (10^7 V. Arenosii + Besin).....	79
Şekil 4.31. EDAX grafiği (10^8 V. Arenosii)	80
Şekil 4.32. EDAX grafiği (10^8 V. Arenosii + Besin).....	80
Şekil 4.33. EDAX grafiği (10^9 V. Arenosii)	81
Şekil 4.34. EDAX grafiği (10^9 V. Arenosii + Besin).....	81
Şekil 4.35. EDAX grafiği (10^7 B. Pasteurii)	82
Şekil 4.36. EDAX grafiği (10^8 B. Pasteurii)	82
Şekil 4.37. EDAX grafiği (10^9 B. Pasteurii)	83
Şekil 4.38. Kalsitin kristal yapısı (CaCO_3)	84

Şekil 4.39. CaCO ₃ (kalsit) SEM görüntüsü.....	85
Şekil 4.40. CaCO ₃ (kalsit) SEM görüntüsü.....	85
Şekil 4.41. CaCO ₃ (kalsit) SEM görüntüsü.....	86
Şekil 4.42. CaCO ₃ (kalsit) SEM görüntüsü.....	86
Şekil 4.43. Kontrol numunelerinin SEM görüntüsü.....	87
Şekil 4.44. Kontrol+Besin numunelerinin SEM görüntüsü	87
Şekil 4.45. 10 ⁸ V. Arenosii numunelerinin SEM görüntüsü	88
Şekil 4.46. 10 ⁸ V. Arenosii + Besin numunelerinin SEM görüntüsü.....	88
Şekil 4.47. 10 ⁹ V. Arenosii numunelerinin SEM görüntüsü	89
Şekil 4.48. 10 ⁹ V. Arenosii + Besin numunelerinin SEM görüntüsü.....	89
Şekil 4.49. 10 ⁹ V. Arenosii + Besin numunelerinin SEM görüntüsü.....	90
Şekil 4.50. 10 ⁸ B. Pasteurii numunelerinin SEM görüntüsü	90
Şekil 4.51. 10 ⁸ B. Pasteurii numunelerinin SEM görüntüsü	91
Şekil 4.52. 10 ⁸ B. Pasteurii numunelerinin SEM görüntüsü	91
Şekil 4.53. Beton numunelerinin içinde ve dışında kalsit oluşumu	92

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 3.1. Çimentonun kimyasal analizi.....	16
Çizelge 3.2. Çimentonun fiziksel ve mekanik özellikleri	16
Çizelge 3.3. Ön deneme harç numunelerinin karışım oranı.....	31
Çizelge 3.4. Harç numunelerinin karışım oranı	33
Çizelge 3.5. Beton numunelerinin karışım oranı	34
Çizelge 4.1. İnce ve iri agregada tane yoğunluğu ve su emme	45
Çizelge 4.2. Taze betonda çökme deneyi sonuçları	46
Çizelge 4.3. Ön deneme harç numunelerinin 7 günlük basınç dayanımları.....	47
Çizelge 4.4. Ön deneme harç numunelerinin 28 günlük basınç dayanımları.....	47
Çizelge 4.5. Harç numunelerinin 7 günlük basınç dayanımları	49
Çizelge 4.6. Harç numunelerinin 28 günlük basınç dayanımları	49
Çizelge 4.7. Normal su kürü uygulanan beton numunelerinin 7 günlük basınç dayanımları.....	52
Çizelge 4.8. Normal su kürü uygulanan beton numunelerinin 28 günlük basınç dayanımları.....	53
Çizelge 4.9. Bakterili su kürü uygulanan beton numunelerinin 7 günlük basınç dayanımları.....	56
Çizelge 4.10. Bakterili su kürü uygulanan beton numunelerinin 28 günlük basınç dayanımları	57
Çizelge 4.11. Normal su kürü uygulanan beton numunelerinin 7 günlük eğilme dayanımları	63
Çizelge 4.12. Normal su kürü uygulanan beton numunelerinin 28 günlük eğilme dayanımları	64
Çizelge 4.13. Bakterili su kürü uygulanan beton numunelerinin 7 günlük eğilme dayanımları	67
Çizelge 4.14. Bakterili su kürü uygulanan beton numunelerinin 28 günlük eğilme dayanımları	68

1. GİRİŞ

Günümüzde malzemelerin iyileştirilmesi, inşaat mühendisliğinin çeşitli alanlarında büyük ölçüde gelişme sunmaktadır. Malzemelerin kalitesini iyileştirmek, betonun birçok sorununun çözülmesine, kendi kendini temizleyen ve kendi kendini onaran beton gibi daha verimli ve daha kararlı malzemelerin geliştirilmesine yardımcı olmaktadır. Erişilebilirliği, bulunabilirliği ve maliyet etkinliği nedeniyle beton gibi çimento esaslı malzemeler dünyanın her yerinde kullanılır. Yapısal hasarları bağımsız bir şekilde onarabilen kendi kendini onaran beton, uygulama alanında çok umut vericidir.

En popüler yapı malzemesi olan beton, çatlama eğiliminde olan bir malzemedir. Beton yapılarıdaki çatlakların onarımı önemli, ancak zaman alıcı ve pahalı bir işlemdir. Günümüzde araştırmacılar, bakteri ve nano malzemeler kullanarak beton yapıların kendi kendine onarma kapasitelerini nasıl geliştireceğini ve bu malzemelerin geliştirilmesi için hangi şartların gerekli olduğunu araştırmaktadırlar (Şekil 1.1).

Dünyadaki en yaygın yapı malzemesi olan betonun onarımı için belirli bakteriler kullanılmaktadır. Delft Teknik Üniversitesi'ndeki araştırmacılar geçen üç yıl içinde kendi kendini onaran betonu geliştirmişlerdir. Beton, yapısından dolayı basınca dayanıklı fakat çekme gerilmesine karşı zayıftır. Ayrıca, kırılgan bir malzeme olduğundan dolayı her zaman ve her şartta çatlama özelliğine sahiptir.

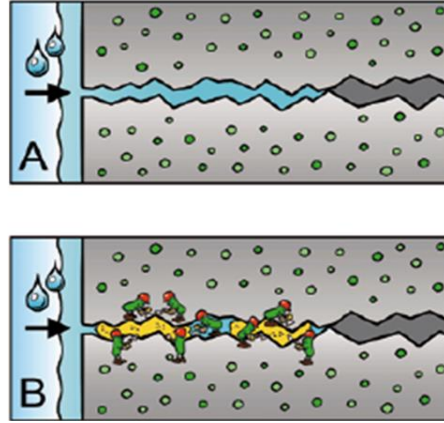
Plastik oturma ve rötre çatlakları betonun perdelanması bittikten sonra 2 ile 6 saat içerisinde oluşmaktadır. Uzun vadeli çatlaklar, muhtemelen aylar sonra, belki de yıllar sonra ortaya çıkan betondaki suyun buharlaşması nedeniyle beton rötresinden dolayı oluşan çatlaklardır. İki durumda da, bu çatlaklar, betonun genel performansını olumsuz yönde etkilemektedir. Bu çatlakları engellemek için betonda bakteriler kullanılmaktadır. Elde edilen betona kendi kendini onaran beton denilmektedir.



Şekil 1.1. Kendi kendini onaran beton (Anonymous 2018a)

Mikrobiyologlar ve beton teknolojistleri tarafından beton tamir masraflarının düşürülmesine yardımcı olmak için biyo-beton geliştirilmiştir. *Bacillus* türleri, suda aktif besin maddeleri ile bakteri sporlarını oluşturmakta ve kendi kendini onaran betonlar üretilmektedir. Beton karışımına kalsit çöktürme bakterileri ilave etmek suretiyle kendini onarma kapasitesine sahip beton üretmek mümkün olmaktadır.

Araştırmacılar yapmış oldukları labratuvar deneylerinde 0.55 mm genişliğindeki çatlaklarda başarılı olduklarını açıklamakla beraber, beton deneylerinin devam ettiğini ve sürecin takip edildiğini belirtmektedirler. Teori olarak betonda çatlaklar meydana geldiğinde yağış suyu betonun içine sızıp ve bakterileri aktive ederek kalsit ile çatlakları dolduracaktır (Şekil 1.2). Buna ek olarak, beton yapıların tasarımındaki dayanıklılık sorunlarının yeni ve daha ekonomik bir şekilde ele alınabileceği anlamına da gelecektir.

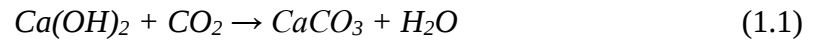


Şekil 1.2. Bakterilerin kalsit oluşturarak çatlakları doldurması

Genel olarak yapılan araştırmalarda, beton içerisinde bakteriler için en iyi koşulları yaratarak ve gerekli besin dağılımını optimize ederek mümkün olduğunca çok kalsit üretmeye odaklanılmıştır. Buna ek olarak da bakteri esaslı betonun kendi kendini onarma yeteneği araştırılmıştır.

Çalışmalar (Heinen and Babcock 1988; Yuan 2009; Joseph 2010), farklı stratejiler ve malzemeler konusunda bazı avantajların ve dezavantajların olduğunu göstermektedir. Etkili kendi kendini onaran betonun gerçekleştirilebilmesi için iyileştirici madde ve kullanımının stratejisi doğru seçilmelidir.

Kendi kendini onaran betonda, kalsiyum hidroksitin kalsiyum karbonata dönüşümü aşağıdaki reaksiyona göre gerçekleşir:



Normal betonda, düşük CO_2 miktarına bağlı olarak kalsiyum karbonat miktarı da düşüktür. Ancak, bakterili beton numunelerindeki kendini onarma süreci, mevcut bakterilerin kalsiyum laktatın ($CaC_6H_{10}O_6$) aktif metabolizması nedeniyle daha fazla ve etkilidir:



Denklem (1.2)'ye göre kalsiyum karbonat ($CaCO_3$), sadece kalsiyum laktatın dönüştürülmesinden değil aynı zamanda dolaylı yoldan metabolik olarak CO_2 'nin kimyasal reaksiyonundan da üretilir (Day 2003).

Ekonomik açıdan, mevcut iyileştirme teknikleriyle rekabet edebilmek için kendi kendini onaran betonda kullanılan iyileştirici maddenin miktarı en aza indirilmelidir. Ayrıca uygulama yöntemini de basitleştirmek gerekmektedir.

Bu kapsamda literatür taramasında *Bacillus Pasteurii* ile ilgili çalışmalara rastlanmış olsa da *Viridibacillus Arenosii* kullanılarak kendi kendini onaran beton üretimi ile ilgili bir çalışma bulunmamaktadır. Bu sebeple bu çalışmada *Viridibacillus Arenosii* bakterisi 10^7 , 10^8 ve 10^9 CFU (Coloni Forming Unit) 'canlı hücre/ml' oranlarında betona ilave edilmiş, üretilen numuneler üzerinde basınç ve eğilme dayanımları belirlenmiştir. Ayrıca farklı kür yöntemlerinin etkisini incelemek üzere iki farklı koşulda numuneler 7 ve 28 gün kür edilmiştir. Numunelerin bir kısmı kirece doymuş normal suda küre tabi tutulurken diğerleri 10^7 CFU içeren bakterili suda kür edilmiştir. Bakterili su ile kür yöntemi daha önce hiç yapılmamış olup bu çalışmada farklı bir parametre olarak ele alınmıştır. Her bir gurubun küründe kendi içerisinde bulunan bakteri türü kür suyuna ilave edilmiştir.

Bu çalışmada, kendi kendini onaran uygun malzemelerin seçimi için ön deneyler yapılmıştır. Ön denemeler için hazırlanan 4x4x4 cm boyutlu harç numuneler üzerinde basınç dayanımları belirlenmiş ve dayanumda belirgin artış tespit edilememiştir. Bunun üzerine karışıma besin eklenmesi yoluna gidilmiştir. Daha sonra; bakteri olarak *B. Pasteurii* ve *V. Arenosii*, besin olarak kalsiyum laktat, CEM II 42.5 R çimento, harç numunelerinde 1-5 mm tane boyutunda ince agrega, beton numunelerde ise 1-16 mm tane boyutunda agrega kullanılarak örnekler hazırlanmıştır. Hazırlanan harç ve beton numuneleri kirece doymuş normal suda ve 10^7 CFU konsantrasyonunda bakterili suda kür edildikten sonra 7 ve 28 günlük basınç ve eğilme dayanımları tespit edilmiştir. Kırılan numunelerden alınan örnekler üzerinde XRD ölçümleri yapılmış ve SEM görüntüleri alınmıştır.

2. KAYNAK ÖZETLERİ

Bu bölümde farklı yöntemler ve malzemeler kullanılarak üretilen kendi kendini onaran beton konusundaki daha önceden yapılmış olan çalışmalar özetlenmiş ve yazarların alfabetik isim sırasına göre sunulmuştur.

Bundur *et al.* (2015) biomineral çimento esaslı malzemeler üzerinde araştırma yapmışlar ve *Sporosarcina Pasteurii* (*S. Pasteurii*) bakterisinin üre-maya besin olarak hidratasyona ve dayanıma etkisini incelemişlerdir. Üç farklı oranda (4×10^5 , 2×10^6 ve 3×10^7 CFU) bakteri kullanarak beton numuneler üretmişlerdir. Sonuç olarak, bakteri hamurunda kalsiyum karbonatta, özellikle kalsitte artış olduğu belirtilmiştir. Zaman içerisinde ilave karbonat üretiminin üre hidrolizinden dolayı yeni ortamda süspanse edilen bakteriler tarafından üretildiğini belirtmişlerdir. Çimento hamuruna bakteri eklendiğinde kalsiyum karbonatta önemli bir artış olduğunu TGA (termogravimetrik analiz) ile göstermişlerdir.

Biswas *et al.* (2010) çalışmalarında betonda bakteri kullanarak beton teknolojisinde yeni bir yöntemi incelemişlerdir. Bu çalışmada kalsiyum iyonlarla zenginleşmiş proteinler ve bakteriler 10^4 , 10^5 ve 10^6 CFU(Canlı hücre/ml) mertebesinde kullanılmıştır. Sonuç olarak bu proteinler betonun basınç dayanımını %25, çekme dayanımını ise yaklaşık olarak %20 artırmıştır. Proteinlerin numunelere ilave edilmesi ile betonun elastik modülünün ve sertliğinin arttığını bildirmişlerdir. Bu tür izole edilmiş bakterilerin kullanılması beton teknolojisinde gelecekte yapısal malzemelerde gelişmeye yol açmaktadır.

Chahal *et al.* (2012) yapmış oldukları çalışmada, uçucu küllü betonun basınç dayanımı, su emme kapasitesi ve hızlı klorür geçirgenliği üzerinde *S. Pasteurii* bakterisinin etkisini incelemişlerdir. Numunelerde 0, 10^3 , 10^5 , 10^7 hücre/ml bakteri kullanılmıştır. Sonuçta 10^5 hücre/ml kullanılan numunelerde kontrol numunelere göre basınç dayanımda %22 artış ve su emme kapasitesinde 4 kat düşüş görülmüştür. Basınç dayanımında iyileşmenin nedeni olarak boşlukların kalsit ile doldurulması ve daha pürüzsüz malzemenin elde

edilmesinden kaynaklanması belirtilmiştir. *S. Pasteurii* bakterisinin, uçucu küllü kendi kendini onaran betonun durabilitesini ve dayanımını artırdığı bildirilmiştir.

Chahal and Siddique (2013) uçucu kül ve silis duman katkılı betonlarda üre esaslı *S. Pasteurii* bakterilerinin etkisini incelemiştir. Bakteriler 0, 10^3 , 10^5 ve 10^7 canlı hücre/ml dozlarda betona eklenmiştir. Karışım hesabında çimentonun bir kısmı uçucu kül ve silis dumanı olarak betonda yer almıştır, uçucu külün kullanım oranı çimentoya göre %0, %10, %20 ve %30 olarak alınmış ve bu değer silis dumanı için %0, %5 ve %10 olarak belirlenmiştir. Sonuç olarak bakteri kullanılması ile betonda hem dayanım hem de durabilite artmıştır ve klor geçirimsizliğinde azalma görülmüştür. Bunun nedeni olarak bakterilerin betonda kalsit (CaCO_3) üretmesi ile betonu daha geçirimsiz ve boşluksuz hale gelmesini belirtmişlerdir.

Dong *et al.* (2015) çalışmalarında mikrokapsüllerin beton gözeneklerinde davranışını incelemiştir. Araştırmaya göre mikrokapsüllerin kabuk kalınlığının doğrudan kabukta kullanılan malzeme ile ilişkili olduğunu belirtmişlerdir. Ortamın pH değeri azaldıkça onarım maddesine olan ihtiyaç artmaktadır. Deneylerde kabuk kalınlıkları 139,8 ; 157,4 ve 183,35 μm olarak seçilmiştir. Yüksek pH değeri daha yüksek Ca^{2+} konsantrasyonuna karşılık gelmektedir. Ca^{2+} , mikrokapsüllerin yüzeyinde birikebildiğini ve mikro çatlakları ve mikro boşlukları doldurarak dayanımın artışına neden olduğunu ifade etmişlerdir.

Ferrara *et al.* (2014) kristal katkılı ve katkısız betonlarda çatlak iyileşmelerinde basınç dayanımı testi yapmışlardır. Bu çalışmada, hem kristal katkılı hem de kristal katkısız parçacıklarla kendi kendini onaran betonun özellikleri incelenmiştir. Araştırmaya göre kendi kendini iyileştirme yönteminde rijitlik ve yük taşıma kapasitesinin değerlendirmesi için 3 noktalı eğilme deneyi ve suya daldırma, havaya maruz kalma ve hızlandırılmış sıcaklık döngülerinin deneyleri yapılmıştır. Sonuçlara dayanarak, kendi kendini onaran betonun özellikleri elde edilmiş ve mikro boşluklar ve mikro çatlakların doldurulması ile bu yöntemin beton onarımı için uygun olduğunu belirtmişlerdir.

Gilabert *et al.* (2015) yaptıkları çalışmada, mikrokapsüllü kendi kendini onaran numunelerin çekme ve eğilme dayanımını incelemişlerdir. Mikrokapsüller içerisinde onarım maddesi kendi kendiliğinden iyileşen ana malzemeler (matris) içinde yer almaktadır. Mikrokapsül ve matris arasında bir ara yüzey bulunmaktadır. Her iki bileşen arasındaki arayüzün kendi kendini onarmada önemli bir rol oynadığı kanıtlanmıştır. Bu araştırma malzeme elastisitesi, kapsül kalınlıkları ve bağ dayanımı arasında optimum kombinasyonu sağlamak için gerçekleştirilmiştir. Arayüzler tam ve kusurlu bağlantılı olarak iki tipde incelenmiştir. Tam bağlantılı koşulları altında, kapsülün dış yüzeyi matriste bulunan deliğin iç yüzeyine sıkıca tutturulur. Bu durumun arayüzün dayanımını yeteri derecede artırdığını belirtmişlerdir. Kusurlu bağlantıda ise ara yüzün dayanımının ve kırılma kapasitesinin azalmasına sebep olabileceğini ifade etmişlerdir.

Hanus and Harris (2013) inşaat sektöründe nanoteknolojik yenilikleri araştırmışlardır. İncelemeleri nanoteknolojinin uygulanmasının kullanılan yapısal malzemelerde büyük gelişmelere neden olduğunu göstermiştir. Bu durumda betonun mukavemeti, durabilitesi ve geçirimsizliği iyileşmekte, ayrıca metal oksit nanoparçacık, nanokarbon ve endüstriyel atık ürünleri kullanarak betonun kendi kendini temizleme ve kendi kendini onarma özelliklerine de sahip olması söz konusu olmaktadır. Metal oksit nanoparçacık ve nanokarbon kullanılmasının endüstriyel atık ürünlerinin betona olumsuz etkilerini azalttığını bildirmişlerdir.

Hilloulouin *et al.* (2015) yapmış oldukları araştırmada kendi kendini onaran beton için polimerik kapsül tasarlayarak yeni formda bir mikrokapsül oluşturmuşlardır. Bu kapsülü 3 farklı polimerden (laktik asit, polystyrene, methyl methacrylate) elde etmişlerdir. Kapsüllerin, çatlaklar meydana geldiğinde kırıldığını ve içindeki sıvı çatlakları kapattıktan sonra sertleşerek, betona ilave dayanım kazandırdığını belirtmişlerdir.

Huang *et al.* (2014) mikro kapsül kullanılarak Ca(OH)_2 'a doymuş çimentolu malzemelerde kendi kendini onarım özelliklerini incelemişlerdir. Simülasyon sonuçları göstermiştir ki doymuş Ca(OH)_2 çözeltisi ile çatlakların kendi kendini iyileştirme verimliliği kapsüller kullanıldığında düşüktür. Sonuç olarak kapsüllerin ebatları ve

içindeki malzeme dozajının artmasıyla onarım verimliliğinin artırılabilceği belirlenmiştir. Bunun nedeni olarak onarma süresinde çatlaklara yeterli mertebede Ca(OH)_2 çözeltisi verilmesini ifade etmişlerdir.

Huang *et al.* (2014) yüksek fırın cürufu çimentolu malzemelerin kendi kendini onarımının mikro çatlaklar üzerinde etkisini incelemişlerdir. Bu araştırmada, çimento hamurunun içinde %66 yüksek fırın cürufu ve aktivatör olarak doymuş Ca(OH)_2 çözeltisi kullanılmıştır. Çatlaklarda, reaksiyon ürünleri CSH, etrenjit, hidrogarnet ve OH-hidrotalsit oluşmaktadır. Reaksiyon ürünlerindeki CSH jelerinin oranı diğer minerallerden çok daha fazladır. Kendi kendini onarma işleminin 50 saat içerisinde hızlı ilerleyip ve daha sonra yavaşladığı gözlenmiştir. Termodinamik modellere göre, yeni oluşan reaksiyon ürünleri karbonatlı olduğundan dolayı çatlak doldurulmasında ilk olarak kısmen artış ve daha sonra azalma göstermiştir. Portland çimento hamuru ile karşılaştırıldığında, cüruf oranı yüksek olduğundan, cürufllu çimento hamurunun içinde kendi kendini onarma potansiyelini yükselttiği belirlenmiştir.

Jiang *et al.* (2015) beton ve harcın kendi kendini onarma performanslarını, çeşitli minerallerin katılması ile araştırmışlardır. Kendi kendini iyileştirme özellikleri, su geçirmezlik testleri, yüzey çatlaklarının genişliklerinin miktarı ve çatlaklı harçların su emme kapasiteleri değerlendirilmiştir. Sonuç olarak yüksek pH ve sıcaklıklarda çatlak iyileşmesinin hızlandığı açıklanmıştır. Yüksek pH, daha fazla kalsiyum karbonatın çöktürülmesine yol açıp, yüzey çatlaklarının iyileşmesinde önemli bir katkıda bulunduğu belirtilmiştir.

Jonkers *et al.* (2010) betonda sürdürülebilir gelişme için kendi kendini onarım katkısı olarak Bacillus esaslı bakterileri kullanmışlardır. Bakterileri 10^8 , 10^9 CFU miktarında direkt beton harcının içine katarak kendi kendini onaran beton üretmişlerdir. Çalışmada bakteri ile birlikte CEM I 32,5 R çimento, besin (kalsiyum laktat), normal agrega ve su kullanılmış, su/çimento oranı 0.50 olarak kabul edilmiştir. Sonuç olarak bakteri esaslı kendi kendini onaran betonda su geçirimsizlik deneyi yapılarak duarbilitede oldukça iyi

sonuçlar elde edilmiştir. Bunun nedeninin bakterilerin besin tüketerek kalsit (CaCO_3) oluşturması ve mikro çatlakları doldurulması olduğunu belirtmişlerdir.

Sierra-Beltran *et al.* (2014) incelemelerinde beton tamiri için sürdürülebilir biyolojik harç karakterizasyonu ve kendi kendini onarma özelliklerini araştırmışlardır. Numunelerin eğilme dayanımı, basınç dayanımı ve kuruma rötresi incelenmiştir. Bakteri olarak *Bacillus* grubundan *B. Cohnii* $1,2 \times 10^7$ CFU miktarında ve bakterilere besin olarak kalsiyum laktat numunelere ilave edilmiştir. Kullanılan bakterilerin ve onların besinlerinin ortamın nemli şartlarında kalsiyum karbonat üreterek betonun hem basınç dayanımında %12 hem de eğilme dayanımında %10 artışa neden olduğunu bildirmişlerdir.

Pei *et al.* (2013) betonun mekanik performansını artırmak için bakteriyel (*Bacillus* esaslı bakterileri) hücre duvarları kullanmışlardır. Bakteriyel hücre duvarların mikrobik kaynaklı karbonat çökeltmesine aracılık ettiği bilinmektedir. CaCO_3 , Ca^{2+} iyonları ve çözülmüş CO_2 oluşturulmaktadır. Bu bilgilere uygun olarak, bakteriyel hücre duvarlarının içindeki $\text{Ca}(\text{OH})_2$ karbonasyonu artırarak betonda CaCO_3 'ün oluşumuna yol açmaktadır. Ayrıca beton numunelerin kurutulduktan 28 gün sonra gözenekliliği de azalmış ve bakteriyel hücre duvarları önemli ölçüde (%15) beton basınç dayanımını artmıştır.

Sangadji and Schlangen (2013) kemik iyileştirme sürecini taklit ederek betonun kendi kendini onarması durumunu incelemişlerdir. Malzeme olarak agrega, çimento, uçucu kül kullanılmıştır. Yeraltı yapıları veya tehlikeli sıvı depoları gibi zor koşullar altında kalan beton çatlakları onarmak için, kendi kendini iyileştirme mekanizması ümit verici bir alternatif yöntem olduğunu düşünmüşlerdir. Çatlak oluştuğunda ve sensörler tarafından tespit edildiğinde, onarım maddesi (epoksi) betonun gözenekli ağına doldurarak gözenekli betona yerleştirilmektedir. Tek eksenli direkt çekme yükü numunelerde çatlakları oluşturmak için uygulanmıştır. Sonuç olarak makro-çatlakların kapanması nedeniyle dayanımda %11 artış olduğunu ifade etmişlerdir.

Schlangen and Sangadji (2013) yapmış oldukları çalışmada, kendi kendini onaran betonun dayanıklılığını ve su geçirirmezliğini araştırmışlardır. Bu araştırma kapsamında 2 proje yapılmıştır. İlk olarak betona katılan bakteriler çatlaklarda kalsit oluşumunu hızlandırmış ve betonun durabilitesini yükseltmiştir. İkinci proje olarak beton içerisinde fiber takviyeli çimento esaslı malzemeler kullanılmış ve çatlakların oluştuğu ortamda betonun onarılmasını araştırmışlardır. Bu araştırmaya göre daha iyi kendi kendini onaran beton üretmek için uygun malzemeler ve karışımların tasarlanması gerekmektedir. Gözenekli beton bozulduktan sonra gömülü mikrokapsüller veya çelik lifler ile bu hasarın iyileştirilmesine çalışılmış ve mikro çatlakların ve boşlukların doldurulması sonucu hasarın onarıldığı ifade edilmiştir. Çelik lifler ve mikrokapsüllerin desteği ile dayanımda kontrol numunelere göre %70 artış olduğunu belirtmişlerdir.

Sisomphon *et al.* (2013) çeşitli bağlayıcı içeren çimentolu kompozitlerin kendi kendini onarma davranışını incelemişlerdir. Bu çalışmada kalsiyum sülfat alüminat esaslı katkı (CSA) ve kristal katkı (CA) içeren, sertleşen çimentolu kompozitin (SHCC) kendi kendini onarma potansiyelini araştırmışlardır. Suya maruz kalan karbonat iyonlarının konsantrasyonu, kendi kendini iyileştirme sürecinde önemli bir rol oynamaktadır. Kimyasal analizler iyileştirici ürünler olarak CaCO_3 , C-S-H ve etrinjitin meydana geldiğini göstermiştir.

Stuckrath *et al.* (2014) kimyasal katkı takviyeli harçların kendi kendini onarım performanslarını araştırmışlardır. Bu çalışmada, beton için, iki farklı kendi kendini iyileştiren maddeler izole edilmiş ve birleşik etkisi incelenmiştir. Bunlardan birincisi bakteri yöntemi diğeri ise onarım malzemesi enjekte edilmesidir. Kendi kendini onarma faktörlerin performansı iki ortak kimyasal katkının etkisi ile incelenmiştir. Tüm kendi kendini onaran maddeler, genişliği 0,08 ile 0,22 mm arasında olan çatlakları (makro çatlaklar) kapatmada başarılı olmuştur. Katkıların kendi kendini onarım faktörleri üzerinde önemli bir etkisi olduğu gözlenmiştir.

Van Tittelboom *et al.* (2010) taraflarından bakterilerin kullanımı ile betonda çatlakların onarılması araştırılmıştır. Bu çalışmada beton onarımı için kullanılan sentetik polimerler,

çevreye zararlı olabildiğinden dolayı biyolojik onarım tekniği incelenmiştir. *Bacillus Sphaericus* olarak üreolytic bakteri amonyum karbonat ile mikro-ortamında CaCO_3 çökeltmesine sebep olmaktadır. Üre bakteriyel degradasyonunda, pH artıp ve kalsiyum açısından zengin bir ortam oluşmaktadır. Bu çöktürülmüş kristaller, böylece çatlakları doldurabilir hale gelmektedir. Analizler, çatlaklar içinde kalsit kristallerin bakteri yardımı ile oluştuğunu göstermektedir.

Van Tittelboom *et al.* (2012) beton numunelerin çatlak iyileşme ölçümü için akustik emisyon analizi yapmışlardır. Bağımsız çatlak onarımı nedeniyle, mukavemette ve sertlikte artış göstermiştir. Betonun çatlama enerjiden daha yüksek bir enerjiye sahip olduğunda kapsül kırılması başlamaktadır. Bu çalışmada, betonda çatlağı iyileştirmek için kendi kendini onarma yönteminin uygun bir teknik olduğunu göstermişlerdir.

Wan Jo *et al.* (2014) betonun fiziksel ve mekanik özelliklerini araştırmak amacı ile kimyasal olarak sentezlenmiş nano çimento etkinliği ile ilgili incelemeler yapmışlardır. Mekanik analizlere dayalı olarak, 14 günlük kür edilmiş sentezlenmiş çimento betonu 28 gün kür edilmiş normal beton ile aynı sonucu vermiştir. Her iki grup için basınç dayanımı 43 MPa olarak elde edilmiştir. Nano çimento esaslı betonun genel performansını açıklamak için bir model önerilmiştir. Bu model ile nano çimentolu betonunda 28 günlük kür yerine 14 günlük kürün yeterli olup basınç dayanımında aynı sonuçların elde edilebileceği belirtilmiştir.

Wang *et al.* (2012) bakterilerin kullanımı ile kendi kendini onaran betonu incelemişlerdir. Polimer esaslı malzemeler. Deneysel sonuçlarına göre, silika jel immobilize bakteri, poliüretan immobilize bakterilerden daha yüksek bir aktivite göstermiştir ve bu nedenle, termogravimetrik analizlere göre CaCO_3 esaslı poliüretan daha fazla çökeltme göstermektedir.

Wang *et al.* (2014) kendi kendini onaran mikrokapsüllü bakteri sporlarının kullanımı ile beton üretmişlerdir. Bu çalışmada çatlama üzerine mikrokapsüllerin kırılması Taramalı Elektron Mikroskobu (TEM) ile doğrulanmıştır. Kendi kendini onarma kapasitesinden

dolayı çatlağın iyileşmesi elde edilmiştir. Sonuçlar biomikrokapsüllü numunelerde iyileşme oranını bakterili olmayanlara (%18-50%) göre daha yüksek olduğunu göstermiştir. Bakterili numunelerde maksimum çatlak genişliği 0.98 mm olup, bakteri olmayan serisine göre yaklaşık 4 kat daha fazladır (maksimum 250 mikron). Bakteri serisinin genel su geçirgenliği bakteri olmayan numunelere göre yaklaşık 10 kat daha düşüktür. Bu araştırmaya göre %95 bağıl nemde bekletilen numuneler iyileşme göstermemiştir. Dolayısıyla suyun varlığı kendi kendini iyileştirmek için yeterli olup ve ekstradan nem olduğuna gerek kalmamıştır.

Wang *et al.* (2014) tarafından yapılan çalışma, biyo-hidrojel ile saf hidrojel birleşmiş örneklerin belirgin iyileşme verimliliğinin olduğunu göstermektedir. Bu çalışmada bakteriyel gerinim (*Bacillus sphaericus* LMG 22257 (Belgian Coordinated Collection of Microorganisms, Ghent- Süspansiyondaki sporların nihai konsantrasyonu yaklaşık 10^9 hücre/ml) ve hidrojel (Kullanılan hidrojel Gent Üniversitesi Polimer Kimyası ve Biomaterials Grubu (PBM UGent) tarafından geliştirilmiştir) kullanılmıştır. Yöntem olarak bakteri sporları çapraz bağlanma işlemi esnasında hidrojel içine kapsüllenmiştir. Spor süspansiyonu birinci polimer çözeltisi (Pluronic™ -BMA)/ ağırlık olarak %20'si ile karıştırılmıştır. Daha sonra, başlatıcı ve aktivatör çözeltiye ilave edilmiştir. Harç örnekler su, çimento (CEM I 52.5N), kum (DIN EN 196-1 Norm Kum) kullanarak yapılmıştır. Su çimento oranı 0,5 ve kütlece kum oranı çimentonun 3 katı olmaktadır. Sonuç olarak kalsiyum kalsit oluşumunun 0,50 mm'ye kadar olan çatlakları doldurup numunelerin su geçirirliğinde yaklaşık olarak %68 düşüşe neden olduğu bildirilmiştir.

Wiktor and Jonkers (2015) bir otoparkın saha betonunun performansını yeni geliştirilen bakteri esaslı onarım sistemi ile incelemişlerdir. Bu sıvı-esaslı tamir malzemesinin kalsiyum esaslı biyomineral üretimi ile çatlak ve gözenekliliği azaltığı ve betonun durabilitesini artırdıkları belirlenmiştir. Bakteri-esaslı tamir malzemesi, çatlakların yüzeyine püskürtülerek uygulanmıştır. Sonuç olarak söz konusu olan bu tamir sistemi ile elde edilen betonun donma-çözülme mukavemetinin normal betondan daha yüksek olduğu görülmüş ve kontrol grubuna göre yaklaşık olarak 2 kat daha düşük kütle kaybına

uğradığı bildirilmiştir. Bunun nedeninin CaCO_3 çökmesinden dolayı çatlak ve boşlukların doldurulması olduğunu ifade etmişlerdir.

Wiktor and Jonkers (2011) yapmış oldukları çalışmada, betona $1,7 \times 10^5$ CFU *Bacillus alkalinitrilicus* bakterisi ve besin olarak kalsiyum laktat ilave ederek kendi kendini onaran beton üretilip ve betonun özelliklerini incelemişlerdir. Bu çalışmanın amacı, gözenekli genişletilmiş kil parçacıklarına gömülü spesifik ve yeni iki bileşenli bir biyokimyasal kendi kendini onaran maddenin çatlak-iyileştirme potansiyelini incelemeye yöneliktir. Betonda göllerde çöken alkali topraktan bakteri, kalsiyum laktat, Portland çimento (CEM I 42,5N), hafif agrega, kum ve su kullanılmıştır. Sonuç olarak, yeni biyokimyasal kendi kendini onaran betonun, ıslak ortamlarda beton yapılarında özellikle dayanıklılık yönlerini artırma potansiyeli taşıdıklarını ifade etmişlerdir.

Wong (2015) çimento esaslı malzemelerde kalsit çökmesini uyaran *Bacillus Genus* bakterinin olumlu etkisini incelemiştir. Üre hidroliz oranları, kalsit doygunluğu ve bakteri kalsit çökmesini büyük ölçüde, pH, sıcaklık, bakteri hücre konsantrasyonu, kalsiyum konsantrasyonu ve üre konsantrasyonun büyüme koşullarına bağlı olduğu tespit edilmiştir. Sonuç olarak, *Bacillus* cinsi bakterilerin çeşitli türleri arasında mikrobiyal sementasyon mekanizmasının olumlu etkisi görülmüştür.

Wu *et al.* (2012) kendi kendini onaran çimentolu malzemeleri ve kompozitleri araştırmışlardır. Bu çalışmada mikro kapsüller, içi boş fiber (hollow fiber), genişleyen maddeler ve mineral katkıları (jeopolimerik jeller), bakteriler, şekil bellekli malzemeler (shape memory materials) kendi kendini onaran malzeme olarak betona ilave edilmiştir. Çimentolu malzemeler ve kompozitler, kendini onaran mikro çatlak davranışı ve sıkı çatlak genişliği kontrolü özelliğinden dolayı efektif iyileşmeyi gerçekleştirmede büyük bir potansiyele sahip olduğunu, yüksek çimento içeriği ve düşük su/bağlayıcı oranında göstermiştir.

Xu and Yao (2014) çatlamalarında kendi kendini onarma stratejisi olarak, kalsiyum karbonat olmayan ureolytic bakteriyel kaynaklı çökmesini incelemişlerdir. Bakteri ve

kalsiyumu betona ilave edilmiştir. Numunelerde 10^7 ve 10^8 CFU bakteri kullanılmıştır. Kalsiyum karbonat, çatlakların üzerinde birikmiş ve çatlakların kendi kendini onardığı tespit edilmiştir.

Yuan (2009), kendi kendini onaran betonda farklı yöntemlerin olduğunu belirtmiştir. Bu yöntemler; bakterileri, mikrokapsülasyonu, içi boş elyafları, genleşmeli maddeleri ve mineral katkıları ve şekil belleği materyallerin kullanılmasını içerir. Ayrıca betonun kendi kendini onarması için her hangi bir yöntemin kullanabileceğinin mümkün olduğunu ifade etmiştir. Yaptığı araştırmada betonda mikrokapsüllerin kabuğunun nasıl kırılması gerektiğini incelemiş ve betonun çatlama enerjisinden dolayı mikrokapsüllerin kabuğunun kırılması gerektiğini belirtmiştir. Çatlak oluştuğu zaman mikrokapsülün kırılıp içerisindeki onarım maddesinin reaksiyona girerek mikro çatlağı doldurulmasına yol açacağını bildirmiştir.

Zhang *et al.* (2015) kalsiyum kaynaklarının rolünü, mikrobiyal harcın mukavemetinde ve mikro yapısında incelemişlerdir. Bu çalışmada, üç farklı kalsiyum (CaCl_2 , $\text{Ca}(\text{CH}_3\text{COO})_2$ ve $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$) ile kendi kendini onaran mikrobiyal harçların tek eksenli basınç dayanımı, çekme dayanımı ve su emme oranı araştırılmışlardır. Sonuçlar, $\text{Ca}(\text{CH}_3\text{COO})_2$ ile elde edilen mikrobiyal harçların basınç dayanımı ve çekme mukavemetleri, diğer iki kalsiyum kaynaklarına göre yaklaşık olarak iki kat daha iyi olduğunu göstermiştir. Yapılan analiz sonuçlarına göre $\text{Ca}(\text{CH}_3\text{COO})_2$ ile muamele edilmiş mikrobiyal harcın gözenek boyutu ve dağılımı diğerlerine göre daha az olup ve numunelerin homojen olduğu görülmüştür.

3. MATERİYAL ve YÖNTEM

Bu çalışmada iki farklı tür (*Bacillus Pasteurii*, *Viridibacillus Arenosii*) bakteri 10^7 , 10^8 ve 10^9 CFU (canlı hücre/ml) oranlarında kullanılarak kendi kendini onaran harç ve beton numuneleri üretilmiştir. Taze beton üzerinde işlenebilirlikler belirlenmiştir. Numuneler prizini tamamladıktan sonra iki farklı koşulda kür edilmiştir. Numunelerin bir kısmı normal su kürüne bırakılırken bir kısmı ise bakterili suda küre tabi tutulmuştur. Kür süresi tamamlanan sertleşmiş harç ve beton numuneleri üzerinde basınç ve çekme dayanımları tespit edilmiştir. Çalışmalarda kullanılan malzemeler ve uygulanan yöntemler aşağıda açıklanmıştır.

3.1. Materyal

Çalışmanın bu bölümünde, kendi kendini onaran beton üretiminde kullanılan agrega, çimento, bakteri türleri ile deneylerde kullanılan cihazların genel özellikleri anlatılmıştır.

3.1.1. Deneylerde kullanılan malzemeler

Bu çalışmada kullanılan malzemeler çimento, iki farklı bakteri türü, besin, ince agrega, iri agrega, su ve deney aletleridir.

3.1.1.a. Çimento

Çimento, mineralleri (kum, çakıl, bims, tuğla, briket vb.) yapıştırmak için kullanılan, kireçtaşı ve kilden elde edilen bir malzemedir. Çimento, birçok beton karışımında minimum hacmi kaplayan bileşen olup; ancak beton için vazgeçilmez bir malzemedir (Gündeşli 2008). Kalkerli ve killi hammaddelerin yüksek sıcaklıkta pişirilmesi sonucunda elde edilen malzemeye alçıtaşı ilave edilip, öğütülmesiyle elde edilen çimentonun ana bileşenlerini kalsiyum silikatlar (C_3S , C_2S) ve kalsiyum alüminatlar (C_3A , C_4AF) oluşturur.

Bu çalışmada Aşkale Çimento fabrikasında TS EN 197-1 standartlarına göre üretilen CEM I 42,5 R çimento kullanılmıştır. Kullanılan çimentonun kimyasal analizi Çizelge 3.1'de ve fiziksel ve mekanik özellikleri Çizelge 3.2'de verilmiştir. Çizelgede üreticiden alınan değerler Türk standartlarına göre karşılaştırılmış ve çimentonun kullanıma uygun olduğu tespit edilmiştir.

Çizelge 3.1. Çimentonun kimyasal analizi

Kimyasal analizler	%	TS EN 197-1 sınır değerler (%)	TS EN 450-1 sınır sınır değerler (%)
SiO ₂	17,73	-	-
Al ₂ O ₃	4,56	-	-
Fe ₂ O ₃	3,07	-	-
CaO	62,81	-	-
MgO	2,07	-	-
SO ₃	2,90	-	Maks. 3,0
Kızdırma kaybı	3,36	Kategori A 0.0<.. <lt;5.0 </lt;5.0 Kategori B 2.0<.. <lt;7.0< td=""><td>Kategori A 0.0<..<lt;5.0 </lt;5.0 Kategori B 2.0<..<lt;7.0< td=""></lt;7.0<></td></lt;7.0<>	Kategori A 0.0<.. <lt;5.0 </lt;5.0 Kategori B 2.0<.. <lt;7.0< td=""></lt;7.0<>
K ₂ O	0,62	-	-
Na ₂ O	0,99	-	-
Cl (klor)	0,02	-	Maks. 0.1
Ölçülemeyen mineraller	0,46	-	-
Serbest CaO	0,56	Maks. 1.0	Maks. 2.5
Çözünmeyen kalıntı	0,85	-	-
Toplam	100,00	-	-

Çizelge 3.2. Çimentonun fiziksel ve mekanik özellikleri

Fiziksel ve mekanik özellikler	
İncelik - 45 ^u m elek üstü (%)	8,98
Özgül ağırlık	3,14
Özgül yüzey (cm ² /g)	3807
Priz başlangıcı (Saat-dakika)	2 saat 20 dak
Priz sonu (Saat-dakika)	2 saat 53 dak
Hacim genleşmesi (mm)	1
Basınç dayanımı 3 Gün (MPa)	27,7
Basınç dayanımı 28 Gün (MPa)	57,2
Su ihtiyacı (%)	28,6

3.1.1.b. Beton ve harçta kullanılan bakteriler

Bu çalışmada kullanılan bakteriler *Viridibacillus Arenosii* K64 (Gen Bankası Kabul numarası KR873397) ve *Bacillus Pasteurii* ATCC 11859 örnekleri olup Atatürk Üniversitesi, Doğu Anadolu Yüksek Teknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezi (DAYTAM) Kültür Koleksiyonlarında muhafaza edilmektedir. *Viridibacillus Arenosii* bir bakteri türü olup, beton ve harç numunelerde kalsit (CaCO_3) reaksiyonunun gerçekleşmesi için kullanılmıştır. *V. Arenosii* laboratuvar şartlarında yüksek üreaz aktivitesine sahip gram pozitif izolatı olmaktadır. İlgili izolatın mikrobiyologlar tarafından daha önce mağaralardan elde edildiği ve kalsiyum karbonat çökeltisi oluşturduğu tespit edilmiştir.

İkinci bakteri (*Bacillus Pasteurii*) ise ticari olarak temin edilen ATCC (Amerikan tip Kültür Koleksiyonları) bir örnektir. Enjekte edildiği yerde kalsit üreterek kaya gibi sert yapıya dönüşmesini sağlamaktadır. Bu bakteri türü, gerekli besleyici maddeler ve oksijenle birlikte kum yığınlarına bırakıldığında kalsiyum karbonat oluşturmaya başladığı ve kum yığınına kısa sürede taşla dönüştürdüğü bilinmektedir. Kullanımdan önce -86°C 'de stoklardan TSA besinlerine ekimleri yapılır ve 24 saatlik inkübasyon sonucunda oluşan genç kültürlerden sıvı besinlerine ekim yapılır. 16-24 saat 32°C 'de $1-10 \times 10^8$ bakteri olacak yoğunluk gözlemlendiğinde uygulama besinlerine ekimleri yapılmıştır (Şekil 3.1).

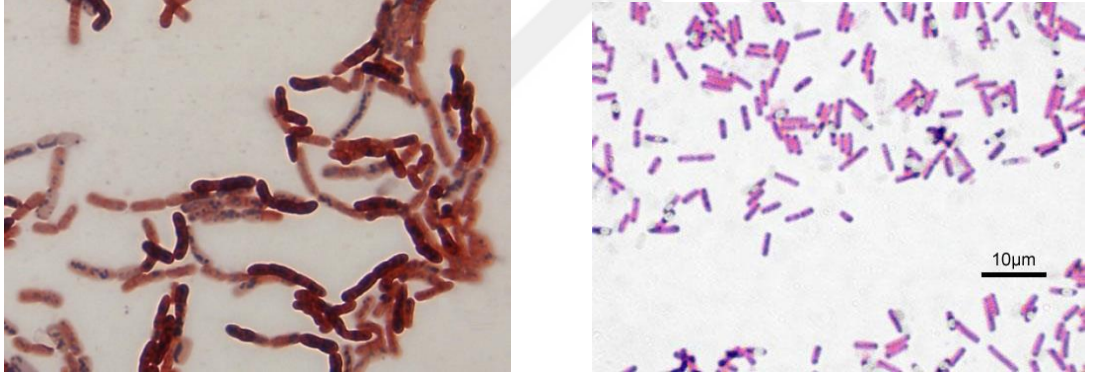


Şekil 3.1. Bakteri üretim aşaması (otoklav içerisinde bakteri üretimi)

3.1.1.c. Bakteri inokülasyonu

İnokülasyon (ekim yapmak); mikroorganizma'nın besiyerine ekilmesi ya da üremesi için besiyerine bırakılmasıdır. Yüksek üreaz aktivitesi ile çökeltmede rol oynadığı bilinen *Bacillus* izolatu, kalsiyum karbonat reaksiyonunu gerçekleştirmek için kullanılır. İlgili izolatu mağaralardan alındığı ve kalsiyum karbonat çökelti oluştuğu tespit edilmiştir.

Bu bakteri gram pozitif özellikli topraklardan izole edilebilen bir örnektir ve endospor oluşturma yeteneğinden dolayı çok dirençlidir. Mikroskop altındaki görüntü bakterilerin yaklaşık 1 mikron çapında ve 2,5 mikron uzunluğunda çubuk şeklinde olduğunu göstermiştir (Şekil 3.2). Boyut olarak *B. Pasteurii* bakterisi *V. Arenosii* bakterisine göre çok az miktar büyüktür.



Şekil 3.2. *Bacillus* esaslı bakteri

Farklı pH'lı sıvı besinlerine bakteri inokülasyonu yapılarak 3 gün süre ile oda sıcaklığında (25°C) inoküle edilmiştir.

3.1.1.d. Agregat

Bu çalışmada, Erzurum ili sınırları içerisindeki Horasan mevkiinden temin edilen doğal kum ve çakıl kullanılmıştır. Kullanılan malzeme dere malzemesi olup maksimum tane çapı 16 mm dir. Seçilen malzeme yıkanmış olup, agregaların: gradasyon, maksimum tane

büyüklüğü, tane ebattı, su emme kapasitesi, birim ağırlık, özgül ağırlık ve içerisindeki zararlı maddelerin miktarı ve türü belirlenerek yapılan deneylerinin sonuçları ve hazırlanan karışımın granülometri eğrisi Araştırma Bulguları bölümünde verilmiştir.

3.1.1.e. Karışım suyu

Beton karışımında kullanılan çimentonun bağlayıcılık özelliği, büyük ölçüde çimentonun kalsiyum silikat bileşenleri ile karışım suyu arasındaki kimyasal reaksiyonlar sonucu oluşan kalsiyum silikat hidrat (C-S-H) jel ürünlerinin oluşumuna dayanmaktadır. Karışımında kullanılacak suyun içerisinde fazla miktarda bulunabilecek yabancı maddeler hidratasyon ürünlerinin oluşum hızını ve miktarını etkileyebileceğinden, çimento hamurunun katılma süresini ve bağlayıcılık özelliğini de etkileyeceklerdir (Erdoğan 1995).

Farklı kaynaklardan temin edilen suların içerisinde değişik miktarlarda ve türlerde yabancı maddeler bulunabilmektedir. Diğer taraftan, şehir şebeke suları da tamamen saf su değildir. Bu suların içerisinde de farklı miktarlarda yabancı maddeler yer almaktadır. İçilebilir nitelikteki suyun beton üretiminde kullanımının uygun olduğu kabul edildiğinden, çalışmada Atatürk Üniversitesi içme suyu şebekesinden alınan su kullanılmıştır.

3.1.2. Bakteri ekimi için kullanılan malzemeler

Bakteri ekimi için kullanılan malzemeler Üre (Urea), Kalsiyum klorit dihidrat (Calcium Chloride Dihydrate), sodyum bikarbonat (Sodium Bicarbonat), Amonyum klorit (Ammonium Chloride), TSB (Tryptic Soy Broth), Ultra Saf Su, HCl (hidro klorik asit), NaOH (Sodyum Hidroksit) olup malzemelerin özellikleri aşağıda belirtilmiştir.

3.1.2.a. Üre ($\text{CH}_4\text{N}_2\text{O}$)

Üre bir organik bileşiktir. Formülü $\text{H}_2\text{N}-\text{CO}-\text{NH}_2$ 'dir. Karbonik asit diamid, karbamit olarak da bilinir; çünkü karbamik asit ayrıca amiddir. Temel fiziksel ve kimyasal özellikleri aşağıdaki gibidir.

a) Görünüş	Fiziksel hali: Toz ; Renk: beyaz
b) pH	7,4 ~ 9,6
c) Erime noktası	132 ~ 135°C
d) Su içinde çözünürlüğü	480 g/l
e) Kütle yoğunluğu	700 ~ 800 kg/m ³

3.1.2.b. Kalsiyum klorür dihidrat ($\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)

Kalsiyum klorür dihidrat (Calcium Chloride Dihydrate) oda sıcaklığında katı haldeki iyonik tuzlardan biridir. Doğrudan kalker veya Solvay prosesi sonucunda yüksek oranlarda bir yan ürün olarak üretilebilir. Higroskopik yapısı olduğundan dolayı, kapalı kap içerisinde saklanması gerekmektedir. Fiziksel ve kimyasal özellikleri aşağıdaki gibidir.

a) Görünüş	Fiziksel hali: Kristal; Renk: beyaz
b) pH	5,00 ~ 8,00
c) Erime noktası	176°C
d) Su içinde çözünürlüğü	147 g/l
e) Nispi yoğunluğu	1,85

3.1.2.c. Sodyum bikarbonat (NaHCO_3)

Sodyum bikarbonat (Sodium Bicarbonat) kimyasal formülü NaHCO_3 olan bir bileşiktir. Antiasit özelliği vardır ve sodyum tuzlarından birisidir. Soda ve kabartma tozu olarak da

isimlendirilir. Beyaz katı kristal toz şeklinde olup suda çözünür ve sodyum karbonatı andıran alkali tadı vardır. Temel fiziksel ve kimyasal özellikleri aşağıdaki gibidir.

a) Görünüş	Fiziksel hali: Toz; Renk: beyaz
b) Molekül ağırlığı	84,01 g/mol
c) Erime noktası	300°C
d) Su içinde çözünürlüğü	50,00 g/l
e) Nispi yoğunluğu	2,160

3.1.2.d. Amonyum klorür (Ammonium Chloride)-NH₄Cl

Amonyum klorür (nişadır), (Ammonium Chloride) hidrojen klorür ile amonyak birleşimi ile oluşan toz şeklinde olan tuzdur. En fazla kuru pillerde elektrolit olarak kullanılan amonyum klorür, kalaylamada ve galvanizleme, ayrıca lehim tutmasını kolaylaştırmak amacıyla lehimcilikte de yaygın olarak kullanılır. Temel fiziksel ve kimyasal özellikleri aşağıdaki gibidir.

a) Görünüş	Fiziksel hali: Kristal Toz
b) pH	4,50 ~ 4,55
c) Erime noktası	340 °C
d) Su içinde çözünürlüğü	Çözünür
e) Kütle yoğunluğu	500

3.1.2.e. Besin TSB (Tryptic Soy Broth)

TSB aerobik bakterilerin büyütülmesi için kültür içinde besin olarak kullanılan bir malzemedir. besininin temel fiziksel ve kimyasal özellikleri aşağıdaki gibidir.

a) Görünüş	Fiziksel hali: Toz
b) Renk	Bej
c) pH	7,10 ~ 7,50
d) Su içinde çözünürlüğü	Çözünür

3.1.2.f. Kalsiyum laktat (Calcium lactate)

Kalsiyum laktat $\text{Ca}(\text{C}_3\text{H}_5\text{O}_3)_2 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$, toz şeklinde olup kırık beyaz bir renge sahiptir. Laktik asitin tuzu ve bakteriler tarafından tüketilen doğal bir asit türüdür. Kalsiyum laktat besin olarak betonda kullanıldığında bakteriler tarafından tüketilerek kalsit oluşturmaktadır. Farklı renklerde; rustik yeşil, saydam, sarı, mavi ve beyaz renkte olmaktadır.

3.1.2.g. Ultra saf su

Doğadaki suyu kirleten faktörler 5 katagoride incelenebilir. Bunlar, iyonlar, organik moleküller, partiküller, kolloidler, bakteriler ve gazlardır. Labratuvarlarda kullanılan su tipleri üçe ayrılır. En düşük saflıktan ultra saflığa doğru su tipleri vardır. Ultra saf su en saf olan labratuvar suyu tipidir.

3.1.2.h. HCl (Hidroklorik asit) ve NaOH (Sodyum hidroksit)

Bakteri ekimi için kullanılan besiyerin pH'ını 6,5 civarında tutmak için bir mol HCl (asit) ve bir mol NaOH (Sodyum Hidroksit) kullanılmıştır.

3.1.3. Harç ve beton numuneler için laboratuvar malzemeleri

Agrega tane büyüklüğü dağılımının belirlenmesi için TS1227 ISO 3310-1 (2007)'ye uygun toplama kabı ile TS1226 ISO 3310-2 (2009)'ya uygun 0,25 - 0,50 - 1 - 2 - 4 - 8 ve 16 mm göz açıklıklı tel elekler kullanılmıştır.

Deneyisel çalışmalardaki numune betonlarının karılması işleminde, ELE firmasının ürettiği 135° açılı ile manevra yapabilen 60 dm³ kapasiteli, 25 dev/dk hızında, laboratuvar tipi betonyer kullanılmıştır.

Deneyisel çalışmalar kapsamındaki, harç numunelerin üretiminde çelikten imal edilmiş 40x40x40 mm küp, beton numunelerinin üretiminde ise eğilme deneyi için 70x70x280 mm prizmatik kalıplar ve basınç deneyi için 70x70x70 mm boyutlu küp kalıplar kullanılmıştır.

Taze betonun işlenebilirliğini belirlemek için, çelikten yapılmış, 800x800 mm boyutlarında bir tabla ve Abrams hunisi kullanılmıştır.

Sertleşmiş harç ve beton numunelerinin basınç ve eğilme dayanımını belirlemek amacıyla, kapasitesi 300 ton olan, ELE marka AUTOTEST 3000 marka pres kullanılmıştır.

Yapılan deneysel çalışmalarda kirece doymun durumdaki suyu $23\pm2^{\circ}\text{C}$ 'de sabit tutulabilen, çevrim pompalı tam dijital su kürü havuzu kullanılmıştır.

3.1.4. Bakteri ekimi için kullanılan alet ve cihazlar

Bakteri ekimi için çeşitli alet ve cihazlar kullanılmıştır. Vidalı kapaklı tüp, Mezür, Beher, otoklav, filtreler, ultraviyole lambası, etüv (inkübratör), terazi, Ph metre ve santrifüj kullanılmıştır.

Vidalı kapaklı şişe, ısı ve sığağa dayanıklı bir kapdır. Besiyer hazırlamasında hacimleri 25 ml'den 1000 ml'ye kadar değişen silindirik tüpler, Sıvı ve çözeltilerin hacmini ölçmek amacıyla ölçekli cam silindir mezür, çözelti karıştırma, hazırlama, ısıtma, aktarma ve kristalleştirme gibi işlemlerde beher ve bakteri ekim işleminde besiyeri steril etmek amacıyla otoklav kullanılmıştır.

- Otoklav (Autoclave)

Basınçlı su, buharla 100 °C'nin üzerinde sıcaklıkta çalışan bir sterilizasyon cihazıdır. Genel olarak yüksek sıcaklığa dayanıklı malzemelerin sterilizasyonu için kullanılmaktadır. Pipetler, boş şişeler, cam eşyalar sterilizasyonu otoklav ile yapılır. Otoklav iki ana bölümden, kazan ve ceketten oluşmaktadır. Ceket üzerinde; basınç ve sıcaklık manometresi, su vanası, buhar tahliye vanası ve su seviyesi göstergesi vardır. Kazan genellikle silindir şeklinde olup paslanmaz çelikten yapılmıştır. Kapak buhar sızdırmamak için vidalar vasıtasıyla gövdeye bağlanmıştır.

Izgaraların altında, su depolanacak bir rezervuar vardır. Standın alt kısmında su tahliye valfi ve elektrikle çalışan bir ısıtma sistemi bulunmaktadır. Buna ek olarak, aleti patlamaya karşı koruyabilen bir güvenlik valfi da bulunmaktadır. Otoklavın içindeki hava bulunması gerekmez. Bu nedenle havanın varlığı çeşitli dezavantajlara sahiptir. Bu dezavantajlar; 1. Hava, buharın küçük mahallere girmesini önler, 2. Hava buhardan daha ağır olduğundan, otoklavın tabanında toplanır ve daha serin bir tabaka oluşturur ve 3. Hava ile karışan su buharı sıcaklığı düşüktür.

Bu alandaki malzemeler istenen sıcaklığa kadar ısınmaz. Örneğin, tepedeki sıcaklık 115°C ve alttaki sıcaklık 80°C'dir. Otoklavdaki suyun sıcaklığı arttıkça buharlaşmaya başlar. Su kaynar ile paralel olarak üretilen buhar miktarı da artar. Bir süre havayla karışan musluktan buhar çıkar. Otoklavdan hava tamamen boşaldığında, buhar musluğu kapanır. Otoklavda oluşan buhar dışarı çıkacak bir yer bulamadığı için cihazın içindeki basınç yükselir.

Basınç yükseldiğinde, ibre 1 atm gösterirken, otoklavdaki sıcaklık 120°C olmaktadır. Bu basınca ve sıcaklığa ulaştıktan sonra istenen sterilizasyon işlemi 18-48 dakika bekletilerek tamamlanır. Isıtıcı kapatılır ve aletin soğuması beklenilir. Basınç sıfıra düştüğünde, buhar musluğu açılıyor. Buhar çıkışı durduğunda, otoklavın iç basıncı dış basıncına eşit olup ve valf derhal açılır. Basınç yüksekken buharlı musluk açılırsa basınç düşer ve otoklavda sterilize edilen sıvılar kaynar.

Bakteri üretimi esnasında kullanılan diğer yardımcı cihazlar aşağıda kısaca tanıtılmıştır.

- Filtreler

Çeşitli sıvılar filtrasyon yoluyla sterilize edildiğinde steriliz filtre kullanılır. Çok çeşitli ve farklı filtreler vardır. Bunlar; porselen, diyatumlu toprak, asbest filtresi, cam filtresi ve selülozik membran filtreleri olmaktadır. Bu çalışmada bakteri ekim aşamasında çözeltiyi steril etmek amacıyla steril filtre kullanılmıştır.

- Ultraviyole lambası (Ultraviolet lamp)

Oda havasını sterilize etmek için kullanılan mor ötesi ışını lambası sistemi olup çeşitli boyutlarda ve çeşitli testlerde kullanılır. Isıya dayanıklı camdan imal edilmiştir. Labratuvarda, tüpler her zaman temizlenir, ağızları kaplanır ve sterilize edilir. Bu çalışmada çözelti ve besiyer steril ortamda karıştırılıp bakteri ekimi yapılmıştır.

- Etüv (İnkübatör)

Mikroorganizmalar, kültür ortamına ekildikten sonra çoğalmalarına izin vermek için belirli bir sıcaklıkta tutulmalıdır. Bu amaçla kullanılan araçlara inkübatörler veya etuv denir. Etüv makinesi sabit sıcaklığı daima her yerde aynı olmalı veya $\pm 0,50$ °C'lik farktan büyük olmaması gerekmektedir. Etüv istenilen dereceye göre ayarlanabilir. Sahip olduğu termostat sayesinde aynı tutarlılığı korur. Sıcaklık, inkübatör içinde tutturulmuş bir termometre ile kontrol edilir. Bu cihaz tez kapsamında 25°C da bakteri ekimi ve çoğaltmasında kullanılmıştır.

- pH metre

En az 0,10 hassasiyetli elektrometrik pH metre, sıvı ortamın ve diğer sıvıların pH değerlerini doğrulamak için kullanılır. Elektrikli veya pil ile çalışan aletler olup ve farklı

modellerde bulunur. Bakteri ekimi için besiyerin pH'ının 6,5 civarında olması gerekmektedir. Bu cihaz bakteri ekim aşamasında ortamın pH değerini ölçmek ve kontrol altında tutmak için kullanılmıştır.

- Santrifüj aparatı (Centrifugal)

Sıvılarda bulunan parçacıklar, mikroorganizmalar ve hücreler, sıvıları çökertip temizlemek için santrifüjler kullanılır. Deney amacı doğrultusunda çeşitli santrifüjler kullanılmaktadır. Bazıları orta (normal santrifüj), diğerleri yüksek hızlı (ultra santrifüj) ve bazıları soğutulmalıdır (soğutmalı santrifüj). Çökecek malzemenin çapı ne kadar büyük olursa, çökme hızı da o kadar hızlı olur. Örneğin, kan hücreleri yaklaşık olarak 1050, bakteri 4500-5500 ve virüsler 70000-110000 devir/dakika da çökebilirler. Bu çalışmada bakteri ekiminde karışımların hemojenliğini sağlamak için santrifüj aparatı kullanılmıştır.

3.1.5. İçyapı incelemeleri için kullanılan cihazlar

Bu çalışmada Atatürk Üniversitesi DAYTAM merkezinde XRD ölçümleri yapılmış ve SEM görüntüleri alınmıştır. XRD ölçümleri için X-ışını Kırınım spektroskopisi SEM fotoğrafları için ise Taramalı elektron mikroskobu kullanılmıştır.

3.2. Yöntem

3.2.1. Agrega deneylerinde uygulanan yöntemler

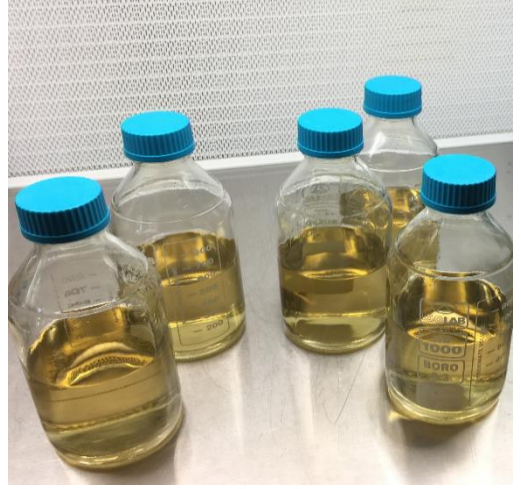
Agrega deneyleri için yığının tümünü temsil etmesi amacıyla TS EN 1097-3 (1999)'da belirtilen dörde bölerek küçültme yöntemi kullanılarak örnekler alınmış ve alınan numuneler üzerinde elek analizi, birim ağırlık, tane yoğunluğu ve su emme, organik madde tayini ve çok ince malzeme miktarı tayini deneyleri yapılmıştır.

Agreganın tane büyüklüğü dağılımı, TS 3530 EN933-1/A1 (2007)'ye uygun olarak belirlenmiştir. Elek takımı, TS EN 1227 ISO 3310-1 (2007) ve TS EN 1227 ISO 3310-2 (2009)'ye uygun toplama kabı, 0,25 - 0,5 - 1 - 2 - 4 - 8 - 16 mm göz açıklıklı kare delikli elekler, tava ve kapaktan ibarettir. Birim ağırlık deneyleri TS 3529 (2009)'a göre yapılmıştır. Deneylerde her bir agrega tane sınıfı için TS EN1097-6/A1 (2007)'ye uygun olarak tane yoğunluğu ve su emme deneyleri yapılmıştır. Organik madde tayini deneyi TS EN 1744-1 (2011)'e göre yapılmıştır. Bu deneyde 8 mm göz açıklıklı kare gözlü tel elekten elenen malzeme %3'lük NaOH (Sodyum hidroksit) çözeltisi içinde 24 saat bekletilerek gözlem yapılmıştır. Çok ince malzeme miktarı tayini TS706 EN12620 (2009) ve TS3530 EN933-1/A1 (2007)'e uygun olarak yapılmıştır. TS 706 EN 12620+A1'de çok ince malzeme muhtevası 63 µm göz açıklıklı elekten geçen agrega tane sınıfı olarak tanımlanmaktadır.

Yapılan deneyler sonucunda elde edilen değerler Araştırma Bulguları Bölümü'nde verilmiştir.

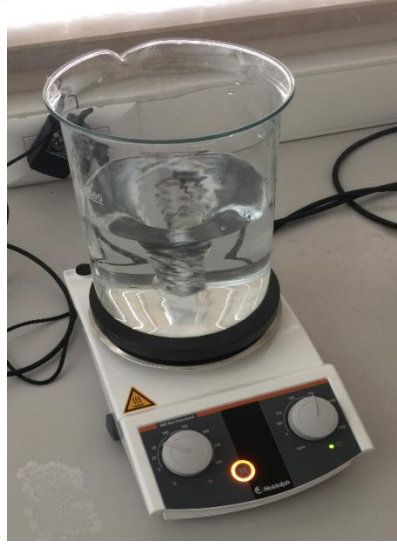
3.2.2. Bakteri ekimi için karışım hesapları

DAYTAM Mikrobiyoloji Labratuvarında, 800 ml bakteri üretimi için 600 ml besiyer ve 200 ml çözelti hazırlanmıştır. Besiyer otoklavda sterilize edilmiştir. Çözelti ise, ürenin sıcaklıkta çözülüp bozulmasından dolayı otoklavda değil filtreden geçirilerek sterilize edilmiştir. Bakteri üretiminde 600 ml besiyer için 2,25 g TSB ve 7,5 g amonyum klorit ve 1,59 g sodyum bikarbonat ile ultra saf su kullanılmıştır. Besiyer için malzemeler amaca uygun kaplarda ultra saf su içinde homojen olarak karıştırılmış ve 121°C'da 15 dakika otoklavda sterilize edilmiştir. Sterilize etme işlemi tam 1 saat sürmüştür. Hazırlanmış besiyer sarımsı renkte olup, pH'ı da $6,5 \pm 0,2$ 'dur. (Şekil 3.3)



Şekil 3.3. Besiyer hazırlanması

600 ml besiyer için 200 ml çözelti üretilmiştir. 200 ml çözelti için 20 g üre ve 2,8 g kalsiyum klorit dihidrat ultra saf su içinde çözülmüştür. Tüm işlemler steril kaplarda ve malzemelerle yapılmıştır (Şekil 3.4).



Şekil 3.4. Çözelti hazırlanması

Çözelti hazırlandıktan sonra steril filtreden geçirilip, besiyerin otoklavdan çıkması beklenmiştir (Şekil 3.5).



Şekil 3.5. Çözeltinin steril filtreden geçirilme işlemi

Besiyer otoklavdan çıktıktan sonra 25°C sıcaklığa kadar bekletilmiştir. Daha sonra çözelti aseptik koşullar dikkata alınarak steril kabin içinde besiyere eklenmiş ve bakteri ekimi için hazırlanmıştır (Şekil 3.6).



Şekil 3.6. Çözeltinin besine eklenme işlemi

Daha sonra bakteri besiyere eklenip, etüve koyulmuştur. Etüvde 2-3 gün içinde bakteri çoğalmaya başlamış ve miktarı $1-2 \times 10^9$ CFU olduğunda etüvden çıkarılmıştır (Şekil 3.7).



Şekil 3.7. Bakteri ekim işlemi

3.2.3. Bakteri sayımı

Bakteri sayımı turbidometrik olarak mikroorganizma McFarland Standard I (Şekil 3.8) referans alınarak belirlenmiş ve uygun sayıda süspansiyon oluşturulmuştur.



Şekil 3.8. McFarland standartları

MSB içerisinde oluşan kalsifikasyonu kişisel gözlemden arındırıp sayısal değerler elde etmek için spektrofotometre kullanılmıştır. Spektrofotometrede 540 nanometre (nm) dalga boyunda % transmitans alınmıştır. Transmitans olarak çözeltiye giren ışığın yüzde kaçının çözeltiden çıktığı gösterilmiştir. Kontrol grubunu kör kabul ederek tüm solusyonlardaki bulanıklık derecesini yani kalsifikasyon miktarları değerlendirilmiştir. Kalsifikasyon miktarı solusyon içerisindeki partikül miktarı ile orantılı olduğundan, solusyon içerisinde ne kadar partikül var ise içerisinde geçen ışık miktarı o kadar az olacağından kişisel gözlem hatası ortadan kaldırılmıştır.

3.2.4. Ön deneme harç numuneleri için karışım hesabı

Bu çalışmada, karışıma girecek agrega, çimento ve bakteri seçimi ile karışımda kullanılacak malzemelerin oranlarının tespiti için daha önce yapılan çalışmalardan yararlanılmıştır.

İnce agrega olarak 1-5 mm aralığında dere kumu kullanılmıştır. Çimento dozajı 460 kg, su/bağlayıcı oranı ise 0,50 olarak sabit tutulmuştur. V. Arenosii bakterisi 10^7 ve 10^9 CFU oranlarında hazırlanan harç karışımlarına eklenmiştir. Belirlenmiş olan sabit dozaj ve su/çimento oranından yola çıkılarak karışım suyu miktarı 1m^3 için 230 kg olarak hesaplanmıştır. Su miktarlarına, bağlayıcı hacmi ve bütün karışımlar için seçilen %1 hava hacmi eklenmiş ve 1000 dm^3 'den çıkarılarak 1m^3 harçdaki toplam ince agrega hacmi hesaplanmıştır. Tüm seriler için karışıma giren malzeme miktarları Çizelge 3.3'de verilmiştir.

Çizelge 3.3. Ön deneme harç numunelerinin karışım oranı

Harç numunelerinin karışım oranı	
Malzeme	Kg/m ³
Çimento	460
İnce agrega (1-5 mm)	1460
Su	230

Karışım suyu olarak kontrol numunelerinde şebeke suyu kullanılırken, 10^9 CFU içeren numunelerde 10^9 CFU'lu su karışıma ilave edilmiştir. Hazırlanan bakterili su 10^9 CFU içerdiği için 10^7 CFU'lu numunelerde aynı oranda seyreltilerek (100 kat) karışıma ilave edilmiştir. Böylelikle 10^7 CFU'lu su elde edilmiştir.

Harç numuneleri Atatürk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendiliği Bölümü Yapı Malzeme ve Tatbiki Mekanik Labratuarında üretilmiştir. Üretilen numunelerin 7 ve 28 günlük basınç dayanımı belirlenmiştir (Şekil 3.9).



Şekil 3.9. Ön deneme harç numuneleri

3.2.5. Harç numuneleri için karışım hesabı

Ön denemelerde bakterili numunelerin kontrol numunelerine göre basınç dayanımında artış sağlamadığı ve yaklaşık değerlerin elde edildiği görülmüştür. Bunun sonucunda yeni bir karışım hesabı hazırlanmış ve numunelere besin (kalsiyum laktat) ilave ederek yeni denemeler yapılmıştır. Ön denemelerde bakterilerin işlenebilirliği azalttığı tespit edilmiş ve harçların çok iyi sıkıştırılamaması ve yerleştirilememesinin dayanımda olumsuz etkiye sebep olduğu düşünülmüştür. Bunun sonucunda İşlenebilirliği iyileştirmek için su/çimento oranı 0,55'e yükseltilmiştir. Çimento dozajı 454 kg seçilmiş ve bakteri 10^7 ve 10^9 CFU miktarında karışıma ilave edilmiştir. Ayrıca bakterinin tüketeceği besin miktarının ortamda yeterli olmadığı düşüncesiyle ön denemelerden farklı olarak çimentonun %1 oranında besin (kalsiyum laktat) harç karışımlarına eklenmiştir. Karışıma giren malzeme miktarları Çizelge 3.4'de verilmiştir.

Çizelge 3.4. Harç numunelerinin karışım oranı

Harç numunelerinin karışım oranı	
Malzeme	Kg/m ³
Çimento	454
İnce agregası (1-5 mm)	1447
Su	250
Besin	0

Besinli (çimentonun %1'i) harç numunelerinin karışım oranı	
Malzeme	Kg/m ³
Çimento	454
İnce Agregası (1-5 mm)	1447
Su	250
Besin	4.54

Üretilen numunelerin 7 ve 28 günlük basınç dayanımı belirlenmiştir. Bakterili numunelerde kontrol numunelerine göre basınç dayanımında daha iyi sonuçlar elde edilmiş (yaklaşık olarak %15 artış) ve daha sonra beton numunelerinin hazırlanmasına karar verilmiştir.

3.2.6. Beton numuneleri için karışım hesabı

Bakterilerin betonda etkisini incelemek için beton numuneler hazırlanmış ve hazırlanan numuneler üzerinde basınç ve eğilme dayanımı deneyleri yapılmıştır. Beton numuneleri için iki farklı bakteri ile deneme yapılmıştır. Harç numunelerde olduğu gibi *V. Arenosii* bakterisi kullanılmış buna ilave olarak literatürde çokça kullanılmış olan *B. Pasteurii* bakterisi de karşılaştırma yapılabilmek için denenmiştir. Agregası olarak 1-5 tane sınıfı ince agregadan ağırlıkça %52 ve 4-16 tane sınıfı iri agregadan %48 oranlarında malzeme karışımına ilave edilmiştir. Çimento dozajı 510 kg, su/çimento oranı ise 0,55 olarak sabit tutulmuştur. Bakteriler 10⁷, 10⁸ ve 10⁹ CFU ve besin (kalsiyum laktat) çimentonun %1'i

oranlarında hazırlanan beton karışımlarına eklenmiştir. Karışıma giren malzeme miktarları Çizelge 3.5’da verilmiştir. Her grup için üçer adet numune dökülmüş olup deney sonuçları bu numunelerin ortalama değerleri alınarak belirlenmiştir.

Çizelge 3.5. Beton numunelerinin karışım oranı

Beton numunelerinin karışım oranı	
Malzeme	Kg/m ³
Çimento	510
Agrega (İnce-İri)	1610
Su	280
Besin	0
Besinli (çimentonun %1’i) beton numunelerin karışım oranı	
Malzeme	Kg/m ³
Çimento	510
Agrega (İnce-İri)	1610
Su	280
Besin	5.1

Karışımındaki malzeme miktarları hassas terazide tartılarak deney numuneleri hazırlanmış ve betonlar üretilmiştir. Bu işlem sırasında malzeme kayıpları göz önünde bulundurularak gerekli miktarlar %10 oranında artırılmıştır. Beton deneyleri kapsamında her iki kür koşulu için 14 farklı grupta toplam 168 numune üretilmiştir.

3.2.7. Betonun kürü (bakımı)

Su ve çimento arasındaki kimyasal reaksiyonlardan kaynaklanan hidrasyon ürünleri çimento hamuruna bağlayıcılık sağlarken, boşluk oranını düşürür. Çimento hamurunun dayanımı hidrasyonun ne derece gerçekleştiğine bağlı olmaktadır.

Hidrasyonun gerçekleşmesi ve normal hızda devam edebilmesi için, çimento hamurunun kılcal boşluklarında yeterli miktarda su olması ve beton sıcaklığının çok

düşük olmaması gerekmektedir. Bu sebeple betonlar yeterli dayanıma ulaşınca kadar kür edilmelidir.

Kür koşulları dayanım üzerinde çok etkili bir faktör olduğu için bu çalışmada da beton numuneleri 2 farklı şekilde 7 ve 28 gün boyunca kür edilmiştir. Numunelerin bir kısmı kirece doygun suda kür edilirken bir kısmı bakterili su ortamında küre bırakılmıştır. Farklı kür koşulların etkisi incelenmiş ve sonuçlar Araştırma Bulgularının bölümünde tartışılmıştır.

3.2.8. Betonun basınç dayanımı tayini yöntemi

Betonun basınç dayanımı "betonun eksenel basınç yükünün etkisi altında kırılmaya direnç gösterebilme yeteneği (eksenel basınç yükünün etkisiyle oluşan maksimum gerilme)" olarak tanımlanır.

Bu çalışma kapsamında, basınç dayanımları tüm numunelerde kür sonrası 7. ve 28. günde belirlenmiştir. Betonun basınç dayanımının elde edilebilmesi için uygulanan “standart deney yöntemi” ile ilgili Türk ve ASTM standartları TS EN 12390-3, ASTM C192 ve ASTM C39 olup bu konudaki Türk ve ASTM standartları birbirine oldukça benzerdir. Tüm numuneler sabit bir yükleme hızı altında (0,4 MPa/s) deneye tabi tutulmuştur. TS12390-3’e göre bu değer 0,2 MPa/s ile 1,0 MPa/s arasında olmalıdır.

3.2.9. Betonun eğilme dayanımı tayini yöntemi

Betonda basınç ve eğilme dayanımları birbiriyle yakından ilgilidir. Genelde betonun çekme ve eğilme dayanımı basınç dayanımının %10-%12’i kadardır. Betonun yaşına ve kalitesine bağlı olarak miktarlar değişebilmektedir.

Betonun eğilme dayanımının bulunabilmesi ile ilgili ASTM ve Türk standartları, TS EN 12390-5, ASTM C 293 ve ASTM C 78 (300-302) dir. Betonun eğilmede çekme

dayanımının bulunabilmesi için 7x7x28 cm kiriş numuneler hazırlanmış ve Şekil 3.10 da görüldüğü gibi eğilme yükü altında kırılmaya tabi tutulmuştur.



Şekil 3.10. Eğilme deneyi yöntemi

Beton numunelerinin kırılmasına neden olan yük, cihaz göstergesinde okunduktan sonra eğilme dayanımını hesaplamak için aşağıdaki formül kullanılmıştır.

$$\sigma_e = 1,5PL/bd^2$$

Burada ;

σ_e = Eğilme Dayanımı

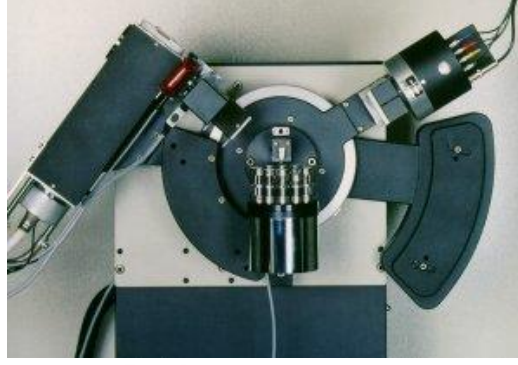
P =Maksimum Yük (numunelerden elde edilen ortalama yük)

L =Mesnetler arası mesafe (L=20cm)

d =Kiriş kesitinin yüksekliği (d)

b =Kiriş kesitinin eni (b)

3.2.10. XRD cihazı ölçüm yöntemi



Şekil 3.11. XRD cihazı

Şekil 3.11 bir XRD cihazını ve dedektörün V-şekilli bir açıyla birbirine bağlandığını göstermektedir.

X-ışını spektroskopisi yöntemleri birçok çeşittir ve optik spektroskopiye benzerdir. Bu bağlamda, nitel ve nicel analizlerde X-ışınlarının emisyon, absorpsiyon (emilim) ve difraksiyonuna (kırılma) dayalı analitik yöntemler yaygın olarak kullanılmaktadır.

- XRD temel ilkeler

a. X-ışınlarının Yayılımı (Emisyon)

X-ışınları analitik amaçlar için üç şekilde kullanılır:

- Metalik bir hedef yüksek enerjili elektron demetinin bombardımana tutulur.
- Floresan X-ışınları elde etmek için bir maddeye X-ışınları gönderilir.
- X-ışını emisyonlu bir radyoaktif kaynak kullanılır.

X-ışını kaynakları, ultraviyole ve görünür ışın veren kaynaklarda olduğu gibi, hem sürekli hem de kesikli spektrum verirler; bu iki tip de analizlerde önemlidir. Sürekli ışına "beyaz ışın" veya "Bremsstrahlung" adı da verilir.

b. X-Işınlarnn Emilmesi (Absorbsiyon)

Dar bir X-ışını demeti ince bir malzeme tabakasından geçirildiğinde emme ve saçılmaya bağı olarak ışının yoğunluğunda bir azalma meydana gelir. Önemli mesafelerde, emilen dalga boyu bölgelerindeki kırılma etkisini büyük ölçüde azaltır. Bir elementin absorpsiyon spektrumu emisyon spektrumunda olduğu kadar basittir ve iyi tanımlanmış birkaç emilim piki vardır. Burada piklerin dalga boyu elemente özeldir ve elemanın kimyasal bileşenlerine bağı değildir.

X-ışını absorpsiyon spektrasının kendine özgü bir görünümü vardır; absorpsiyonun tepe noktasından hemen sonra pik keskin bir iniş (eğri yapmadan) yapar, bunlara "absorpsiyon sınırları" denir.

X-ışını absorpsiyon spektrumu kendi benzersiz görünümüne sahiptir; Zirve noktası, emme zirvesinden hemen sonra "absorpsiyon sınırları" olarak adlandırılan keskin bir iniş yapar.

c. X-Işını Floresans

Elektronik olarak uyarılan iyonlar, X-ışını emilimi ile oluşturulur; Bunlar üst düzey elektronların geçiş boyutudur. Buna göre, kurşun, ışını daha kısa bir dalga boyu olan $0.145 \text{ \AA}$ 'de absorbe ettiğinde, boş bir K seviyesine sahip yüklü bir iyon oluşturulur; Kısa süre sonra, bir dizi elektronik geçişler (X-ışını "floresans" emisyonu) iyonu temeline geri döndürür. Floresan çizgilerinin dalga boyu, absorpsiyon sınırının dalga boyundan her zaman daha büyüktür.

Floresans ayrıca bir X ışını tüpünden gelen ışık ile uyarılabilir. Bu durumda, daha düşük dalga boyu sınırı (λ_0) elemanın emici dalga boyundan daha kısa olmalıdır. Bu, çalışma voltajını olabildiğince arttırarak elde edilir. Buna göre, gümüş K hatlarını çıkarmak için tüp voltajı

$$V \geq \frac{12398}{0,485} \times 10^{-3} = 25,6 \text{ kV} \quad (3.1)$$

olmalıdır.

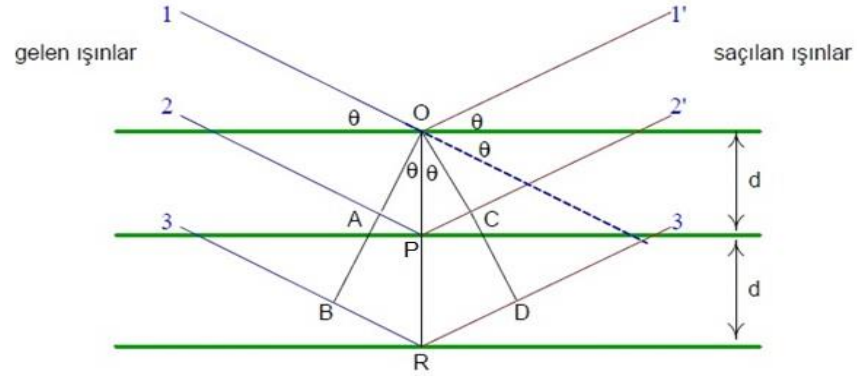
d. X-Işınlarnının Difraksiyonu (Kırılması)

Her tip elektromanyetik ışının elektrik vektörü ile, içinden geçtiği maddenin elekt-ronları arasındaki etkileşim sonunda saçılma olur. Bir kristale gönderilen X-ışınları kristalin düzenli yapısı tarafından saçılır; saçılan ışınlar birbirine şiddeti artırıcı veya azaltıcı etkiler yaparlar; nedeni saçıcı merkezler arasındaki mesafenin, ışının dalga boyu ile aynı büyüklükte olmasıdır; bu durum ışının kırılmasıyla sonuçlanır.

Her bir elektromanyetik ışın türünün elektrik vektörü ile geçirdiği maddenin elektronları arasındaki etkileşim dağınıktır. Bir kristale gönderilen X-ışınları, kristalin normal yapısıyla dağılır; dağınık ışınlar yoğunluğu arttırmak veya azaltmak için birbirlerini etkiler; saçılma merkezleri arasındaki mesafe, ışığın dalga boyuyla aynıdır ve bu da ışının kırılmasına neden olmaktadır.

- Bragg Yasası

Kristal yüzeye ulaşan bir X ışını demetinin bir kısmı, yüzey üzerindeki atomlar tarafından dağılır. Saçılmayan kısım ikinci atom katmanına girer ve burada bir kısım dağılır. Kalan kırıış üçüncü katmana geçer. Düz kristal merkezleri kırıışın kırılmasına neden olur. Bu, yansıtıcı ızgaranın görünür ışık kırılma fenomeni ile aynıdır. Kırılmanın gerçekleşmesi için, (A) atomik katmanlar arasındaki mesafe, ışının dalga boyu ile aynı büyüklükte olmalıdır, (B) ışın veren mercekler çok düzgün olmalıdır.



Şekil 3.12. X-ışınlarının (X-rays) kırılması

1912'de W. L. Bragg X-ışınlarını Şekil 3.12'deki gibi bir kristal maddeye göndererek araştırmalar yapmıştır. Burada, dar bir ışın demeti kristal yüzeyine θ açısı ile çarpılmaktadır; O, P ve R konumundaki atomlarla ışının etkileşimi saçılmaya yol açmaktadır. Mesafe,

$$AP + OC = a\lambda \quad (3.2)$$

fomuluiyle verilir, a bir sayıdır. Saçılan ışın O C D deki faz içinde bulunur ve kristalin X-ışınını yansıtması beklenir. Burada,

$$AP = PC = d \sin \theta \quad (3.3)$$

eşitliği vardır. d , kristalin düzlemler arasındaki mesafeyi gösterir. Buna bağlı olarak, θ açısı ile gelen demetin yapıcı etkisi olması için

$$a\lambda = 2d \sin \theta \quad (3.4)$$

bağıntısının bulunması gerekmektedir. Bu denkleme Bragg formülü denilir. Yani, bir kristale gönderilen X-ışınları kristalden gelen ışının aşağıdaki,

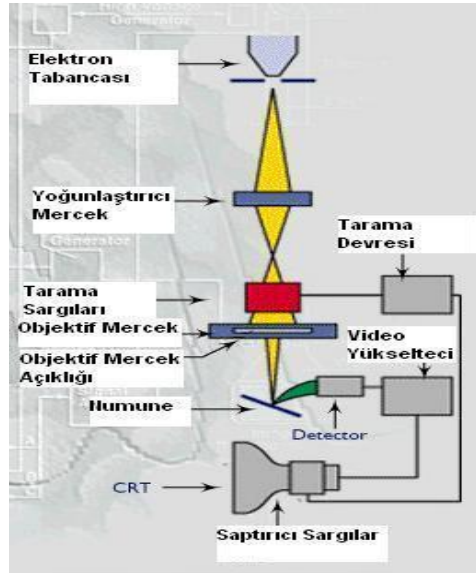
$$\sin \theta = a\lambda / 2d \quad (3.5)$$

eşitliğini sağlamasıyla yansıyabilir.

3.2.11. SEM Cihazının Çalışma Prensibi

Taramalı elektron mikroskobu üç temel parçadan oluşur: görüntüleme sistemi, optik kolon, ve örnek hücresi (Şekil 3.13). Optik kolon bölümünde; üzerine elektronları hızlandırmak için yüksek gerilimin uygulandığı bir anod plakası, ince bir elektron demeti elde etmek için yoğunlaştırıcı mercekler, demeti numuneye odaklamak için bir objektif mercek, bu merceğe bağlı çeşitli çap açıklıkları ve tarama bobinleri elektron ışınının numune yüzeyine almaktadır. Mercek sistemleri, elektromanyetik alanla elektron demetini odaklıyor veya inceltiyor.

Tüm numune ve optik kolon, 10^{-4} Pa'lık bir vakumda tutulur. Görüntü sisteminde, çeşitli elektronları toplayan dedektörler ve bunların elektron ışını ile numune interferometrisi sonucu oluşturulan montajları, sinyal amplifikatörleri ve manyetik bobinler görüntü ekranı ile senkronize olarak numune yüzeyindeki elektron demetinin taramaktadır.



Şekil 3.13. Şematik olarak SEM cihazının çalışması

4. ARAŞTIRMA BULGULARI

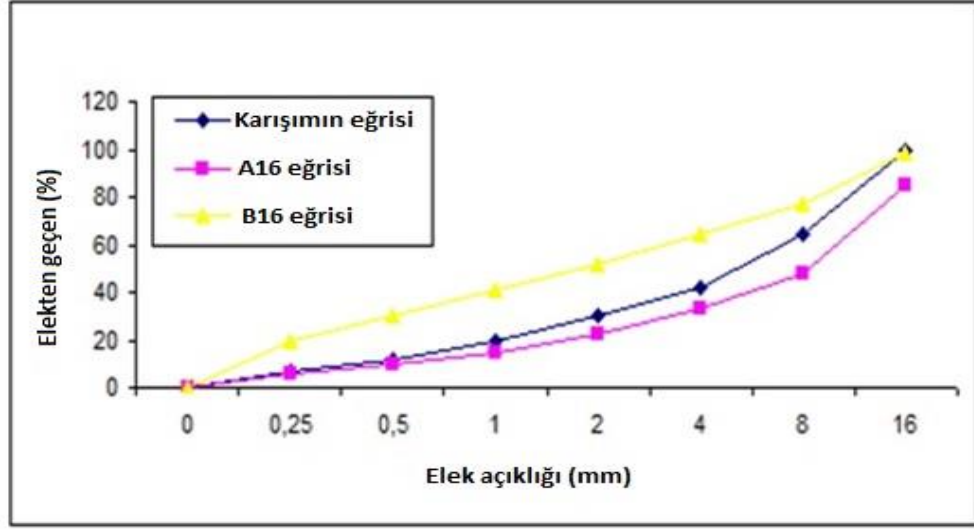
Bu bölümde, agregâ, harç ve beton deneylerinden elde edilen sonuçlar verilmiş, çizelge ve şekillerle desteklenerek teknik literatür ışığında yorumlanmıştır. Betonda çatlakların kendiliğinden onarılması, kimyasal ve fiziksel süreçlerin bir kombinasyonudur. Kalsiyum karbonat veya kalsitin oluşması, betonun içinde ve dışında bulunan mikro boşluklar ve mikro çatlakların doldurulmasına neden olmaktadır.

Literatür araştırmalarına göre betonda bakteri kullanılarak, beton kendi kendini onarma özelliğine sahip olmaktadır. Tez kapsamında harç ve beton numuneler üzerinde deneyler yapılmış ve bakterilerin etkisi incelenmiştir.

4.1. Agregâ Deneyleri

4.1.1. Elek analizi (Granülometri)

İnce ve iri agregâ için standart kare açıklıklı eleklerle, etüv kurusu durumundaki numuneler üzerinde elek analizi deneyi ayrı ayrı yapılmıştır. Bu deneylerden elde edilen sonuçlara göre karışımın eğrisi, referans eğriler arasında kalacak şekilde düzenlenmiş ve %52 iri ve %48 ince agregâ karışıma dahil edilmiştir. Betonda kullanılan agregânın granülometri eğrisi Şekil 4.1’de gösterilmiştir.



Şekil 4.1. Karışımında kullanılan agreganın granülometri eğrisi (TS 802-2009)

4.1.2. Birim ağırlık

Bu deneyde, ince ve iri agregaların, birim ağırlık değerleri ayrı ayrı bulunmuştur. Birim ağırlık deneyleri hava kurusu durumunda bulunan agregalar üzerinde yapılmıştır. İnce agreganın için gevşek birim ağırlık 1420 kg/m^3 , sıkışık birim ağırlık 1690 kg/m^3 olarak hesaplanmıştır. Bu değerler iri agreganın için ise sırasıyla 1470 kg/m^3 ve 1580 kg/m^3 olarak belirlenmiştir.

4.1.3. Organik madde tayini

İnce agregadan alınan malzeme üzerinde yapılan organik madde tayini deneyinde ölçü silindirlerindeki malzeme üzerinde kalan sıvıda herhangi bir renk değişimi gözlenmemiştir. Yani sıvı renksizdir. TS EN 1744-1 (2011)'e göre bekletilen süre sonunda sıvının renksiz veya açık sarı olması malzeme içerisinde beton üretimi için zararlı oranda organik madde bulunmadığını, koyu sarı, kahve rengi veya kırmızımsı bir renk alması durumunda ise beton üretimi için zararlı organik madde bulunduğunu belirtmektedir.



Şekil 4.2. Karışımda kullanılan agregada organik madde tayini deneyi

Karışımda kullanılan agreganın içerisinde bulunduğu organik madde yapılan gözlemsel değerlendirmeye göre beton üretimi için uygun olduğu belirlenmiştir (Şekil 4.2).

4.1.4. İnce madde oranı tayini

Beton agregalarında ince maddelerin (kil-silt) fazla miktarda olması, agrega taneleri ile çimento hamuru arasındaki aderansın zayıflamasına ve çimentonun prizini geciktirmesine neden olduğundan istenmeyen bir durumdur (Postacıoğlu 1987). Deneylerden elde edilen sonuçlar ilgili standartlar ile karşılaştırıldığında kullanılan agregalarda betona zarar verecek oranda ince taneli malzeme bulunmadığı belirlenmiştir.

Bu çalışmada kullanılan agreganın ince ve iri kısımları için ayrı ayrı ince madde oranı tayini deneyi yapılmış ve ince agregada ince madde oranı %1,9 iri agregada ise %0,86 olarak hesaplanmıştır. Bu sebeple agregaların beton üretimin için kullanılabilir olduğuna karar verilmiştir.

4.1.5. Tane yoğunluğu ve su emme oranı tayini

Agregaların tane yoğunluğu ve su emme oranının belirlendiği bu deneyde kuru özgül ağırlık, doymun kuru yüzey özgül ağırlık, görünen özgül ağırlık ve 24 saatlik su emme

oranları tayini iri ve ince agregada için ayrı ayrı yapılmıştır. TS EN1097-6/A1 (2007)'ye göre yapılan bu deneyde ince agregada ve iri agregada için hesaplanan tane yoğunluğu ve su emme oranları Çizelge 4.1'de verilmiştir.

Çizelge 4.1. İnce ve iri agregada tane yoğunluğu ve su emme

Hesaplanan değerler	İnce agregada	İri agregada
Görünür tane yoğunluğu (ρ_a)	2,62	2,76
Etüvde kurutulmuş tane yoğunluğu (ρ_{rd})	2,40	2,63
Doygun ve yüzeyi kurutulmuş tane yoğunluğu (ρ_{ssd})	2,49	2,68
Su emme oranı (W_{A24})	%3,45	%1,84

4.2. Taze Betonda Çökme Deneyi

Betonun tüm numunelerinde çökme deneyi yapılmış ve deney sonuçları Çizelge 4.2'de gösterilmiştir. Beton numuneleri Kontrol, Kontrol + Besin, 10^7 V. Arenosii (10^7 CFU Viridibacillus Arenosii), 10^8 V. Arenosii (10^8 CFU Viridibacillus Arenosii), 10^9 V. Arenosii (10^9 CFU Viridibacillus Arenosii), 10^7 V. Arenosii + Besin (10^7 CFU Viridibacillus Arenosii + Besin), 10^8 V. Arenosii + Besin (10^8 CFU Viridibacillus Arenosii + Besin), 10^9 V. Arenosii + Besin (10^9 CFU Viridibacillus Arenosii + Besin), 10^7 B. Pasteurii (10^7 CFU Bacillus Pasteurii), 10^8 B. Pasteurii (10^8 CFU Bacillus Pasteurii), 10^9 B. Pasteurii (10^9 CFU Bacillus Pasteurii), 10^7 B. Pasteurii + Besin (10^7 CFU Bacillus Pasteurii + Besin), 10^8 B. Pasteurii + Besin (10^8 CFU Bacillus Pasteurii + Besin), 10^9 B. Pasteurii + Besin (10^9 CFU Bacillus Pasteurii + Besin) olmak üzere toplam 14 farklı grupta hazırlanmıştır.

Çizelge 4.2. Taze betonda çökme deneyi sonuçları

Beton gurubu	Çökme miktarı (cm)
Kontrol	17,5
Kontrol + Besin	16
10^7 V. Arenosii	16,5
10^7 V. Arenosii + Besin	15,5
10^8 V. Arenosii	15
10^8 V. Arenosii + Besin	14
10^9 V. Arenosii	14
10^9 V. Arenosii + Besin	13,5
10^7 B. Pasteurii	16
10^7 B. Pasteurii + Besin	15
10^8 B. Pasteurii	15
10^8 B. Pasteurii + Besin	13,5
10^9 B. Pasteurii	14
10^9 B. Pasteurii + Besin	13

Çizelge 4.12'ye göre bakterili betonlarda, özellikle bakteri sayısı fazla olan numunelerde az da olsa taze betonun işlenebilirliğinin azaldığı görülmüştür. Ayrıca besin kullanılan numunelerde daha az çökme belirlenmiştir. B. Pasteurii bakterisi V. Arenosii'ye göre işlenebilirlikte daha fazla etki göstermiştir. Bunun sebebi olarak B. Pasteurii bakterisinin V. Arenosii bakterisinden boyut olarak çok az miktar da olsa daha büyük olmsından kaynaklandığı düşünülmektedir.

4.3. Ön Deneme Harç Numunelerinin Basınç Dayanımı

Ön deneme amacı ile yapılan deneylerden elde edilen basınç dayanımı sonuçları Çizelge 4.13 de sunulmuştur. Bu numuneler 4 x 4 x 4 cm (Şekil 4.3) ebadında hazırlanıp ve 7 ve

28 gün normal suda (pH=6,5 ile 7 arasında) kür edildikten sonra basınç dayanımı tespit edilmiştir.

Çizelge 4.3. Ön deneme harç numunelerinin 7 günlük basınç dayanımları

Karışım	Numune numarası	Dayanım (MPa)	Ortalama dayanım (MPa)
Kontrol	1	16,84	17,09
	2	7,14*	
	3	17,34	
10 ⁷ V. Arenosii	1	15,24	16,48
	2	17,71	
	3	11,18*	
10 ⁹ V. Arenosii	1	18,11	17,72
	2	5,29*	
	3	17,34	

Çizelge 4.4. Ön deneme harç numunelerinin 28 günlük basınç dayanımları

Karışım	Numune numarası	Dayanım (MPa)	Ortalama dayanım (MPa)
Kontrol	1	21,43	21,13
	2	20,41	
	3	21,56	
10 ⁷ V. Arenosii	1	19,64	20,18
	2	20,73	
	3	12,02*	
10 ⁹ V. Arenosii	1	22,45	22,86
	2	10,35*	
	3	23,27	

* Bu değer diğer iki değerden çok farklılık gösterdiğinden deney hatası olarak değerlendirilmiş ve hesaplamalara katılmamıştır.

Sonuçlara göre harç numunelerin 7 günlük basınç dayanımlarında (Çizelge 4.3) en iyi sonuçları 10⁹ V. Arenosii bakteri olan numuneler vermiştir. Elde edilen verilere göre 10⁹ V. Arenosii numuneler kontrol numunelere göre yaklaşık olarak %3 artış göstermiştir.

28 günlük sonuçlarda (Çizelge 4.4) 10^9 V. Arenosii numuneler en yüksek basınç dayanımını göstermişlerdir. Kontrol grubuna göre yaklaşık olarak %7 daha yüksek dayanım sağlanmıştır. Bununla birlikte 10^7 V. Arenosii içeren gruplarda kontrol numunelerine göre az miktarda olsa dayanımda azalmalar tespit edilmiştir. Bakteri kullanımında beklenen dayanım artışının sağlamaması sonucu numunelere bakterinin tüketeceği bir besin ilave edilmesine (Henk *et al.* 2010) karar verilmiş ve sonraki gruplarda bakteri kalsiyum laktat ile birlikte kullanılmıştır.



Şekil 4.3. Ön deneme harç numunelerinin hazırlanıp kür edilmesi

4.4. Harç Numunelerin Basınç Dayanımı

Harç numuneler için yapılan deneylere göre elde edilen sonuçlar Çizelge 4.14 de gösterilmiştir. Bu numuneler 4 x 4 x 4 cm (Şekil 4.3) ebadında hazırlanmış ve 7 gün 28 gün kireçe doymun normal suda (pH=6,5 ile 7 arasında) kür edildikten sonra basınç dayanımı incelenmiştir. Bu numunelerde bakteri olarak Viridibacillus Arenosii kullanılmıştır.

Çizelge 4.5. Harç numunelerinin 7 günlük basınç dayanımları

Karışım	Numune numarası	Dayanım (MPa)	Ortalama dayanım (MPa)
Kontrol	1	18,87	19,34
	2	19,81	
	3	28,35*	
Kontrol + Besin	1	24,29	24,23
	2	24,17	
	3	33,56*	
10 ⁷ V. Arenosii	1	18,25	18,95
	2	20,46	
	3	18,13	
10 ⁷ V. Arenosii + Besin	1	20,48	21,38
	2	22,71	
	3	20,96	
10 ⁹ V. Arenosii	1	23,92	23,60
	2	39,38*	
	3	23,31	
10 ⁹ V. Arenosii + Besin	1	25,21	27,37
	2	26,35	
	3	28,55	

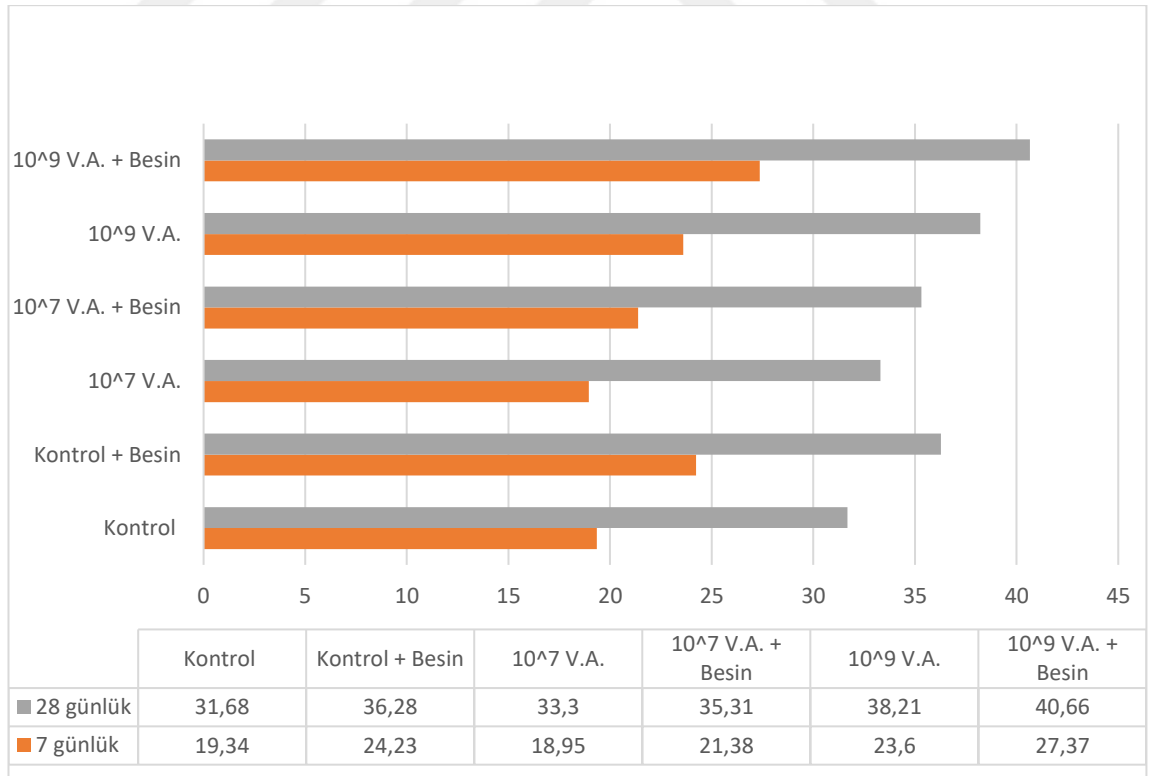
Çizelge 4.6. Harç numunelerinin 28 günlük basınç dayanımları

Karışım	Numune numarası	Dayanım (MPa)	Ortalama dayanım (MPa)
Kontrol	1	31,56	31,68
	2	31,81	
	3	43,17*	
Kontrol + Besin	1	36,24	36,28
	2	36,72	
	3	35,88	
10 ⁷ V. Arenosii	1	33,04	33,30
	2	42,13*	
	3	33,56	
10 ⁷ V. Arenosii + Besin	1	34,26	35,31
	2	36,57	
	3	35,11	
10 ⁹ V. Arenosii	1	30,88*	38,21
	2	39,17	
	3	37,25	
10 ⁹ V. Arenosii + Besin	1	40,28	40,66
	2	40,69	
	3	41,01	

* Bu değer diğer iki değerden çok farklı gösterdiğinden deney hatası olarak değerlendirilmiş ve hesaplamalara katılmamıştır.

Basınç dayanımının deneyinden elde edilen sonuçlar Şekil 4.4’de grafik olarak gösterilmiştir. 7 günlük (Çizelge 4.5) sonuçlara bakıldığında en yüksek dayanımın kalsiyum laktat besin ilave edilmiş ve 10^9 V. Arenosii içeren numunelerden elde edildiği görülmektedir. Bu grup kontrol numunelerine göre yaklaşık olarak %29 basınç dayanımında artış göstermiştir. Besin ilave edilmesi her grupta dayanım artışına sebep olmuştur. Kalsiyum laktatın boşlukları doldurması ve bakterili gruplarda bakterinin besini tüketerek daha fazla kalsit oluşturması bu artışın sebebi olarak düşünülmektedir.

28 günlük (Çizelge 4.6) basınç dayanımın değerlerine göre de en yüksek sonuç yine 10^9 V. Arenosii + Besin numunelerinden elde edilmiş olup kontrol numunelere göre yaklaşık olarak %22 artış belirlenmiştir. V. Arenosii içeren tüm gruplar kontrol numunelerine göre daha yüksek basınç dayanımı değerleri vermiştir. Besin içeren gruplarda dayanımlar daha fazla artmıştır.



Şekil 4.4. Harç numunelerinin 7 ve 28 günlük basınç dayanımları (MPa)

Sonuç olarak elde edilen değerlere göre 10^9 CFU bakteri kullanılan harçlarda daha iyi sonuçlar elde edilmiştir. Bunun nedeni olarak betonun mikro çatlaklarının kalsit (CaCO_3) ile dolması ve böylece dayanımın artışına yol aması olduğu düşünülmektedir. Ayrıca besin ilave edilmesi de bakterinin daha fazla kalsit oluşturmasına imkan tanıdığından dayanımların artmasına sebep olmuştur.

4.5. Beton Numunelerin Basınç Dayanımı

4.5.1. Normal su kürü uygulanan beton numunelerinin basınç dayanımı

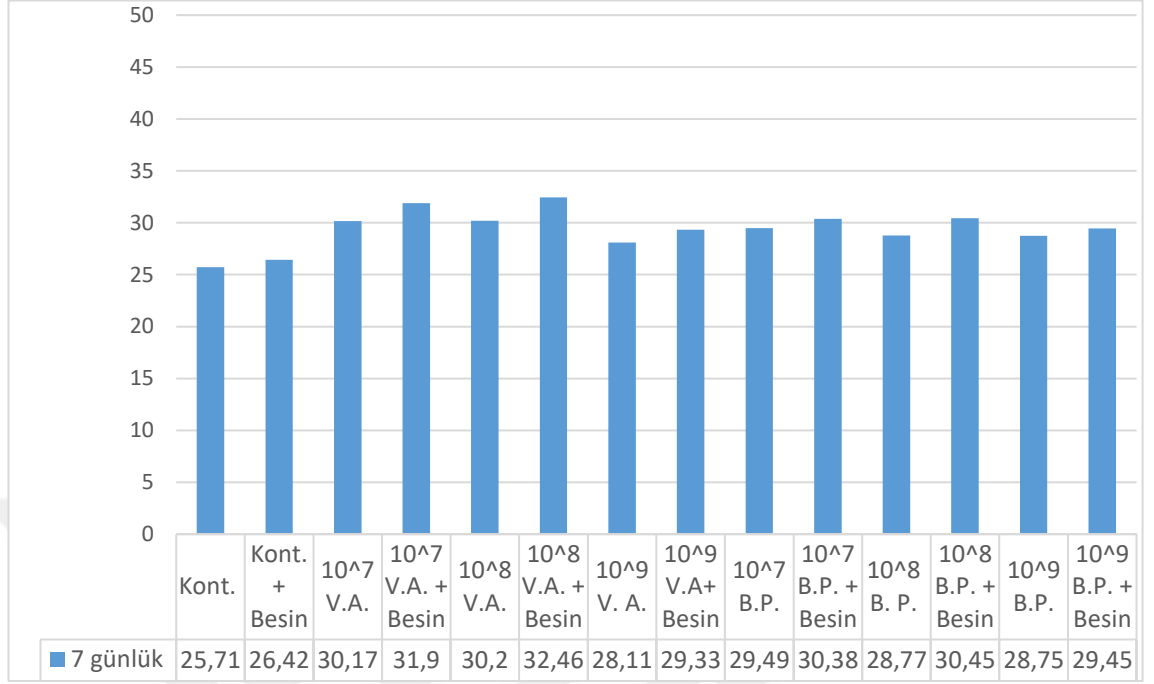
Beton numuneler için yapılan deneylerden elde edilen sonuçlar izelge 4.7 ve izelge 4.8’de sunulmuştur. Bu numuneler 7 x 7 x 7 cm ebadında hazırlanmış olup, 7 ve 28 gün normal suda (pH=6,5 ile 7 arasında) kr edildikten sonra basınç dayanımı deneyine tabi tutulmuştur.

Çizelge 4.7. Normal su kürü uygulanan beton numunelerinin 7 günlük basınç dayanımları

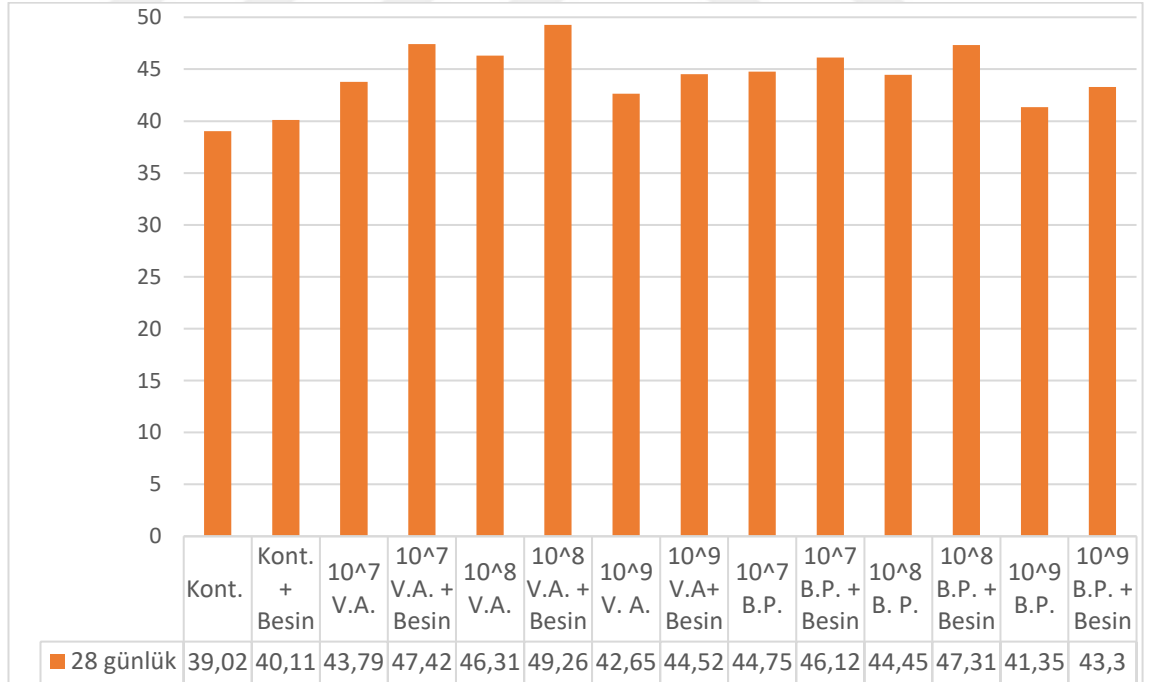
Karışım	Numune numarası	Dayanım (MPa)	Ortalama dayanım (MPa)
Kontrol	1	25,02	25,71
	2	25,27	
	3	26,83	
Kontrol + Besin	1	27,19	26,42
	2	26,02	
	3	26,06	
10 ⁷ V. Arenosii	1	28,91	30,17
	2	30,83	
	3	30,77	
10 ⁷ V. Arenosii + Besin	1	30,32	31,90
	2	32,43	
	3	32,94	
10 ⁸ V. Arenosii	1	31,15	30,20
	2	29,96	
	3	29,49	
10 ⁸ V. Arenosii + Besin	1	33,21	32,46
	2	32,46	
	3	31,72	
10 ⁹ V. Arenosii	1	28,47	28,11
	2	27,25	
	3	28,62	
10 ⁹ V. Arenosii + Besin	1	29,11	29,33
	2	28,82	
	3	30,06	
10 ⁷ B. Pasteurii	1	29,42	29,49
	2	29,77	
	3	29,29	
10 ⁷ B. Pasteurii + Besin	1	31,46	30,38
	2	30,22	
	3	29,45	
10 ⁸ B. Pasteurii	1	28,45	28,77
	2	29,13	
	3	28,72	
10 ⁸ B. Pasteurii + Besin	1	31,45	30,45
	2	30,51	
	3	29,39	
10 ⁹ B. Pasteurii	1	28,83	28,75
	2	27,26	
	3	30,15	
10 ⁹ B. Pasteurii + Besin	1	30,89	29,45
	2	28,21	
	3	29,25	

Çizelge 4.8. Normal su kürü uygulanan beton numunelerinin 28 günlük basınç dayanımları

Karışım	Numune numarası	Dayanım (MPa)	Ortalama dayanım (MPa)
Kontrol	1	39,58	39,02
	2	38,41	
	3	39,08	
Kontrol + Besin	1	39,48	40,11
	2	40,73	
	3	40,14	
10 ⁷ V. Arenosii	1	43,32	43,79
	2	43,47	
	3	44,59	
10 ⁷ V. Arenosii + Besin	1	46,88	47,42
	2	47,26	
	3	48,11	
10 ⁸ V. Arenosii	1	46,73	46,31
	2	46,15	
	3	46,04	
10 ⁸ V. Arenosii + Besin	1	50,32	49,26
	2	48,11	
	3	49,36	
10 ⁹ V. Arenosii	1	41,47	42,65
	2	43,84	
	3	42,63	
10 ⁹ V. Arenosii + Besin	1	46,04	44,52
	2	44,10	
	3	43,43	
10 ⁷ B. Pasteurii	1	44,94	44,75
	2	45,48	
	3	43,82	
10 ⁷ B. Pasteurii + Besin	1	46,51	46,12
	2	47,05	
	3	44,79	
10 ⁸ B. Pasteurii	1	43,87	44,45
	2	43,52	
	3	45,95	
10 ⁸ B. Pasteurii + Besin	1	48,72	47,61
	2	47,01	
	3	47,11	
10 ⁹ B. Pasteurii	1	43,02	41,35
	2	42,55	
	3	41,47	
10 ⁹ B. Pasteurii + Besin	1	44,20	43,30
	2	42,88	
	3	42,82	



Şekil 4.5. Normal su kürü uygulanan beton numunelerinin 7 günlük basınç dayanımları (MPa)



Şekil 4.6. Normal su kürü uygulanan beton numunelerinin 28 günlük basınç dayanımları (MPa)

V. Arenosii ve B. Pasteurii bakterileri 10^7 , 10^8 ve 10^9 CFU oranlarında betona ilave edilmiştir. Böylece toplamda 14 grup ve her gruptan 3 adet 7 günlük ve 3 adet 28 günlük olmak üzere 84 adet numune üretilerek basınç dayanımı belirlenmiştir.

28 günlük basınç dayanımı sonuçlarına göre (**Şekil 4.6**), 10^8 V. Arenosii + Besin ve 10^8 B. Pasteurii + Besin numunelerinden sırasıyla 49,26 ve 47,61 MPa dayanım değerleri elde edildiği görülmektedir. Kontrol numuneleri 39,02 MPa dayanıma sahip olduğundan, 10^8 CFU bakteri ve besin içeren grupların basınç dayanımında yaklaşık olarak %21 ve %18 artış görülmüştür. Bu da betonda bakterilerin basınç dayanımında olumlu etki yaptığını göstermektedir. Bu artışın sebebi SEM ve XRD ölçümleri ile desteklenerek sonraki bölümlerde sonuçları açıklanmıştır.

4.5.2. Bakterili su kürü uygulanan beton numunelerinin basınç dayanımı

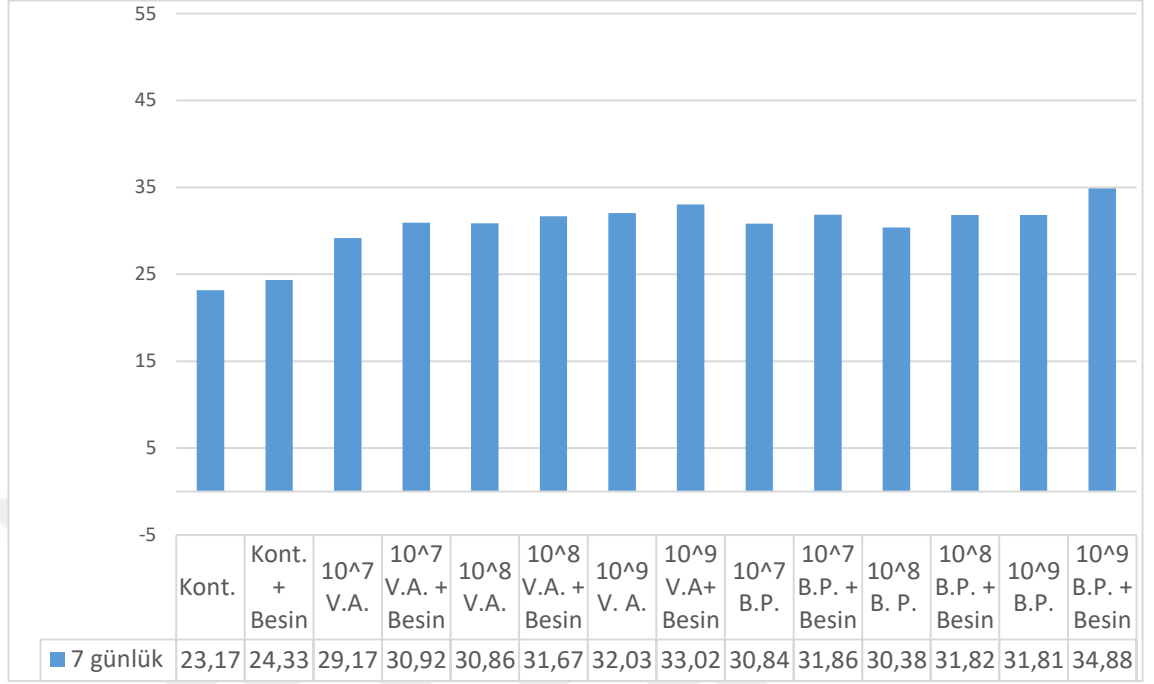
Beton numuneler için yapılan deneylerden elde edilen sonuçlar Çizelge 4.9 ve Çizelge 4.10'da sunulmuştur. Bu numuneler 7 x 7 x 7cm ebadında hazırlanmış, 7 ve 28 gün 10^7 CFU bakterili suda kür edildikten sonra basınç deneyi yapılmıştır.

Çizelge 4.9. Bakterili su kürü uygulanan beton numunelerinin 7 günlük basınç dayanımları

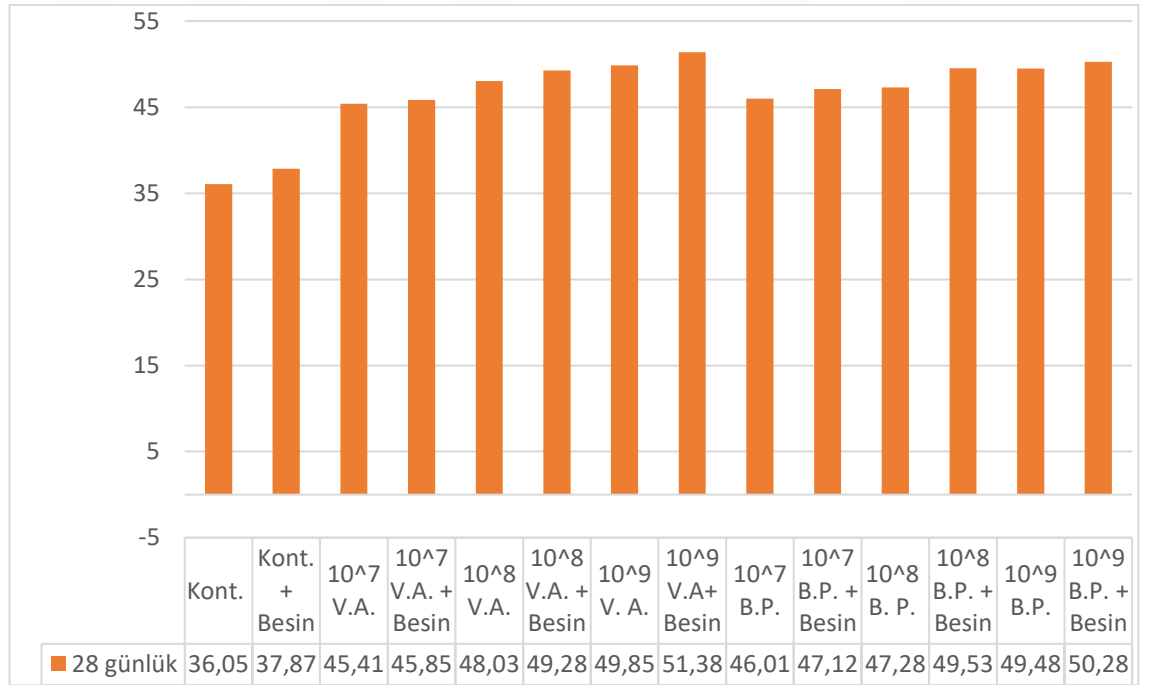
Karışım	Numune numarası	Dayanım (Mpa)	Ortalama dayanım (Mpa)
Kontrol	1	23,21	23,17
	2	22,90	
	3	23,41	
Kontrol + Besin	1	24,53	24,33
	2	24,09	
	3	24,38	
10^7 V. Arenosii	1	28,57	29,17
	2	29,83	
	3	29,11	
10^7 V. Arenosii + Besin	1	31,57	30,92
	2	32,08	
	3	29,11	
10^8 V. Arenosii	1	30,52	30,86
	2	32,19	
	3	29,88	
10^8 V. Arenosii + Besin	1	33,05	31,67
	2	29,28	
	3	32,69	
10^9 V. Arenosii	1	32,61	32,03
	2	33,12	
	3	30,37	
10^9 V. Arenosii + Besin	1	33,53	33,02
	2	34,29	
	3	31,24	
10^7 B. Pasteurii	1	31,22	30,84
	2	31,48	
	3	29,83	
10^7 B. Pasteurii + Besin	1	31,02	31,86
	2	33,14	
	3	31,43	
10^8 B. Pasteurii	1	30,48	30,38
	2	31,12	
	3	29,55	
10^8 B. Pasteurii + Besin	1	31,73	31,82
	2	30,96	
	3	32,78	
10^9 B. Pasteurii	1	32,08	31,81
	2	33,05	
	3	30,30	
10^9 B. Pasteurii + Besin	1	34,87	34,88
	2	33,66	
	3	36,11	

Çizelge 4.10. Bakterili su kürü uygulanan beton numunelerinin 28 günlük basınç dayanımları

Karışım	Numune numarası	Dayanım (Mpa)	Ortalama dayanım (Mpa)
Kontrol	1	35,63	36,05
	2	36,44	
	3	36,08	
Kontrol + Besin	1	37,80	37,87
	2	38,25	
	3	37,56	
10^7 V. Arenosii	1	44,46	45,41
	2	46,34	
	3	45,43	
10^7 V. Arenosii + Besin	1	45,87	45,85
	2	46,12	
	3	45,56	
10^8 V. Arenosii	1	48,81	48,03
	2	48,05	
	3	47,22	
10^8 V. Arenosii + Besin	1	49,21	49,28
	2	48,73	
	3	49,89	
10^9 V. Arenosii	1	49,86	49,85
	2	48,79	
	3	50,91	
10^9 V. Arenosii + Besin	1	50,26	51,38
	2	51,87	
	3	52,02	
10^7 B. Pasteurii	1	45,43	46,01
	2	47,12	
	3	45,48	
10^7 B. Pasteurii + Besin	1	46,42	47,12
	2	48,16	
	3	46,79	
10^8 B. Pasteurii	1	47,71	47,28
	2	47,30	
	3	46,83	
10^8 B. Pasteurii + Besin	1	50,12	49,53
	2	49,01	
	3	49,47	
10^9 B. Pasteurii	1	49,23	49,48
	2	49,18	
	3	50,02	
10^9 B. Pasteurii + Besin	1	50,04	50,28
	2	51,48	
	3	49,32	



Şekil 4.7. Bakterili su kürü uygulanan beton numunelerinin 7 günlük basınç dayanımları (MPa)



Şekil 4.8. Bakterili su kürü uygulanan beton numunelerinin 28 günlük basınç dayanımları (MPa)

Bakterili suda kürün etkisini incelemek üzere 10^7 , 10^8 ve 10^9 CFU oranlarında V. Arenosii ve B. Pasteurii bakterileri betona ilave edilmiş ve prizini aldıktan sonra bakterili suyun içerisinde kür edilmiştir. V. Arenosii içeren gruplar kür edilirken 10^7 CFU V. Arenosii; B. Pasteurii içeren gruplar ise kür edilirken 10^7 CFU B. Pasteurii kür suyu olarak kullanılmıştır.

Şekil 4.7 ve 4.8'e göre değerler incelendiğinde bakterili su küründen sonra en yüksek basınç dayanımının 10^9 V. Arenosii + Besin numunelerinden 51,38 MPa değeri ile elde edildiği görülmüştür. Kontrol numuneleri 36,05 MPa değerine sahip olup 10^9 V. Arenosii + Besin içeren grup kontrol numunelerine göre basınç dayanımında yaklaşık olarak %40 artış göstermiştir. Daha düşük oranlarda bakteri içeren grupların dayanımları da kontrol grubuna göre yine daha fazla değerlerde tespit edilmiştir. Bu da betonda bakterilerin basınç dayanımında artışa yol açtığını göstermektedir. Şekil 4.9'da normal su ve 10^7 CFU'lu suda kür edilmiş olan numuneler sunulmuştur.



Şekil 4.9. Bakterili su ve normal suda kür edilen beton numuneleri

Şekil 4.9'dan da görüleceği üzere bakterili suda kür edilmiş beton numunelerinin yüzeyinde kalsitin oluştuğu ve diğer numuneye göre daha dolgun yüzeye sahip olduğu söylenebilir. Normal su küründe kalsit numunenin iç kısmında oluşurken bakterili su küründe numune yüzeylerinde de oluşmaktadır. Bunun sonucu olarak da bakterili suda kür edilen numunelerin dayanımı özellikle 10^9 CFU bakteri içeren gruplarda daha da belirgin olmak üzere genellikle basınç dayanımında artışa yol açmıştır.

4.5.3. Betonun basınç dayanımında bakteri miktarının etkisi

Şekil 4.6 incelendiğinde en düşük basınç dayanımı değerlerinin bakteri içermeyen kontrol gruplarından elde edildiği görülmektedir. V. Arenosii içeren grupların 28 günlük sonuçlarına göre en yüksek basınç dayanımı 46,31 MPa değeri ile 10^8 V. Arenosii bakterili numunelerden elde edilmiştir. Bu değer 10^7 ve 10^9 V. Arenosii gruplarına göre sırasıyla %6 ve %8 oranında daha yüksektir. Besin ilave edilen numunelerde de benzer sonuçlar elde edilmiş ve en yüksek basınç dayanımı 49,26 MPa değeri ile 10^8 V. Arenosii + Besin içeren numunelerden elde edilmiştir.

B. Pasteurii bakteri içeren numunelerde 28 günlük değerlere göre en yüksek basınç dayanımı besinsiz numunelerde 44,75 MPa değeri ile 10^7 B. Pasteurii numunelerden elde edilmiştir. 10^8 ve 10^9 B. Pasteurii numunelerde ise sırasıyla 44,45 ve 43,30 MPa değerleri elde edilmiştir. Besin içeren numunelerde ise en yüksek değer 47,31 MPa olarak 10^8 B. Pasteurii + Besin numunelerden elde edilip, 10^7 ve 10^9 B. Pasteurii + Besin guruplarına göre sırasıyla %2 ve %8 oranında daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Sonuçlara göre bakterilerin 10^8 CFU konsantrasyonu optimum değerleri vermiştir. Benzer sonuçlar Henk *et al.* (2010) tarafından rapor edilmiştir.

4.5.4. Betonun basınç dayanımında bakteri türünün etkisi

Şekil 4.6'ya göre besin içermeyen numunelerde en yüksek dayanım 46,31 MPa olarak 10^8 V. Arenosii numunelere ait olup ve 10^8 B. Pasteurii grubuna göre yaklaşık olarak %4 artışa sebep olmuştur. Diğer gruplar ise benzer sonuçları göstermişlerdir.

Besin içeren numuneler ise en yüksek değer 49,26 MPa olarak 10^8 V. Arenosii + Besin numunelerden elde edilmiştir. Bu grup 10^8 B. Pasteurii + Besin numunelerine göre yaklaşık olarak %4 artış göstermiştir. 10^7 ve 10^9 V. Arenosii + Besin numunelerde 10^7 ve 10^9 B. Pasteurii + Besin numunelerr göre %3 artış göstermiştir. Ayrıca 10^8 V. Arenosii + Besin grubu kontrol numunelere göre basınç dayanımında yaklaşık olarak %26 artış göstermiştir. Genel olarak V.Arenosii bakterisi B. Pasteurii bakterisine göre çok az miktarda daha yüksek dayanım değerleri sağladığı söylenebilir.

4.5.5. Betonun basınç dayanımında kür koşullarının etkisi

Şekil 4.6 normal suda kür edilmiş ve Şekil 4.8, 10^7 CFU'lu suda kür edilmiş 28 günlük numunelerin basınç dayanımını göstermektedir. Grafiklere göre benzer tür ve miktarlarda bakterili numunelerde 10^7 CFU'lu suda kür edilen numuneler normal suda kür edilen numunelerden çoğunlukla daha yüksek dayanımlar vermişlerdir. Normal su ile kür yapılan numunelerde en yüksek basınç dayanımı değeri 49,26 MPa olarak 10^8 V. Arenosii + Besin grubuna ait olmuştur. Bakterili suda kür edilen numunelerde ise en yüksek dayanım 10^9 V. Arenosii + Besin gurubundan 51,38 MPa olarak elde edilmiştir. Sonuç olarak bakterili suda kür edilen numunelerden normal kirece doymun suda kür edilen numunelere göre az miktarda da olsa daha yüksek dayanımlar elde edilmiştir. Bunun sebebi olarak betonun yüzeyinde de kalsitin (CaCO_3) oluşması ve yüzeyde tüm boşlukların ve çatlakların kalsit ile doldurması düşünülebilir (Şekil 4.8).

4.6. Beton Numunelerin Eğilme Dayanımı

4.6.1. Normal su kürü uygulanan beton numunelerinin eğilme dayanımı

Beton numuneler için yapılan eğilme deneylerinden elde edilen sonuçlar Çizelge 4.11, ve Çizelge 4.12 de sunulmuştur. Bu numuneler 7 x 7 x 28 cm (Şekil 4.10) ebadında hazırlanmış, 7 ve 28 gün normal suda (pH=6,5 ile 7 arasında) ve ayrıca 10^7 CFU'lu suda kür edildikten sonra eğilme dayanımları belirlenmiştir.



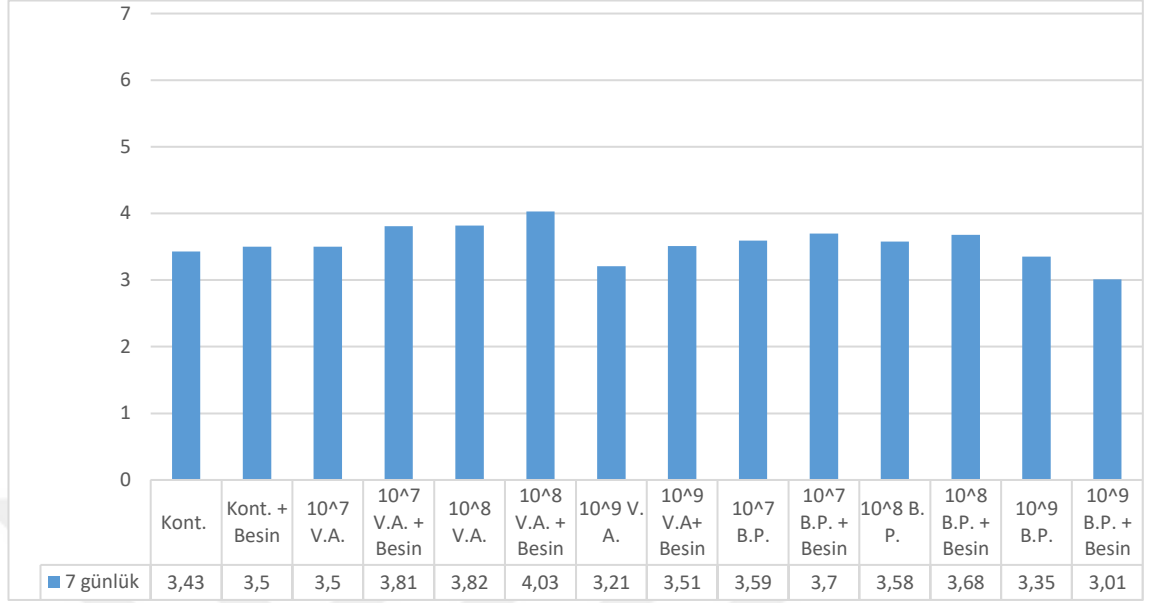
Şekil 4.10. Eğilme deneyi için hazırlanan beton numuneleri

Çizelge 4.11. Normal su kürü uygulanan beton numunelerinin 7 günlük eğilme dayanımları

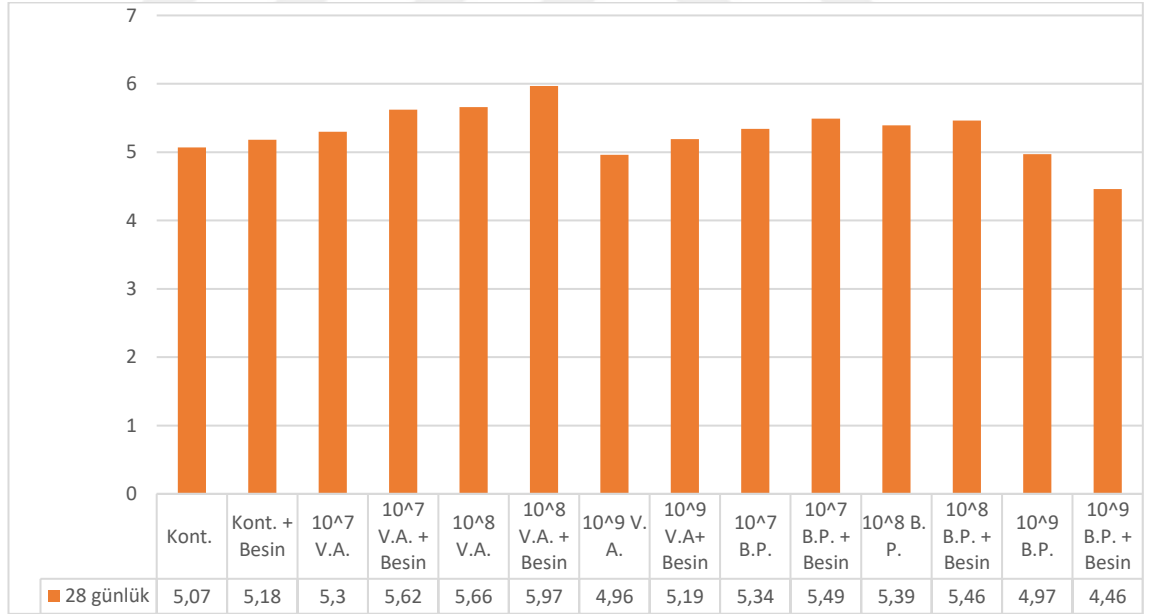
Karışım	Numune numarası	Dayanım (MPa)	Ortalama dayanım (MPa)
Kontrol	1	3,40	3,43
	2	3,68	
	3	3,22	
Kontrol + Besin	1	3,38	3,50
	2	3,29	
	3	3,82	
10 ⁷ V. Arenosii	1	3,59	3,50
	2	3,70	
	3	3,21	
10 ⁷ V. Arenosii + Besin	1	3,91	3,81
	2	3,74	
	3	3,78	
10 ⁸ V. Arenosii	1	3,97	3,82
	2	3,88	
	3	3,61	
10 ⁸ V. Arenosii + Besin	1	4,27	4,03
	2	4,12	
	3	3,71	
10 ⁹ V. Arenosii	1	3,61	3,21
	2	3,15	
	3	2,87	
10 ⁹ V. Arenosii + Besin	1	3,32	3,51
	2	3,27	
	3	3,93	
10 ⁷ B. Pasteurii	1	3,91	3,59
	2	3,49	
	3	3,37	
10 ⁷ B. Pasteurii + Besin	1	3,41	3,70
	2	4,02	
	3	3,66	
10 ⁸ B. Pasteurii	1	3,33	3,58
	2	3,67	
	3	3,74	
10 ⁸ B. Pasteurii + Besin	1	3,83	3,68
	2	3,90	
	3	3,31	
10 ⁹ B. Pasteurii	1	3,13	3,35
	2	3,70	
	3	3,22	
10 ⁹ B. Pasteurii + Besin	1	3,19	3,01
	2	3,07	
	3	2,76	

Çizelge 4.12. Normal su kürü uygulanan beton numunelerinin 28 günlük eğilme dayanımları

Karışım	Numune numarası	Dayanım (MPa)	Ortalama dayanım (MPa)
Kontrol	1	5,35	5,07
	2	5,11	
	3	4,75	
Kontrol + Besin	1	4,98	5,18
	2	5,15	
	3	5,42	
10 ⁷ V. Arenosii	1	5,56	5,30
	2	5,22	
	3	5,13	
10 ⁷ V. Arenosii + Besin	1	5,38	5,62
	2	5,60	
	3	5,89	
10 ⁸ V. Arenosii	1	5,77	5,66
	2	5,70	
	3	5,52	
10 ⁸ V. Arenosii + Besin	1	5,93	5,97
	2	5,81	
	3	6,17	
10 ⁹ V. Arenosii	1	5,01	4,96
	2	5,16	
	3	4,72	
10 ⁹ V. Arenosii + Besin	1	5,17	5,19
	2	5,41	
	3	4,99	
10 ⁷ B. Pasteurii	1	5,51	5,34
	2	5,38	
	3	5,14	
10 ⁷ B. Pasteurii + Besin	1	5,22	5,49
	2	5,57	
	3	5,68	
10 ⁸ B. Pasteurii	1	5,60	5,39
	2	5,47	
	3	5,11	
10 ⁸ B. Pasteurii + Besin	1	5,67	5,46
	2	5,48	
	3	5,22	
10 ⁹ B. Pasteurii	1	5,10	4,97
	2	5,02	
	3	4,78	
10 ⁹ B. Pasteurii + Besin	1	4,41	4,46
	2	4,67	
	3	4,29	



Şekil 4.11. Normal su kürü uygulanan beton numunelerinin 7 günlük eğilme dayanımları (MPa)



Şekil 4.12. Normal su kürü uygulanan beton numunelerinin 28 günlük eğilme dayanımları (MPa)

Toplamda 84 adet numune üretilerek eğilme dayanımı belirlenmiştir. En yüksek eğilme dayanımı 5,97 MPa değeri ile 10⁸ V. Arenosii + Besin içeren gruptan elde edilmiştir. Kontrol grubunun eğilme dayanımı 5,07 MPa olup 10⁸ V. Arenosii + Besin grubu

kontrole göre eğilme dayanımında yaklaşık olarak %18 daha fazla dayanım göstermiştir. 10^7 V. Arenosii + Besin içeren grubun eğilme dayanımı ise 5,62 MPa olup bu değer kontrol grubundan yaklaşık %10 daha fazladır. 10^9 V. Arenosii + Besin grubunun eğilme dayanımı ise kontrole göre belirgin bir artış göstermemiş olup sadece %3 civarında bir artışa yol açmıştır. Bununla birlikte besin ilave edilmeyen grupların eğilme dayanımları besinli gruplara göre her bakteri konsantrasyonunda daha düşük değerlerde kalmıştır. 10^9 V. Arenosii içeren grubun eğilme dayanımı kontrole göre %2 daha düşük tespit edilmiştir. Bu sonuç eğilme dayanımı için optimum konsantrasyonun 10^8 olduğunu daha yüksek oranlarda bakteri kullanımının olumlu etki göstermediğini ortaya çıkarmıştır.

B. Pasteurii kullanılan gruplarda da V. Arenosii ile benzer sonuçlar elde edilmiştir. 10^7 ve 10^8 B. Pasteurii +Besin gruplarında 5.49 ve 5,46 MPa eğilme dayanımları hesaplanmıştır. Bu değerler kontrol numunelerine göre yaklaşık %8 dir. Ancak bakteri konsantrasyonu 10^9 'a çıkarıldığında eğilme dayanımı kontrole göre %12 oranında azalmıştır. Bakteri ile birlikte besin ilave edilmesi dayanımlarda artışa yol açmıştır. (Şekil 4.11 ve Şekil 4.12)

4.6.2. Bakterili su kürü uygulanan beton numunelerinin eğilme dayanımı

Beton numuneler için yapılan eğilme deneylerinden elde edilen sonuçlar Çizelge 4.13. ve Çizelge 4.14'de sunulmuş, grafikler ise 7 gün için Şekil 4.13 ve 28 gün için Şekil 4.14 de verilmiştir. Bu numuneler 7 x 7 x 28 cm (Şekil 4.9) ebadında hazırlanmış ve 7 ve 28 gün normal suda (pH=6,5 ile 7 arasında) ve ayrıca 10^7 CFU'lu suda kür edildikten sonra eğilme dayanımları belirlenmiştir.

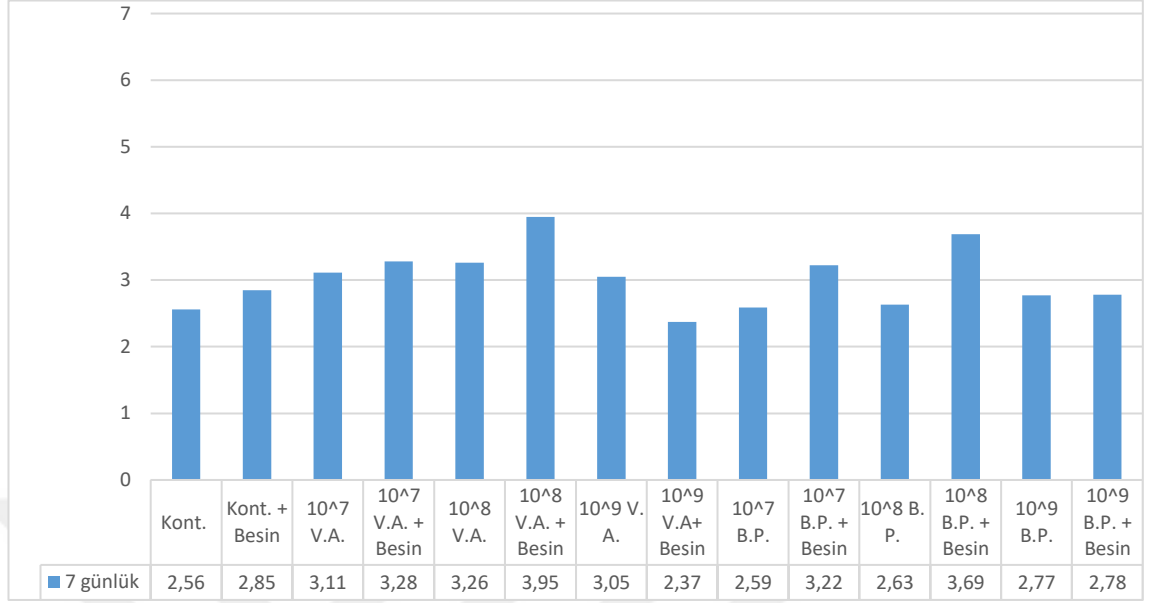
Çizelge 4.13. Bakterili su kürü uygulanan beton numunelerinin 7 günlük eğilme dayanımları

Karışım	Numune numarası	Dayanım (Mpa)	Ortalama dayanım (Mpa)
Kontrol	1	2,67	2,56
	2	2,02	
	3	2,99	
Kontrol + Besin	1	2,70	2,85
	2	2,79	
	3	3,06	
10 ⁷ V. Arenosii	1	3,34	3,11
	2	2,77	
	3	3,21	
10 ⁷ V. Arenosii + Besin	1	2,04*	3,28
	2	3,17	
	3	3,38	
10 ⁸ V. Arenosii	1	3,22	3,26
	2	3,30	
	3	2,01*	
10 ⁸ V. Arenosii + Besin	1	4,11	3,95
	2	4,02	
	3	3,71	
10 ⁹ V. Arenosii	1	3,23	3,05
	2	3,06	
	3	2,87	
10 ⁹ V. Arenosii + Besin	1	2,66	2,37
	2	2,27	
	3	2,19	
10 ⁷ B. Pasteurii	1	2,41	2,59
	2	2,39	
	3	2,97	
10 ⁷ B. Pasteurii + Besin	1	3,22	3,22
	2	3,02	
	3	3,43	
10 ⁸ B. Pasteurii	1	2,43	2,63
	2	2,67	
	3	2,79	
10 ⁸ B. Pasteurii + Besin	1	3,95	3,69
	2	3,77	
	3	3,34	
10 ⁹ B. Pasteurii	1	3,03	2,77
	2	2,70	
	3	2,57	
10 ⁹ B. Pasteurii + Besin	1	2,81	2,78
	2	3,07	
	3	2,46	

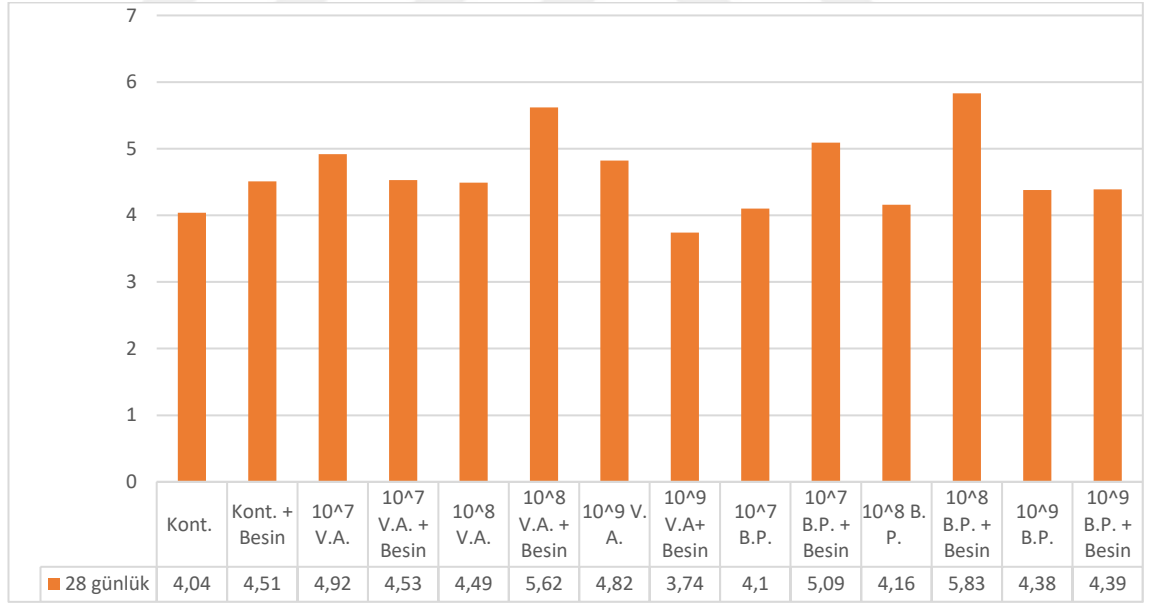
Çizelge 4.14. Bakterili su kürü uygulanan beton numunelerinin 28 günlük eğilme dayanımları

Karışım	Numune numarası	Dayanım (Mpa)	Ortalama dayanım (Mpa)
Kontrol	1	4,11	4,01
	2	4,08	
	3	3,84	
Kontrol + Besin	1	4,92	4,51
	2	4,07	
	3	4,54	
10 ⁷ V. Arenosii	1	4,82	4,92
	2	5,11	
	3	4,83	
10 ⁷ V. Arenosii + Besin	1	4,67	4,53
	2	4,33	
	3	4,59	
10 ⁸ V. Arenosii	1	4,28	4,49
	2	4,76	
	3	4,44	
10 ⁸ V. Arenosii + Besin	1	5,84	5,92
	2	7,51*	
	3	5,99	
10 ⁹ V. Arenosii	1	5,01	4,82
	2	4,75	
	3	4,69	
10 ⁹ V. Arenosii + Besin	1	4,01	3,74
	2	3,88	
	3	3,32	
10 ⁷ B. Pasteurii	1	4,24	4,10
	2	4,10	
	3	3,96	
10 ⁷ B. Pasteurii + Besin	1	5,02	5,09
	2	5,29	
	3	4,95	
10 ⁸ B. Pasteurii	1	4,45	4,16
	2	3,83	
	3	4,20	
10 ⁸ B. Pasteurii + Besin	1	5,87	5,83
	2	5,63	
	3	5,99	
10 ⁹ B. Pasteurii	1	4,14	4,38
	2	4,37	
	3	4,63	
10 ⁹ B. Pasteurii + Besin	1	4,21	4,39
	2	4,38	
	3	4,57	

* Bu değer diğer iki değerden çok farklılık gösterdiğinden deney hatası olarak değerlendirilmiş ve hesaplamalara katılmamıştır.



Şekil 4.13. Bakterili su kürü uygulanan beton numunelerinin 7 günlük eğilme dayanımları (MPa)



Şekil 4.14. Bakterili su kürü uygulanan beton numunelerinin 28 günlük eğilme dayanımları (MPa)

Bakterili suda kür edilen numunelerin eğilme dayanımı sonuçları incelendiğinde en yüksek değerin 5,83 MPa ile 10⁸ B. Pasteurii + Besin numunelerinden elde edildiği görülmektedir. Bu değer kontrol grubuna göre yaklaşık olarak %44 artışı ifade

etmektedir. Benzer şekilde V.Arenosii gruplarında da en yüksek değer yine 10^8 konsantrasyonunda 5,62 MPa olarak belirlenmiştir. Ancak tüm sonuçlar incelendiğinde bakterili suda kür yönteminin eğilme dayanımı üzerinde anlamlı bir etkisi ortaya konulamamıştır. Çünkü bazı gruplarda dayanım artışları tespit edilirken diğerlerinde azalmalar olduğu görülmüştür (Şekil 4.13 ve 4.14).

4.6.3. Betonun eğilme dayanımında bakteri miktarının etkisi

Üç farklı oranda kullanılan V. Arenosii ve B. Pasteurii bakterilerinin betonun eğilme dayanımına etkisi Şekil 4.10'da gösterilmiştir. Besinli ve besinsiz olan 10^8 CFU'lu her iki bakterili numuneler 10^7 ve 10^9 CFU'lu numunelere göre daha yüksek dayanım göstermişlerdir. Bunun sebebi olarak bakterilerin optimum miktarda kullanılması, beton içinde bakteri sayısından dolayı fazla boşluk oluşmaması ve ayrıca yeterli miktarda kalsitin oluşumuna yol açıp ve beton içinde mikro çatlaklar ve mikro boşlukların doldurulmasına neden olduğu düşünülmektedir.

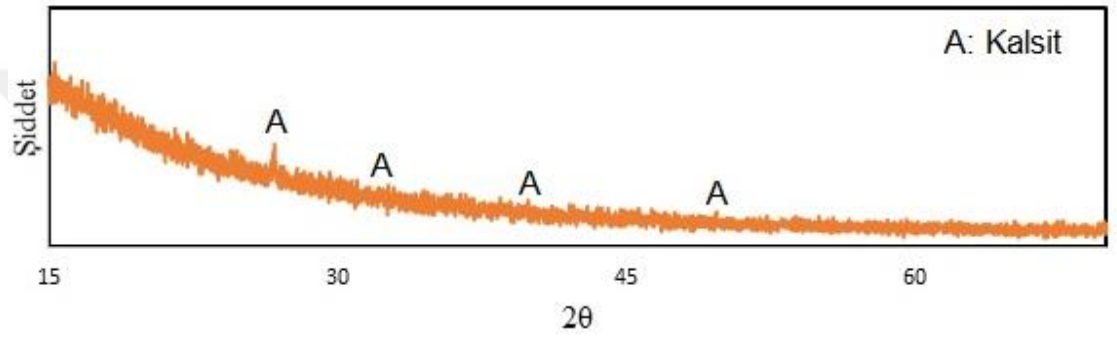
4.6.4. Betonun eğilme dayanımında bakteri türünün etkisi

Şekil 4.10'a göre 10^7 V. Arenosii ve B. Pasteurii bakterili numuneler yaklaşık eşit miktarda eğilme dayanımı göstermişlerdir. 10^8 ve 10^9 CFU'lu besinli ve besinsiz V. Arenosii numuneler B. Pasteurii numunelere göre daha iyi sonuçlar vermişlerdir. Buna göre en iyi sonuçlar 10^8 V. Arenosii+Besin olan gruba ait olup, eğilme dayanımında artış göstermiştir. Bu artışın nedeni ise her iki bakterinin betonda kalsit oluşturması ve olumlu şekilde betonu etkilemesidir. V. Arenosii ve B. Pasteurii bakterilerinin özellikle besin ve nem olan ortamda çok miktarda kalsit oluşturup ve betonun mikro boşluklarını ve ayrıca mikro çatlaklarını doldurup ve betonun dayanımını artırdığı düşünülmektedir.

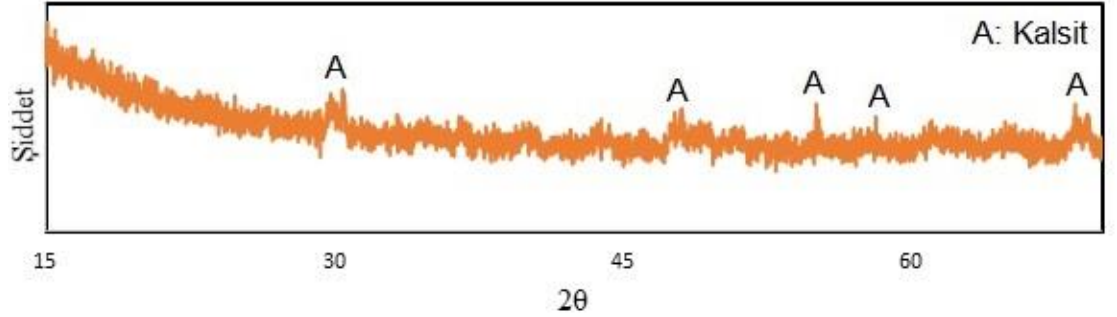
4.7. Beton Numunelerinin XRD Ölçümleri

4.7.1. V. Arenosii bakterili numunelerin XRD sonuçları

Bu bölümde beton numunelerinin içindeki kalsitin pik noktaları ölçülmüş ve aşağıdaki şekillerde her bir grup için ayrı ayrı sunulmuştur.

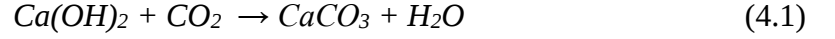


Şekil 4.15. XRD difroktogramı (Kontrol)

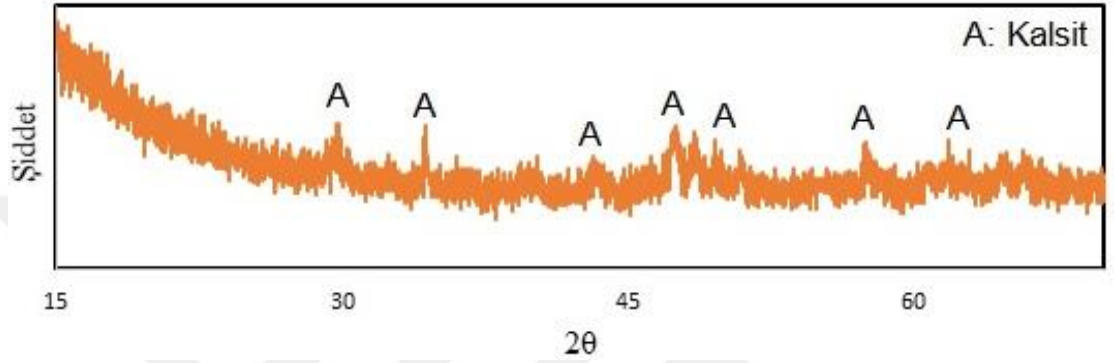


Şekil 4.16. XRD difroktogramı (Kontrol + Besin)

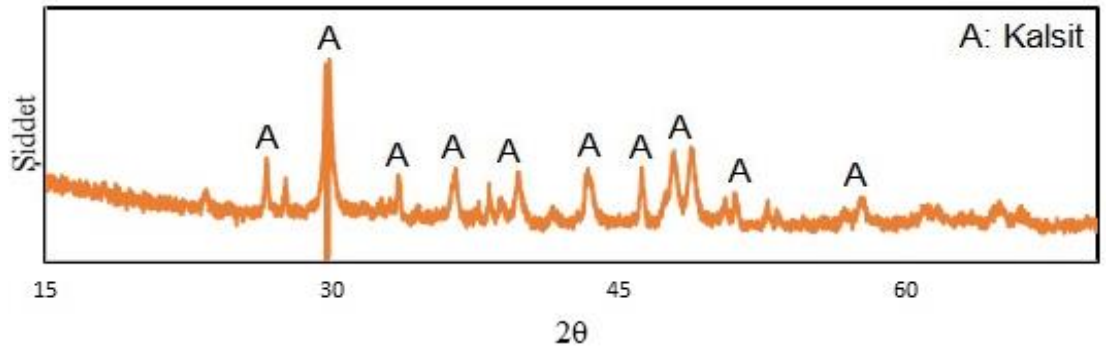
Şekil 4.15 ve Şekil 4.16’de görüldüğü gibi 28 günlük Kontrol ve Kontrol + Besin numunelerin üzerinde yapılan XRD ölçüm sonuçlarında her iki grupta da düşük kalsit pikleri belirlenmiştir. Bu da kontrol betonlarında kalsitin (CaCO_3) varlığını göstermektedir. Normal betonda kalsiyum hidroksit (4.1) reaksiyonuna göre gerçekleşmektedir. Bu reaksiyon kalsiyum hidroksitin karbonatlaşma reaksiyonunu olup bunun neticesinde kalsit oluşmaktadır.



CO₂ miktarına bağılı olarak kontrol numunelerinde kalsiyum karbonat miktarı bakterili betonlara göre daha azdır.



Şekil 4.17. XRD difroktogramı (10⁷ V. Arenosii)



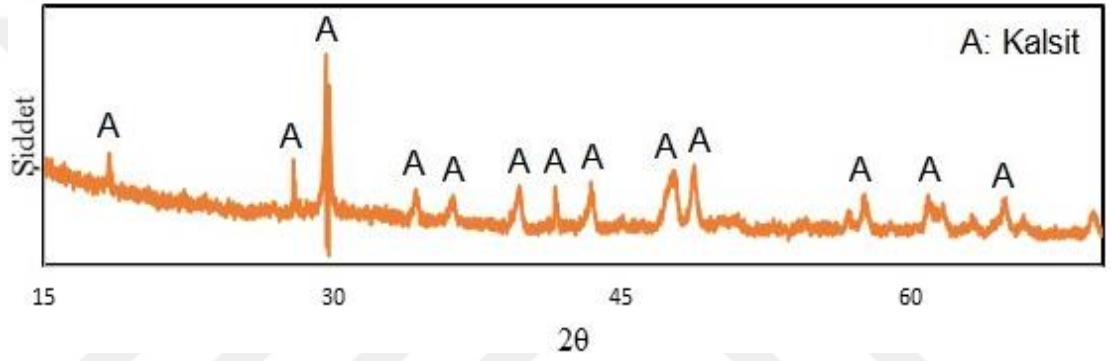
Şekil 4.18. XRD difroktogramı (10⁷ V. Arenosii + Besin)

28 günlük 10⁷ V. Arenosii numunesi üzerinde yapılan XRD ölçüm sonuçlarına göre 2θ = 29°; 35° ve 51° lerde en yüksek kalsit pikleri tespit edilmiştir (Şekil 4.17). Şekil 4.18'e göre 10⁷ V. Arenosii + Besin numune üzerinde yapılan XRD ölçüm sonuçları kalsit 2θ = 29°; 42°; 44° ve 50° oluşmuştur. (Literetüre göre 2θ = 29° kalsit pik noktasıdır (Zhang *et al.* 2017)). Bu ölçümlerden elde edilen değerler bakterili betonda kalsit oluştuğunu ispatlamaktadır ve kontrol grubuna göre daha fazla kalsit oluştuğu düşünülmektedir. Ayrıca besin ilave edilen gruplarda oluşan kalsit miktarının daha da fazla olması beklenmektedir. Çünkü (4.2) reaksiyonundan da görüleceği üzere besin olarak kullanılan

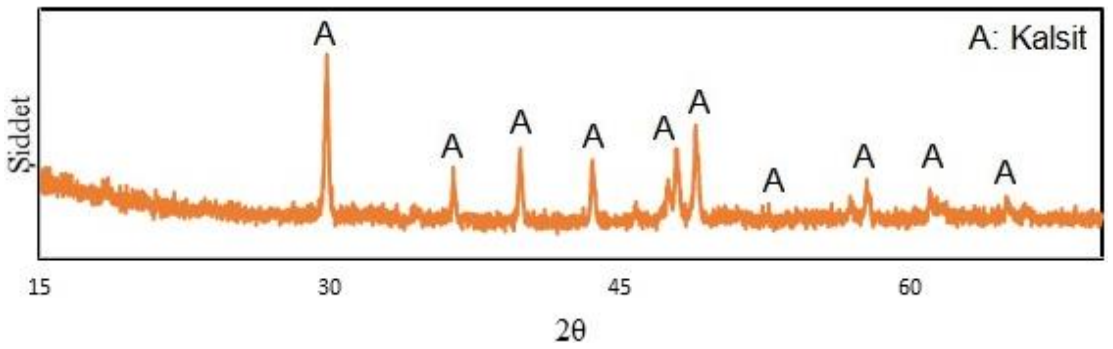
kalsiyum laktatın ($CaC_6H_{10}O_6$) aktif metabolizması sonucu hem kalsit oluşmakta hem de CO_2 açığa çıkmaktadır.



Böylece CO_2 miktarı artacak ve daha fazla karbonatlaşmaya imkan tanıyacaktır. Bunun sonucunda da ortamdaki kalsit miktarının artması beklenen bir sonuçtur.

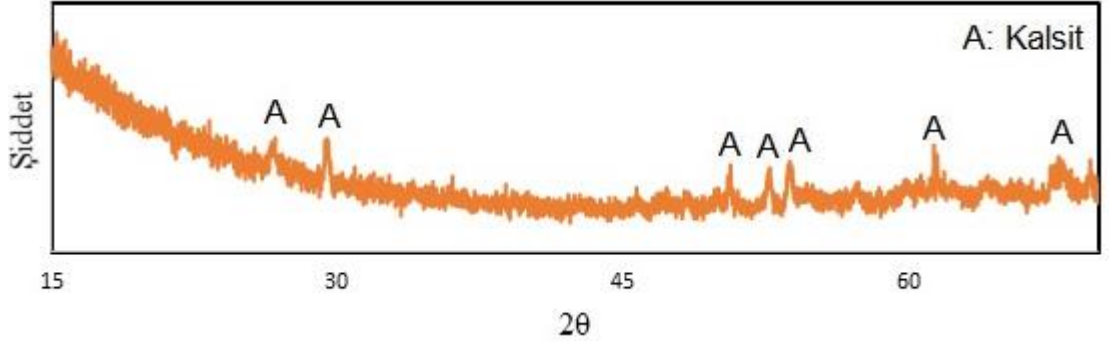


Şekil 4.19. XRD difraktogramı (10^8 V. Arenosii)

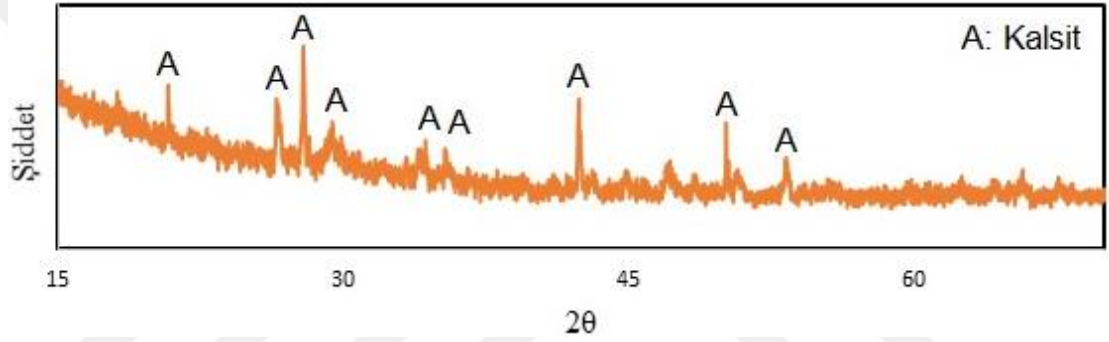


Şekil 4.20. XRD difraktogramı (10^8 V. Arenosii + Besin)

10^8 V. Arenosii ve 10^8 V. Arenosii + Besin numuneler üzerinde yapılan XRD ölçüm sonuçlarına göre kalsit oluşmaktadır. Şekil 4.19 ve Şekil 4.20 göre kalsit piklerinin $2\theta=29^\circ$; 42° ; 43° ; 50° lerde oluştuğu görülmüştür.



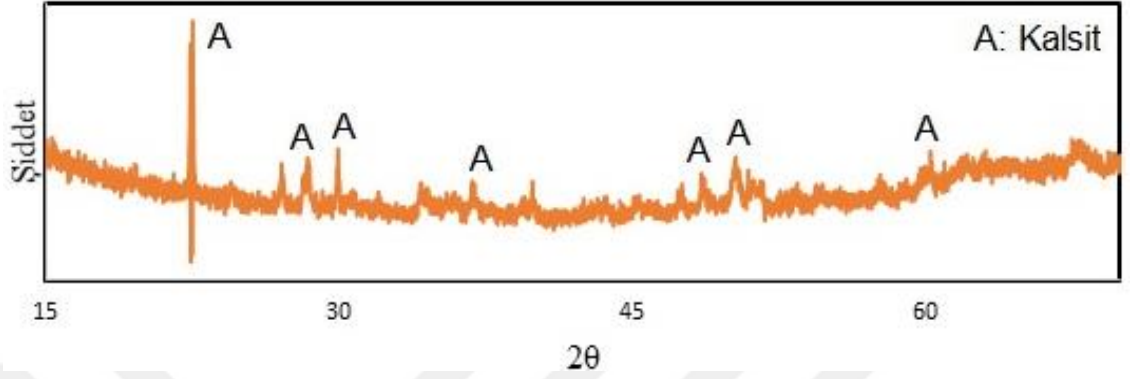
Şekil 4.21. XRD difroktogramı (10^9 V. Arenosii)



Şekil 4.22. XRD difroktogramı (10^9 V. Arenosii +Besin)

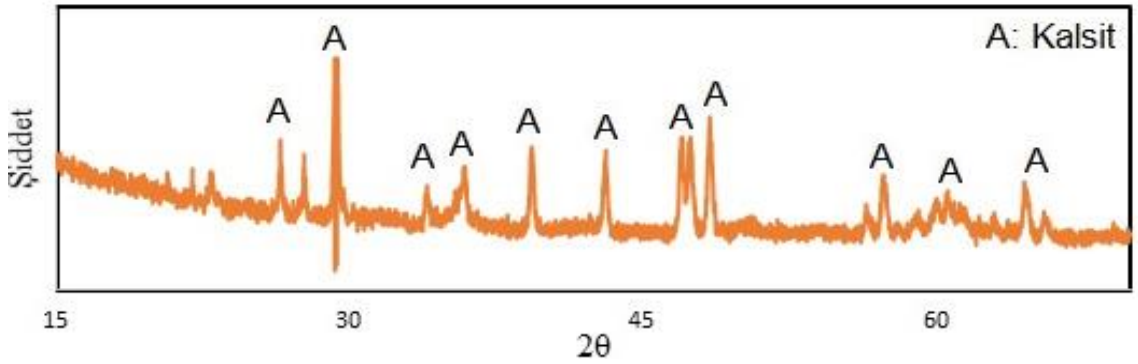
28 günlük numune üzerinde yapılan XRD ölçüm sonuçlarına göre $2\theta = 29^\circ$; 52° pik oluşmamıştır (Şekil 4.21). 10^9 V. Arenosii +Besin numune üzerinde yapılan XRD ölçüm sonuçlarına göre (Şekil 4.22) çok miktarda kalsit oluşmaktadır burada $2\theta = 29^\circ$; 43° ; 52° pikler oluşmaktadır. Her konsantrasyonda bakteri ilave edilmiş betonlarda XRD ölçümleri ile Kalsit oluşumu tespit edilmiştir.

4.7.2. B. Pasteurii bakterili numunelerin XRD sonuçları



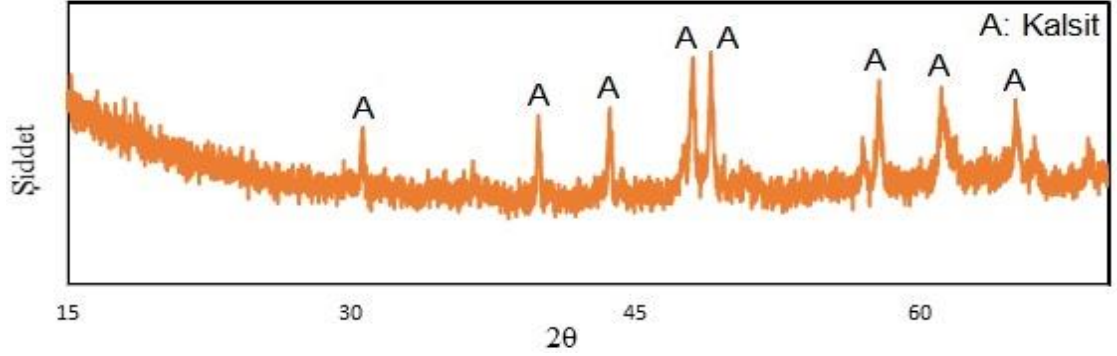
Şekil 4.23. XRD difroktogramı (10^7 B. Pasteurii)

28 günlük 10^7 B. Pasteurii ile üretilen numune üzerinde yapılan XRD ölçüm sonuçlarına göre $2\theta=23^\circ$; 29° ; 46° ; 50° piklerde çok miktarda kalsit oluşmaktadır (Şekil 4.23).



Şekil 4.24. XRD difroktogramı (10^8 B. Pasteurii)

10^8 B. Pasteurii numune üzerinde yapılan XRD ölçüm sonuçlarına göre bir miktar kalsit oluşmaktadır. Pikler $2\theta=29^\circ$; 36° ; 40° ; 44° ; 50° ; 57° 'lerde oluşmaktadır (Şekil 4.24). 10^8 B. Pasteurii numuneler, 10^7 ve 10^9 B. Pasteurii numuneler göre daha yüksek pikler oluşturmuşlardır. Bundan dolayı B. Pasteurii bakteri gruplarında, V. Arenosii grupları gibi en iyi sonuç ve optimum değer 10^8 CFU olan gruba ait olduğu söylenebilmektedir.

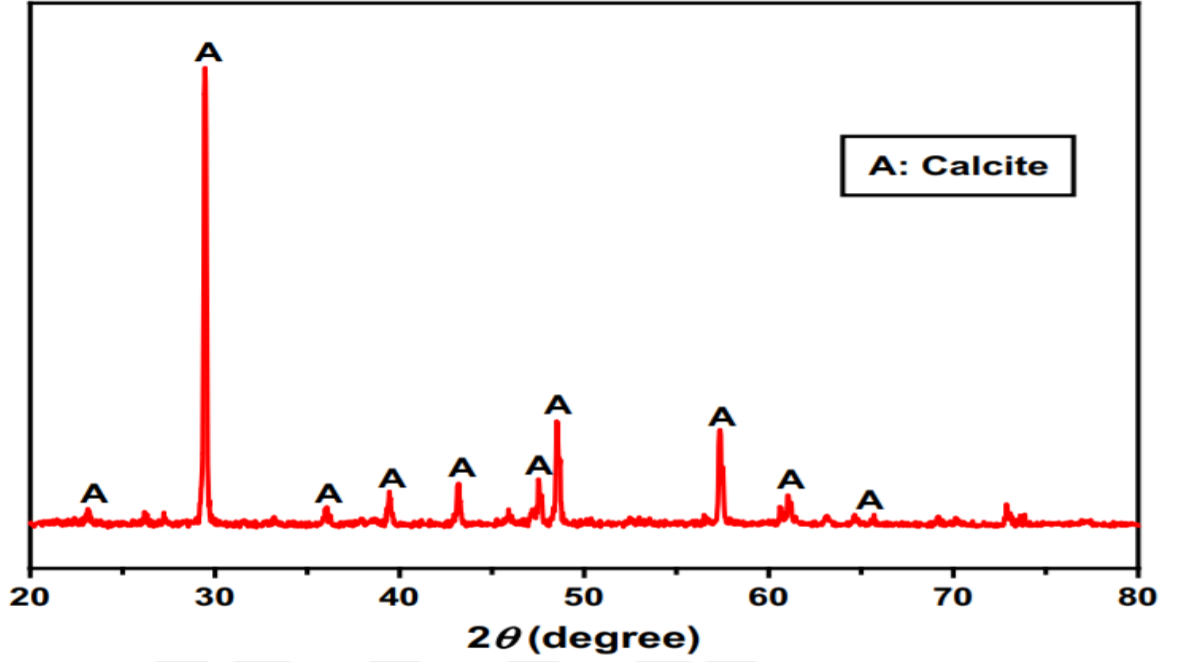


Şekil 4.25. XRD difroktogramı (10^9 B. Pasteurii)

10^9 B. Pasteurii numune üzerinde yapılan XRD ölçüm sonuçlarına göre bir miktar kalsit oluşmaktadır. Pikler $2\theta = 29^\circ; 42^\circ; 44^\circ; 50^\circ; 59^\circ; 62^\circ$ 'lerde oluşmaktadır (Şekil 4.25).

Tüm çekilen XRD ölçümleri, farklı oranlarda bakteri içeren beton numunelerinin çatlak doldurma bileşiğinin XRD kırınım spektrumunu tasvir etmektedir. En yüksek pik, $2\theta=29^\circ$ değerinde elde edilmiştir ve bu, Al-Jaroudi ve arkadaşlarının bildirdiği şekilde kalsitte eşittir (Al-Jaroudi *et al.* 2007).

Diğer piklere karşılık gelen 2θ değerleri kalsite (CaCO_3) yakın olmuştur. Bakteri içeren numunelerin çatlak yüzeyindeki mineral çökeltilerin kalsit kristali (Şekil 4.26) olduğunu teyit etmektedir. Zhang *et al.* (2017) kendi kendini onaran beton numuneler üretilip ve kalsitin oluşumunu XRD ölçümleri ile göstermişler. Şekil 4.23 de yapılan XRD ölçümünde kalsit piklerin belirtilmişler. Bu çalışmada da literatürdeki verilere benzer olarak $2\theta=29^\circ$ en yüksek kalsit pikleri tespit edilmiştir.



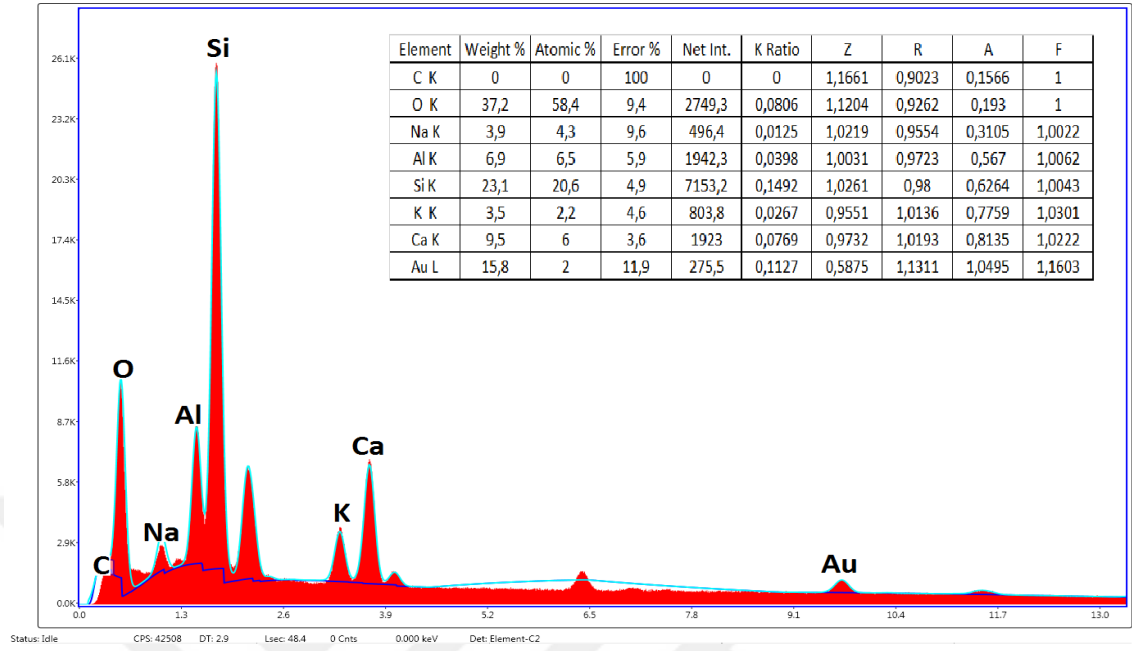
Şekil 4.26. Kalsit pikleri (Zhang *et al.* 2017) ($2\theta=29^\circ$)

4.8. Beton Numunelerinin EDAX Grafikleri ve SEM Görüntüleri

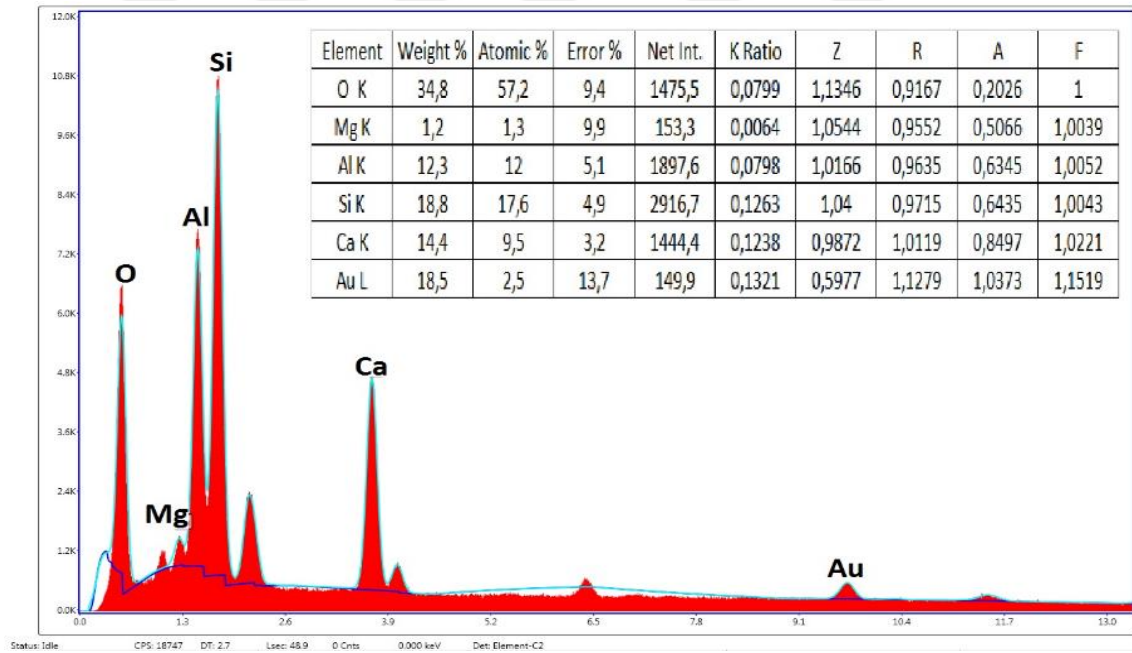
Bu bölümde farklı numunelerin EDAX bilgileri ve grafikleri 4.8.1 başlığında ve SEM görüntüleri 4.8.2 başlığında sunulmuştur. Tüm işlemler Atatürk Üniversitesi'nin DAYTAM merkezinde yapılmıştır.

4.8.1. Beton numunelerinin EDAX grafikleri

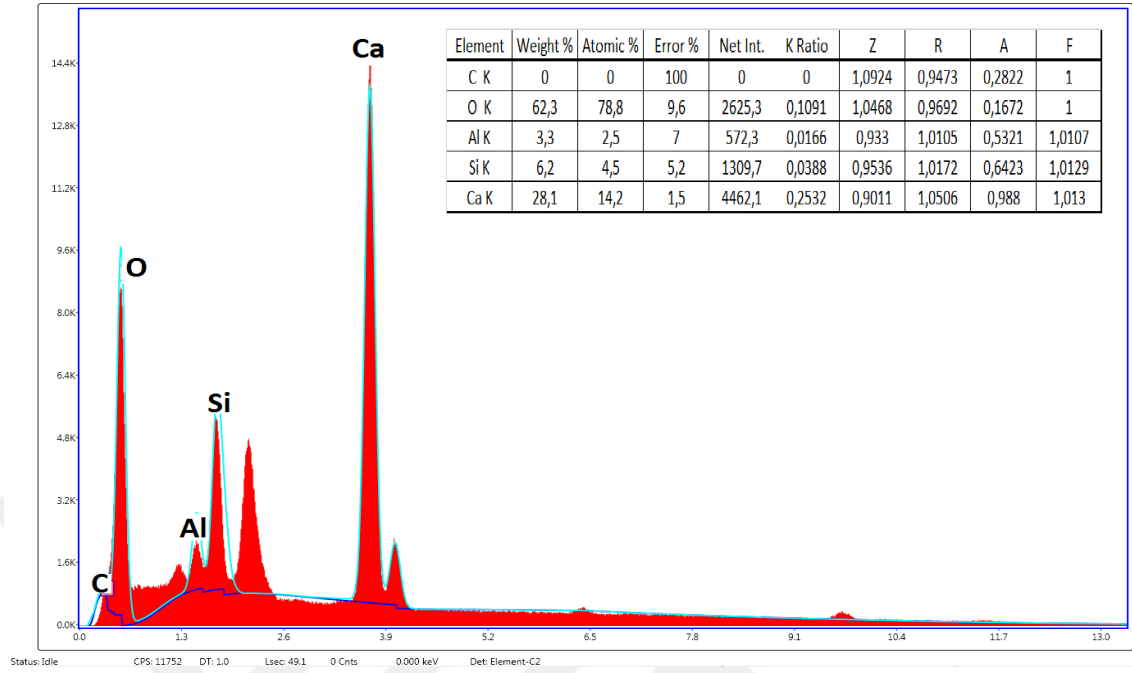
Kontrol grubu, V. Arenosii ve B. Pasteurii bakterilerin farklı konsantrasyonları için alınan örneklerden elde edilen EDAX grafikleri Şekil 4.27 – Şekil 4.37'de sunulmuştur. Grafikler ile ilgili değerlendirmeler şekillerin sonunda yapılmıştır.



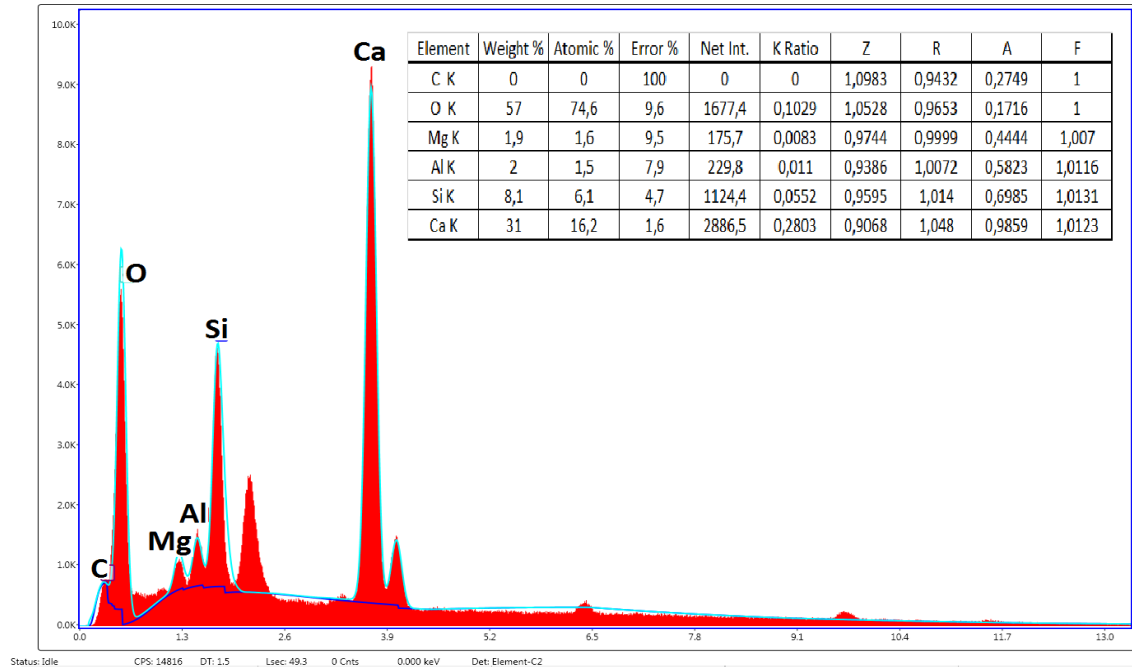
Şekil 4.27. EDAX grafiği (Kontrol)



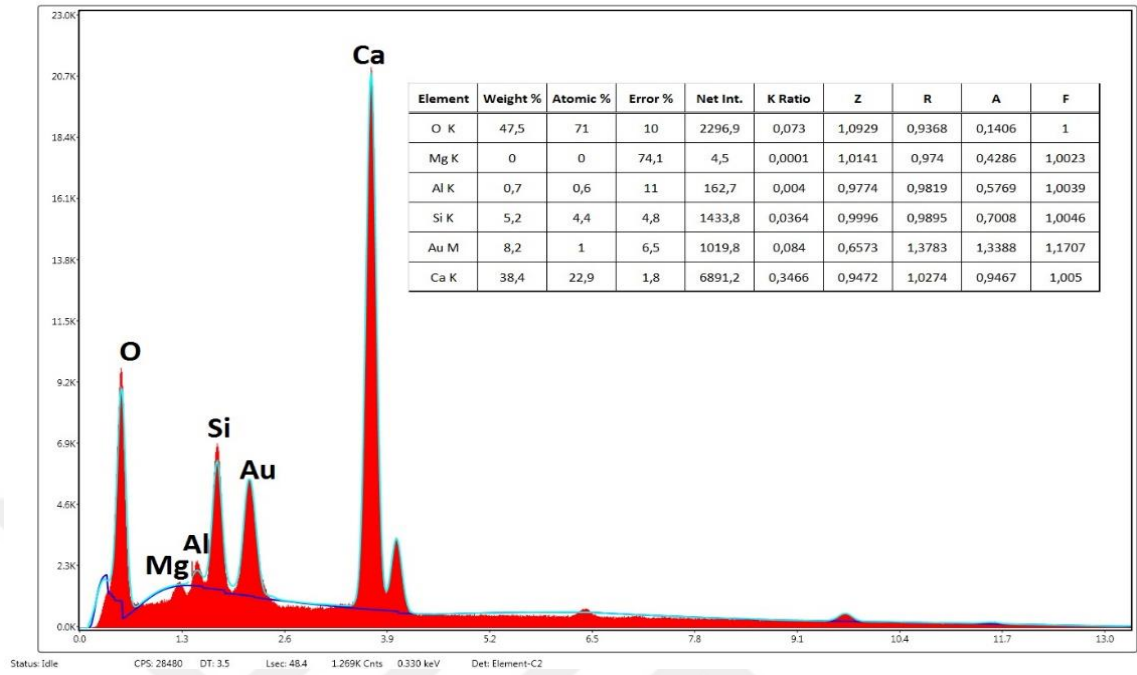
Şekil 4.28. EDAX grafiği (Kontrol + Besin)



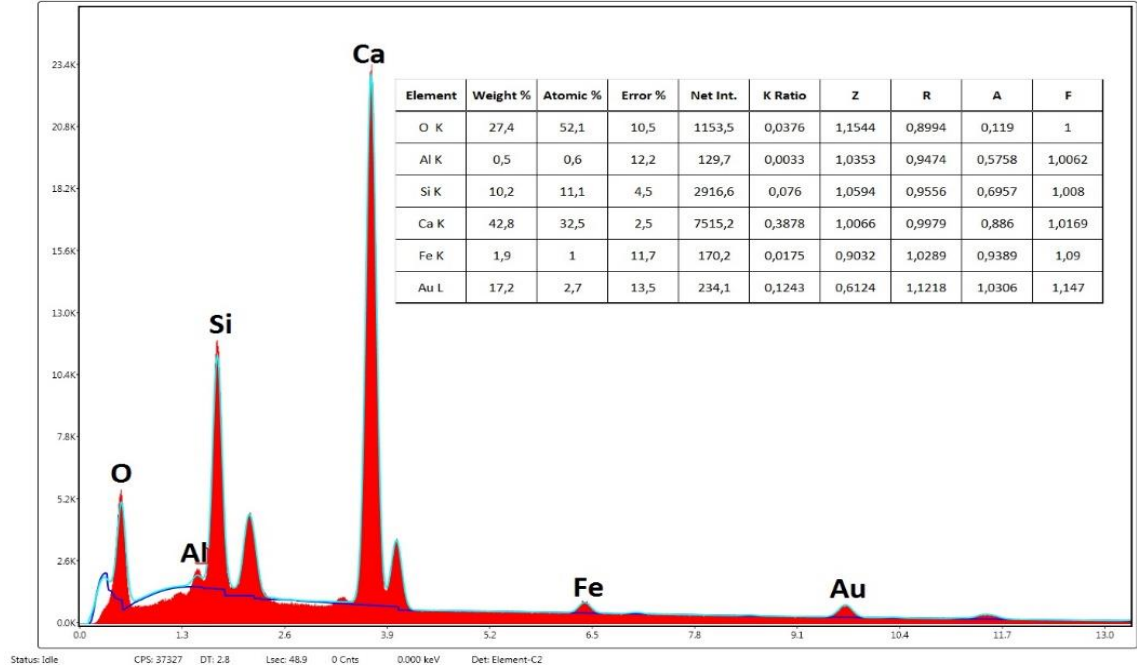
Şekil 4.29. EDAX grafiği (10^7 V. Arenosii)



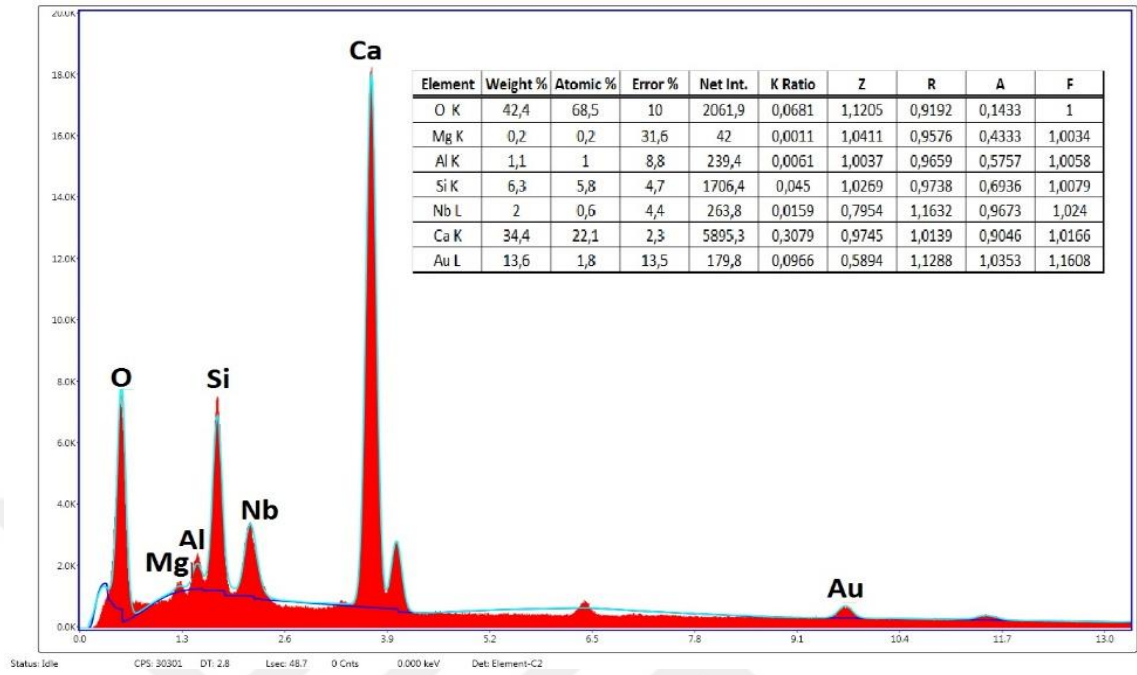
Şekil 4.30. EDAX grafiği (10^7 V. Arenosii + Besin)



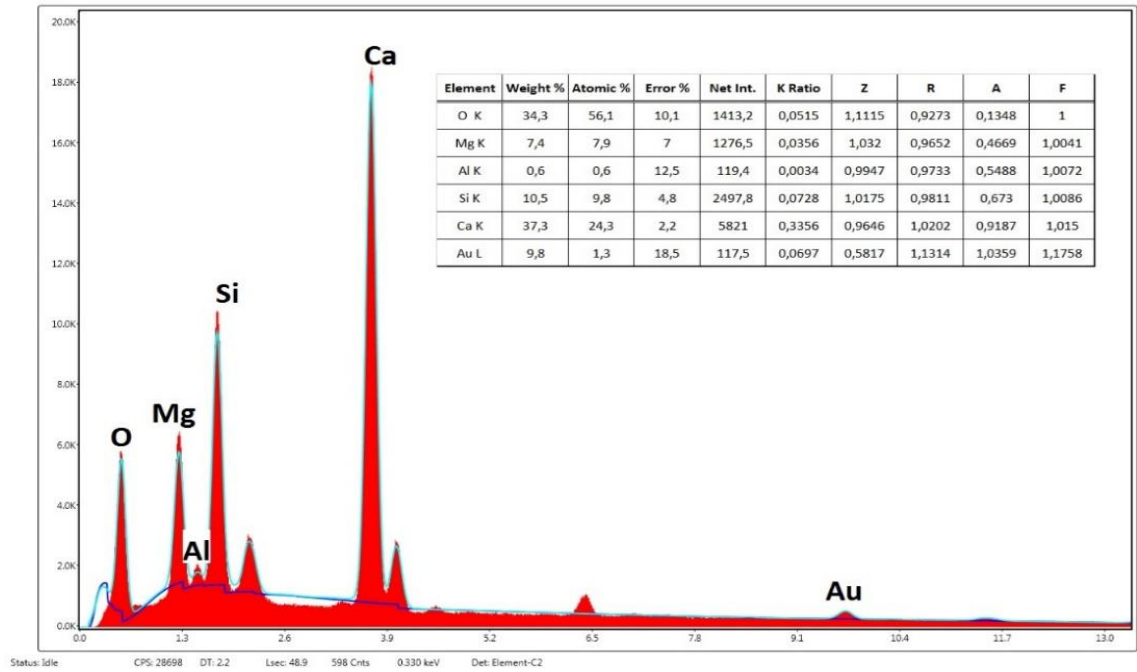
Şekil 4.31. EDAX grafiği (10^8 V. Arenosii)



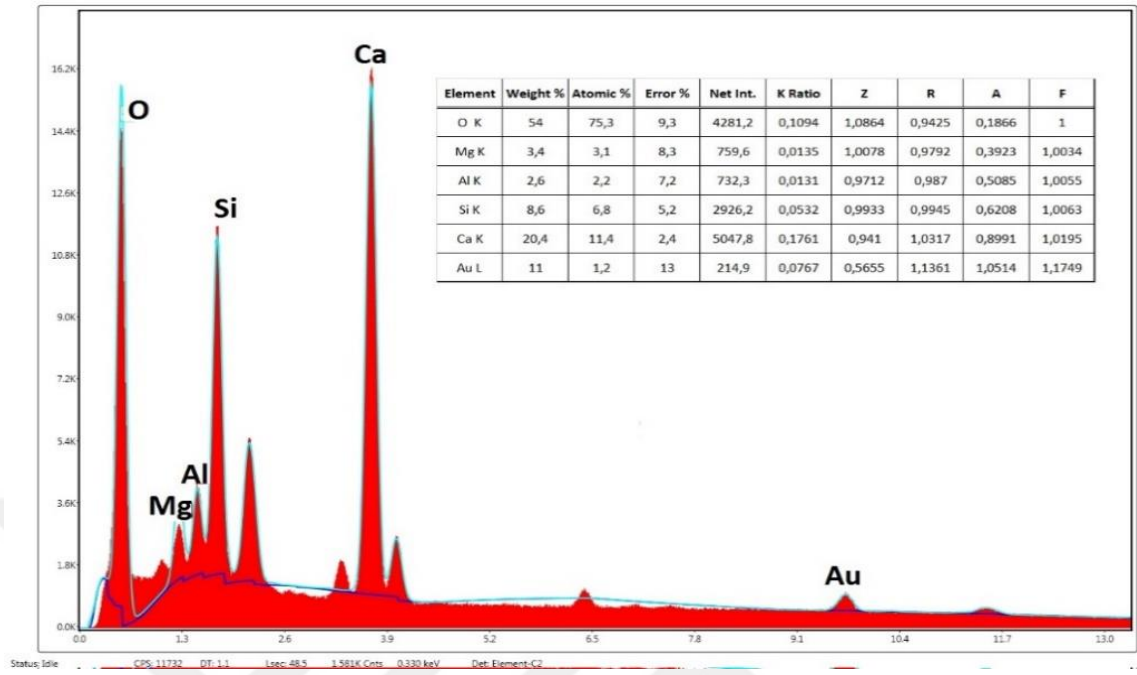
Şekil 4.32. EDAX grafiği (10^8 V. Arenosii + Besin)



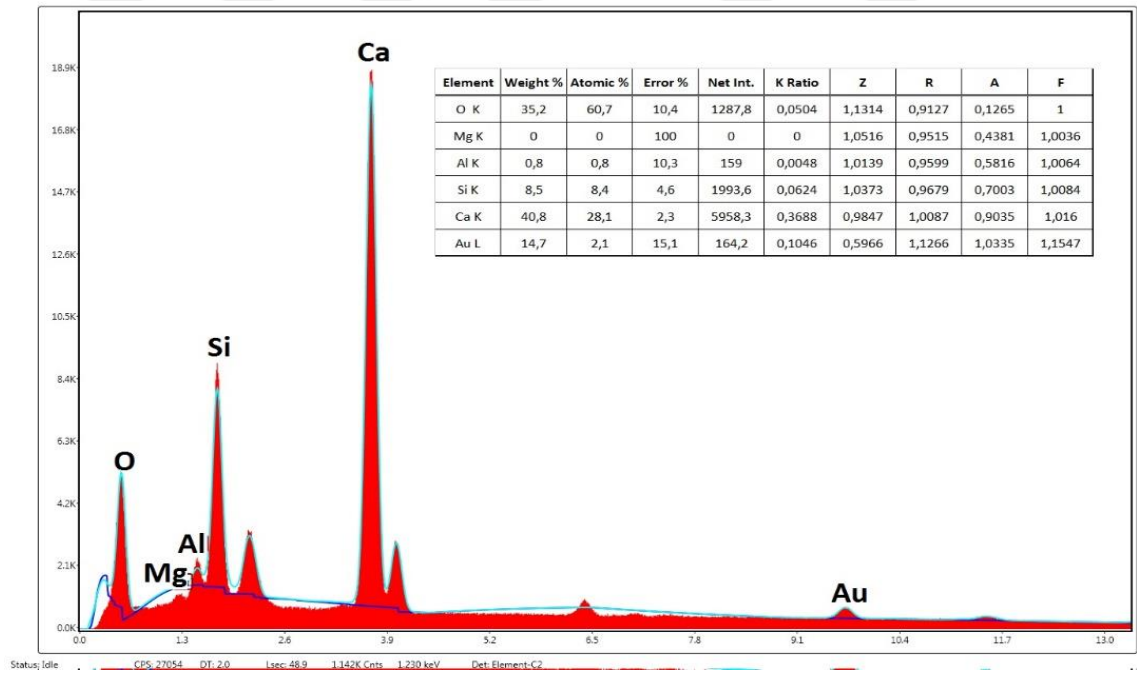
Şekil 4.33. EDAX grafiği (10^9 V. Arenosii)



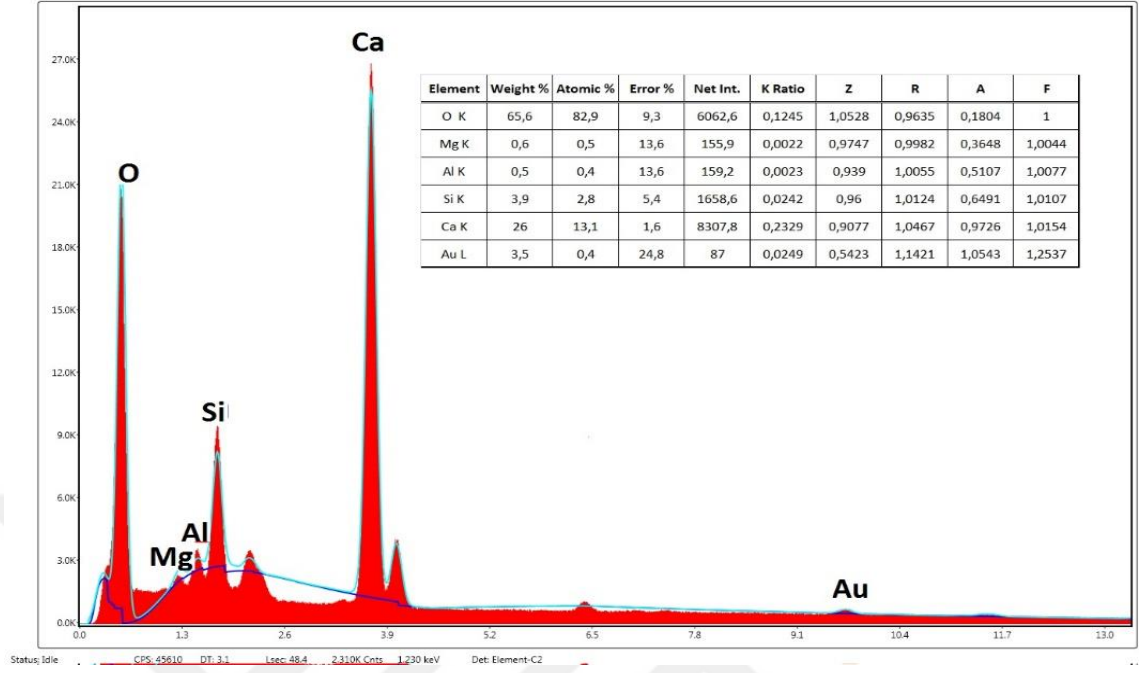
Şekil 4.34. EDAX grafiği (10^9 V. Arenosii + Besin)



Şekil 4.35. EDAX grafiği (10^7 B. Pasteurii)



Şekil 4.36. EDAX grafiği (10^8 B. Pasteurii)



Şekil 4.37. EDAX grafiği (10^9 B. Pasteurii)

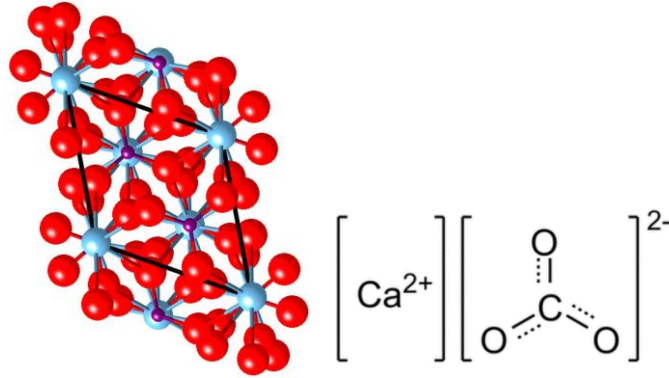
Tüm şekiller incelendiğinde EDAX sonuçlarına göre beton numunelerinde yüksek oranda Ca, O, Si, Al ve buna ilave olarak Mg ve K bulunduğu tespit edilmiştir. Betonun yapısında bulunan bileşenler göz önüne alındığında bu beklenen bir sonuçtur. Grafiklerde isimlendirilmeyen piklerin gürültü pikleri veya yaygın metal ya da oksijen pikleri olacağı değerlendirilebilir. Ayrıca grafiklerde gösterilen Au piki numunenin kendisinde olmayıp kaplama sırasında kullanılan malzemeden dolayı oluşmuştur. Betonun homojen bir malzeme olmadığı ve ölçümün tek bir noktada yapıldığı göz önüne alındığında farklı EDAX değerlerinin elde edilmesi ve bu bileşenlerin miktarlarının kesin olarak bu grafiklerden belirlenemeyeceği söylenebilir.

Bununla birlikte bakteri içeren tüm gruplarda Ca miktarı kontrol grubuna göre daha yüksek oranda tespit edilmiştir. Besin ilave edilen gruplarda ise Ca oranının daha da arttığı görülmektedir. Bu durum bakterilerin besini tüketerek daha fazla kalsit oluşturduğu şeklinde yorumlanabilir, ancak daha önce de belirtildiği gibi ölçümün noktasal yapılmasından kaynaklı, bu yöntemle kesin bir yargıya varmak mümkün değildir.

Grafikler incelendiğinde Kontrol + Besin numunelerinde en yüksek piklerin Si, Al, O ve Ca olduğu tespit edilmiştir. Bu grupta kontrol numunesine göre Ca ve Al oranlarında artış, O ve Si oranında ise düşüş görülmüştür. Bakterili grupların tümünde en yüksek pik Ca olarak belirlenmiştir. Bunu takiben O ve Si pikleri görülmektedir. Ca oranı en fazla %42,8 değeri ile 10^8 V. Arenosii + Besin grubunda belirlenmiştir. Besin içermeyen gruplarda ise V. Arenosii ile üretilen numunelerde B. Pasteurii numunelerine göre 10^7 ve 10^9 konstrasyonlarında daha fazla oranda Ca tespit edilmiştir.

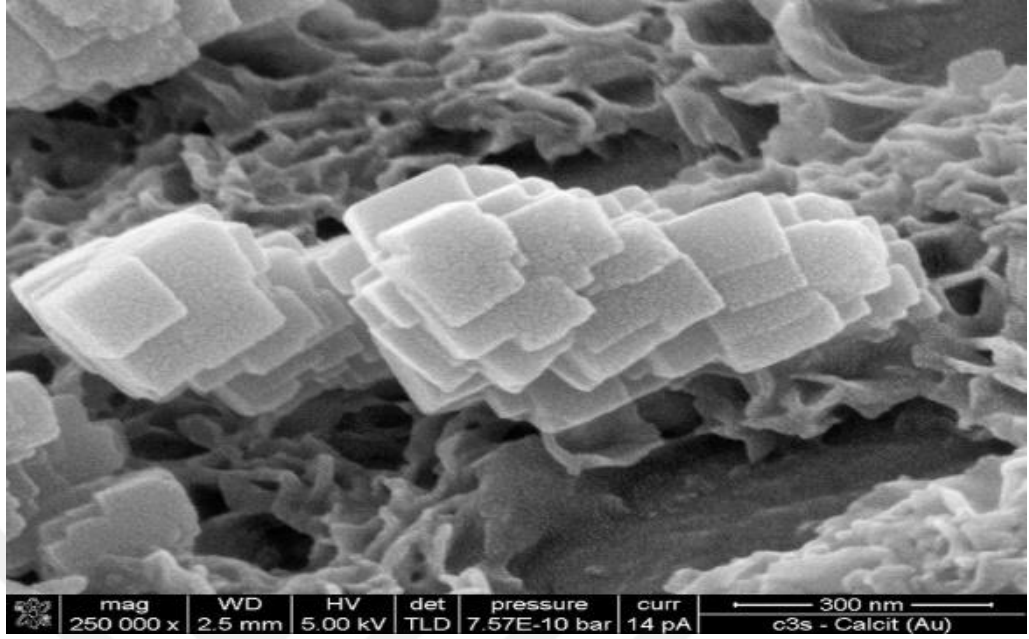
4.8.2. Beton numunelerinin SEM görüntüleri

Bu bölümde önce literatürdeki mevcut çalışmalardan alınan kalsitin kristal yapısı (Şekil 4.38) ve yine literatürden tespit edilen SEM görüntüleri (Şekil 4.39 - 4.42) verilmiş, daha sonra da bu çalışma kapsamında elde edilen SEM görüntüleri sunularak yorumlanmıştır. SEM analizlerinde kontrol numuneleri ve bakteri içeren numunelerin görüntüleri elektron mikroskopta çekilmiştir.

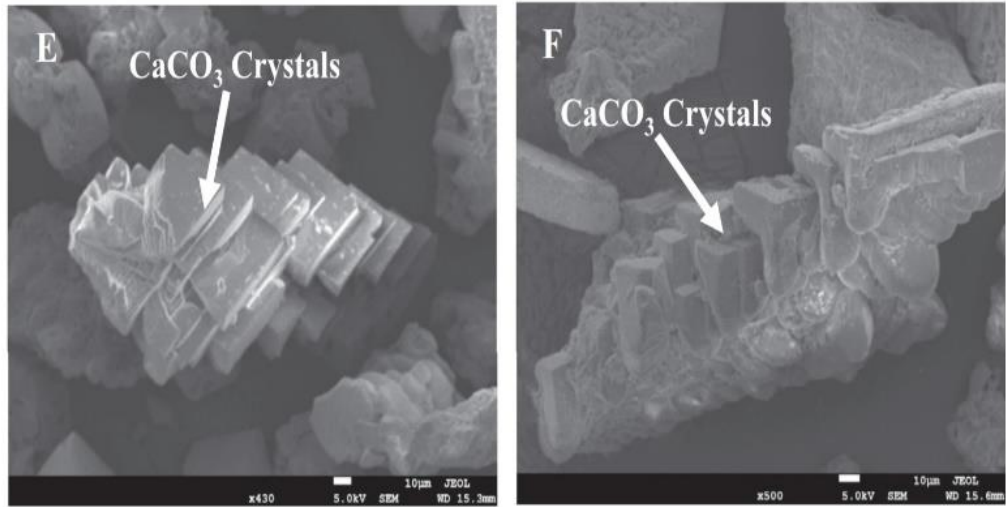


Şekil 4.38. Kalsitin kristal yapısı (CaCO_3)

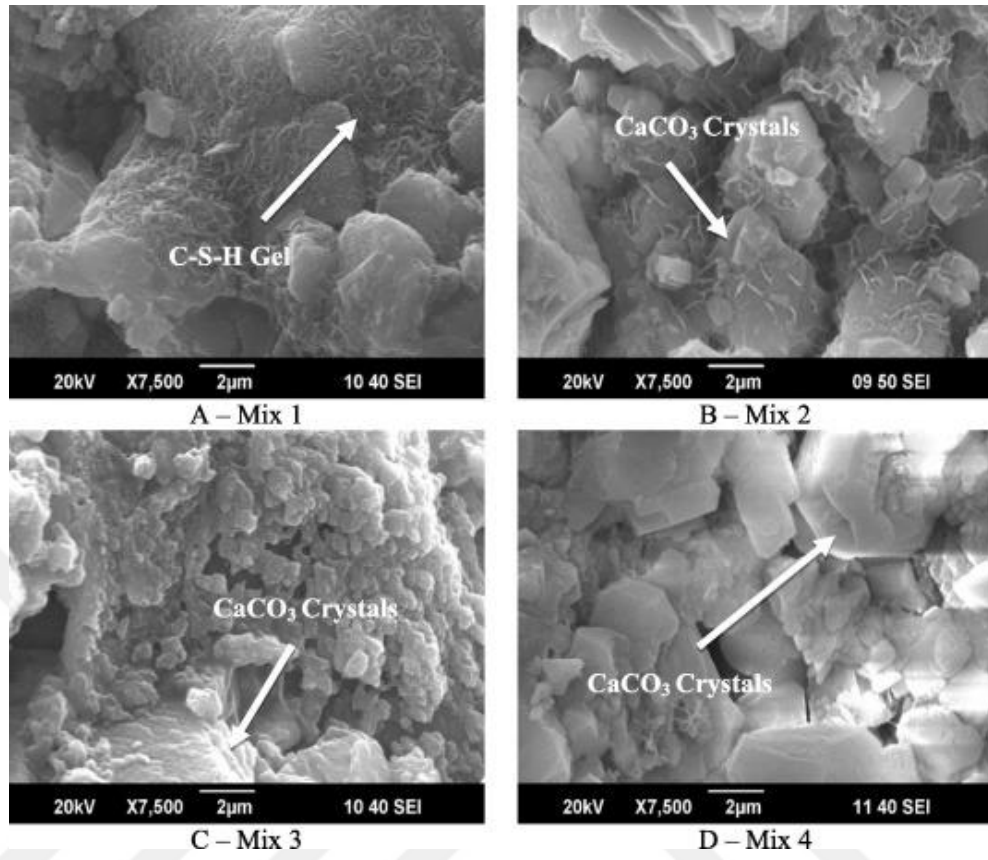
Kalsit, kalsiyum karbonat bileşeninin kristalleşmiş halidir ve genel olarak CaO (kalsiyum oksit) ve CO_2 (karbon di oksit) den oluşmaktadır. Literatür araştırmalarına göre CaCO_3 (Kalsit) kristallerinin SEM görüntüleri aşağıda verilmiştir (Şekil 4.39 - 4.42).



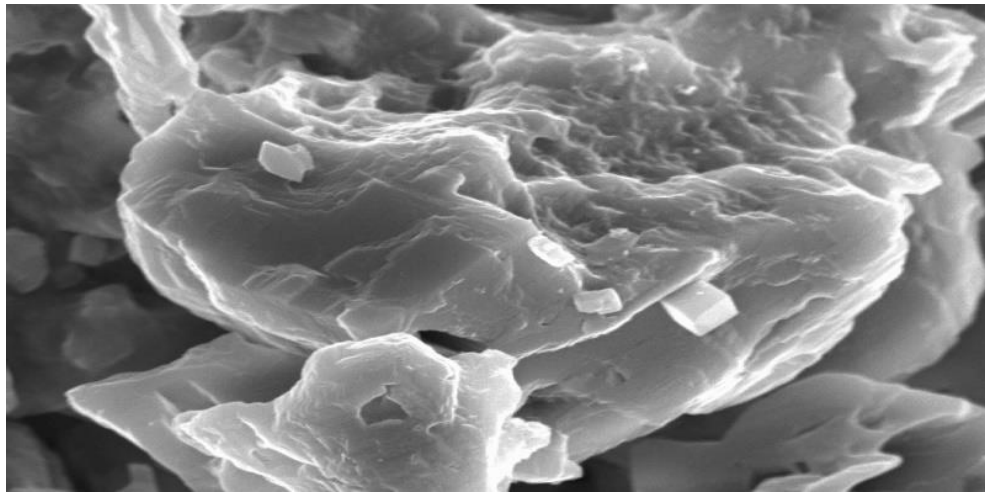
Şekil 4.39. CaCO_3 (kalsit) SEM görüntüsü (Anonymous 2018b)



Şekil 4.40. CaCO_3 (kalsit) SEM görüntüsü (Zhang *et al.* 2017)



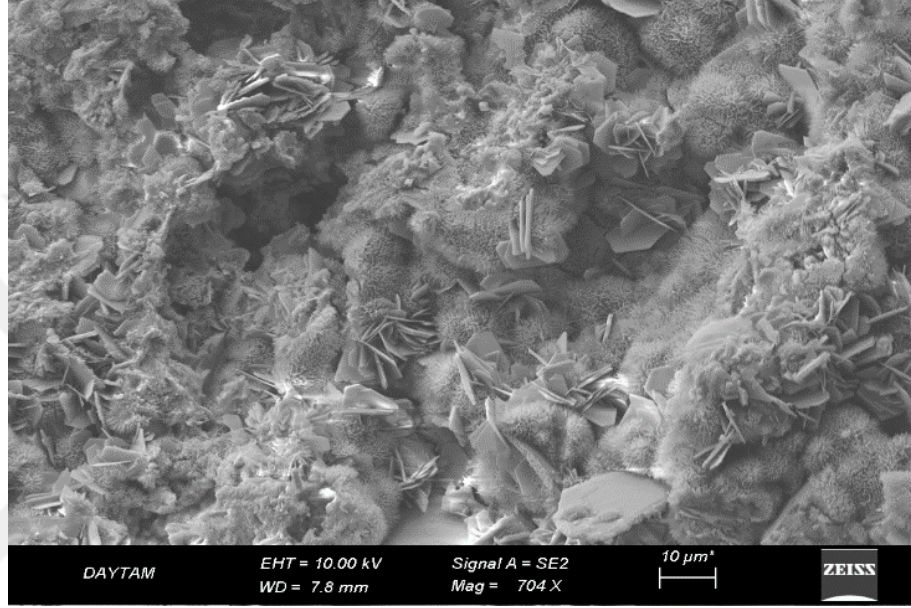
Şekil 4.41. CaCO_3 (kalsit) SEM görüntüsü (Zhang *et al.* 2017)



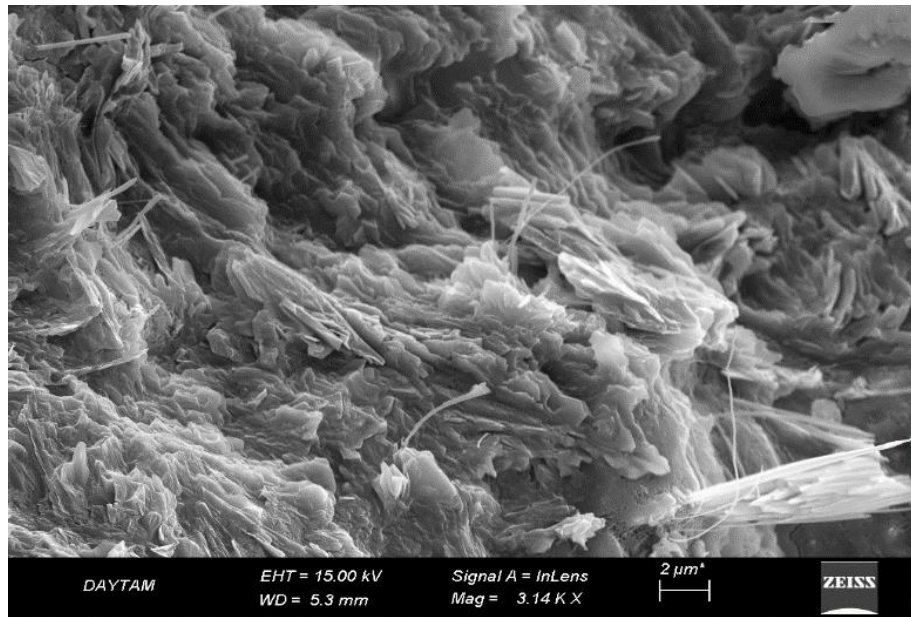
Şekil 4.42. CaCO_3 (kalsit) SEM görüntüsü (Anonymous 2018c)

Fotoğraflarda görüldüğü gibi kalsit beyaz renkli ve kristal yapıda olup, SEM görüntüleri ile betonun içinde tespit edilmesi mümkündür. Bu bölümde beton numunelerin

DAYTAM merkezinde çekilen SEM görüntüleri sunulmuştur. Numunelerin basınç dayanımı deneyi yapıldıktan sonra kırılan numuneden alınan örnekler 10 gün süreyle bakterilerin canlı kalması için uygun ortamda saklandıktan sonra SEM görüntüleri çekilmiştir.

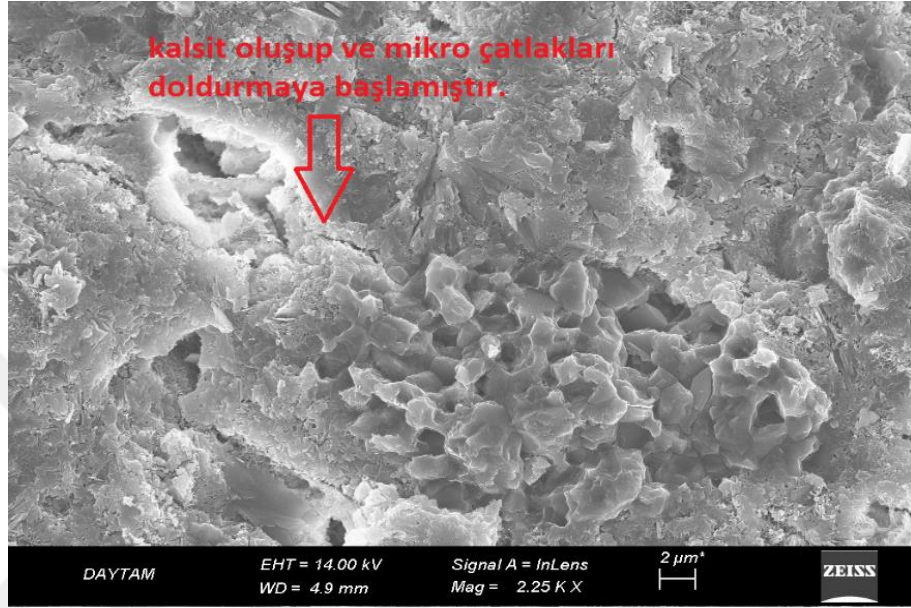


Şekil 4.43. Kontrol numunelerinin SEM görüntüsü

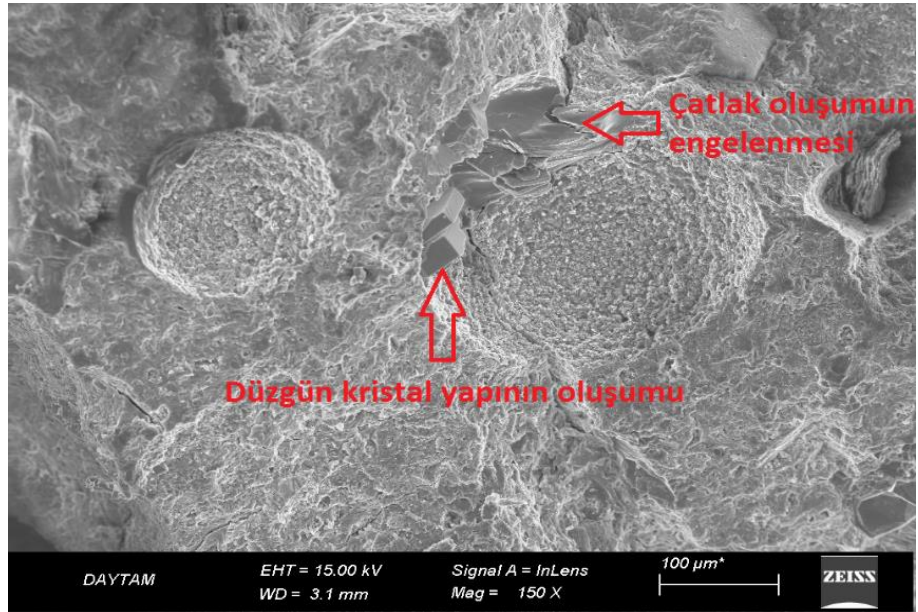


Şekil 4.44. Kontrol+Besin numunelerinin SEM görüntüsü

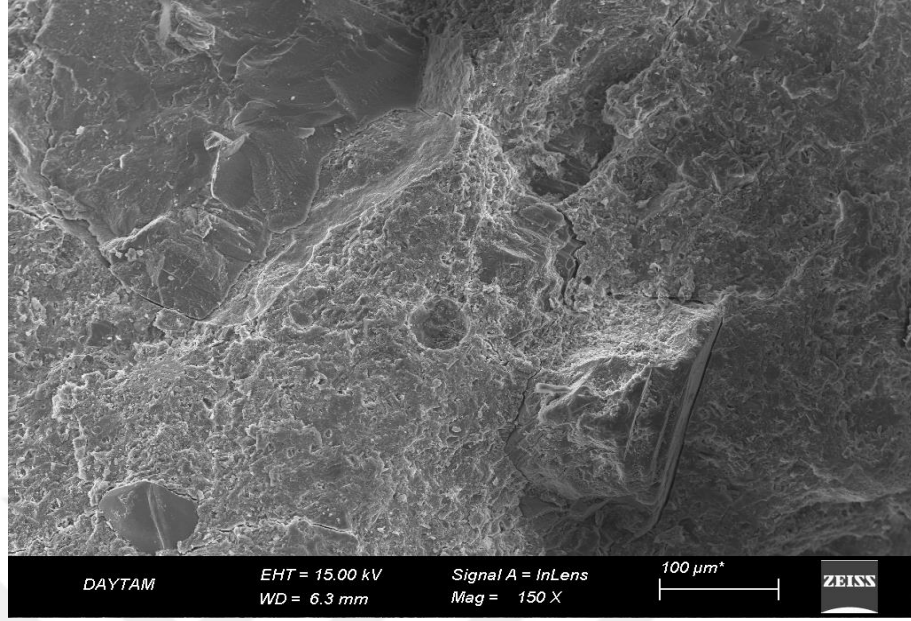
Şekil 4.43 ve Şekil 4.44’de kontrol numunelerinin SEM görüntüleri verilmiştir. Fotoğraflarda betonun amorf yapıya sahip olduğu görülmekte, ayrıca betonda oluşan CSH jelleri, $\text{Ca}(\text{OH})_2$ kristalleri ve etrenjit dikkat çekmektedir.



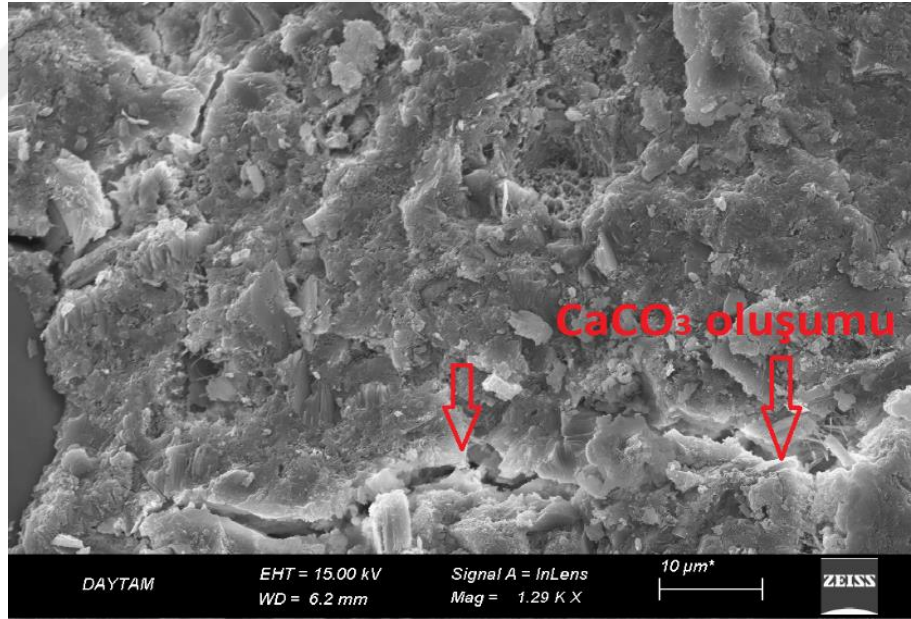
Şekil 4.45. 10^8 V. Arenosii numunelerinin SEM görüntüsü



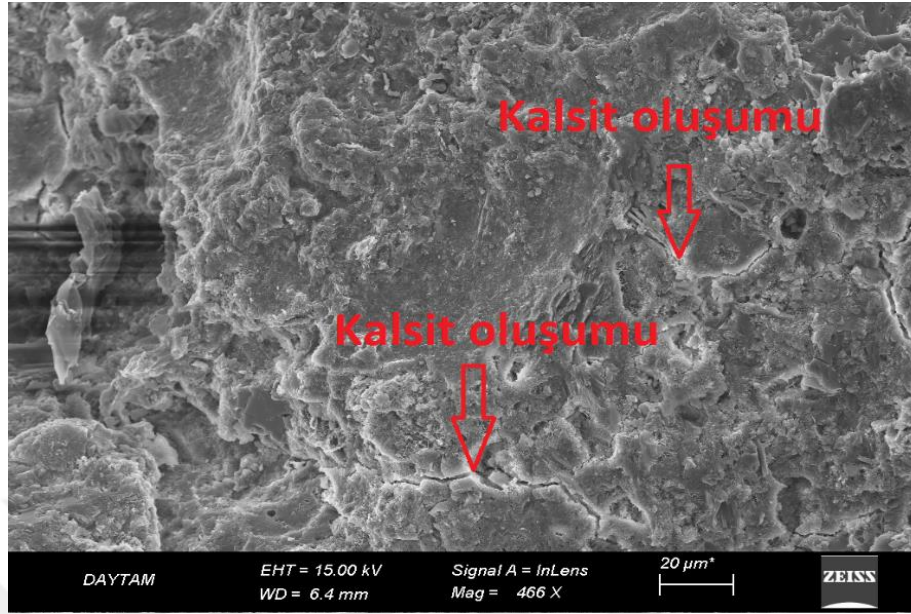
Şekil 4.46. 10^8 V. Arenosii + Besin numunelerinin SEM görüntüsü



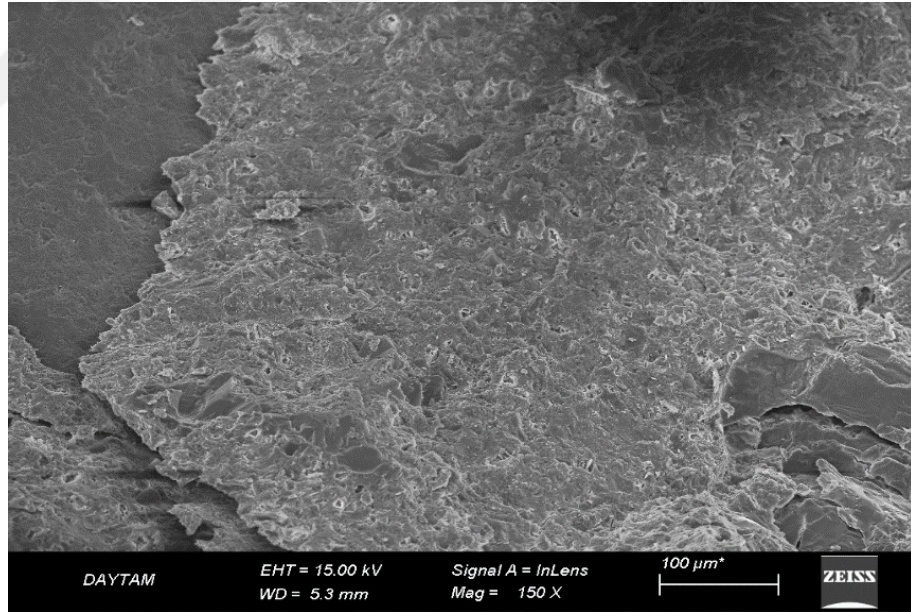
Şekil 4.47. 10^9 V. Arenosii numunelerinin SEM görüntüsü



Şekil 4.48. 10^9 V. Arenosii + Besin numunelerinin SEM görüntüsü



Şekil 4.49. 10^9 V. Arenosii + Besin numunelerinin SEM görüntüsü



Şekil 4.50. 10^8 B. Pasteurii numunelerinin SEM görüntüsü



Şekil 4.51. 10^8 B. Pasteurii numunelerinin SEM görüntüsü



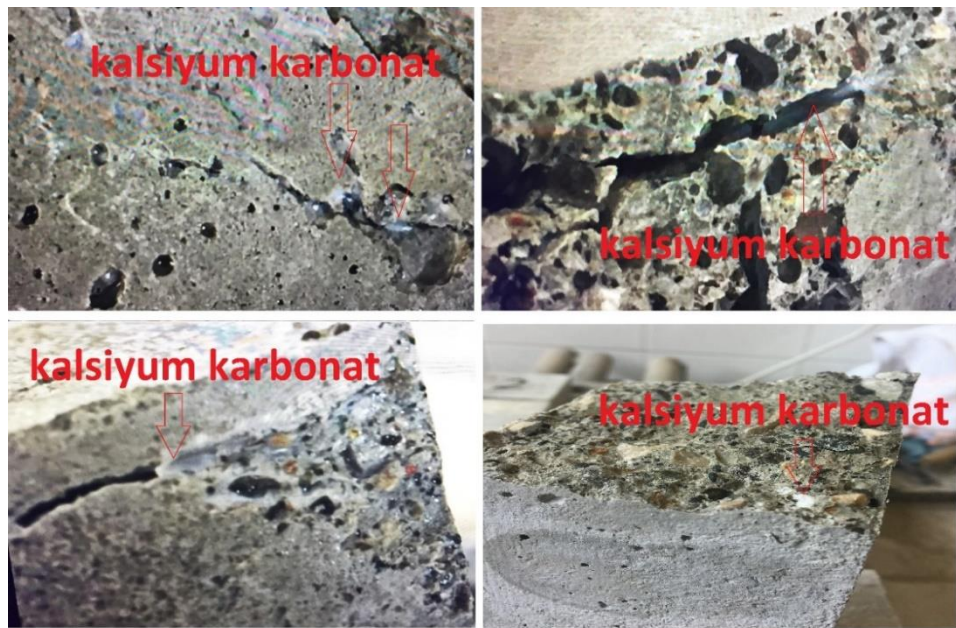
Şekil 4.52. 10^8 B. Pasteurii numunelerinin SEM görüntüsü

Şekil 4.46 - 4.53'de bakteri içeren numunelerin SEM görüntüleri verilmiştir. Fotoğraflara göre amorf yapıli betonların içinde kalsit (CaCO_3) kristalleri oluşmuş olup, mikro çatlakların doldurulmasına neden olmuştur. Böylece hem basınç dayanımında ve hem de eğilme dayanımında artışa yol açmıştır.

4.9. Beton Numunelerinde Kalsit Oluşumu ile Çatlak ve Boşlukların Kapanması

Beton numunelerinin gözlemsel incelemesinde özellikle bakterili suda kür edilmiş numunelerin yüzeyinde ve kırılan numunelerin iç kısımlarında gözle görülür kalsit oluşumu dikkat çekmektedir. Numunelerden makro boyutta çekilen fotoğraflarda (Şekil 4.53) çatlakların ve boşlukların olduğu yerlerde beyaz renkli kalsitin oluştuğu görülmektedir. Bu beyaz kalsit kristalleri çatlakları ve boşlukları doldurarak betonun hem basınç hem de eğilme dayanımında artışa yol açmaktadır. Ayrıca boşluk doldurması sebebiyle betonda geçirimliliği azaltacağından betonun kalıcılığında da önemli rolü olacağı düşünülmektedir.

Bu çalışmada kalsit oluşumu gözle görülür şekilde tespit edilmiştir. Benzer tespit Wiktor ve Jonkers (2011) tarafından da yapılmıştır. Wiktor ve Jonkers (2011)'e göre, beton yüzeyindeki çökelti kalsiyum karbonat (CaCO_3) esaslıdır ve bunların oluşumu bakteri aktivitesiyle ilgilidir. Kendi kendini onaran betonda kalsit (CaCO_3) oluşumu kalsiyum laktat ve bakterilerin reaksiyonu ile elde edilir. Kontrol numuneleri ile karşılaştırıldığında, bakteri bazlı beton numunelerinin çatlaklarında CaCO_3 'ün daha fazla miktarda çökeldiği belirlenmiştir.



Şekil 4.53. Beton numunelerinin içinde ve dışında kalsit oluşumu

5. SONUÇ ve ÖNERİLER

Yapılan çalışmanın asıl amacı, daha önce betonda denenmemiş olan *Viridibacillus Arenosii* K64 bakterisinin kendi kendini onaran betonun dayanımı üzerine etkisini belirlemektir. Ayrıca normal su kürü yerine bakterili suda numunelerin kür edilerek kür koşullarının etkisini incelemek de çalışma kapsamında düşünülmüştür. Bu amaçla *Viridibacillus Arenosii* K64 ve karşılaştırma amaçlı literatürde daha önce denenmiş olan *Bacillus Pasteurii* ATCC 11859 bakterileri betona 10^7 , 10^8 ve 10^9 CFU oranlarında ilave edilmiştir. Üretilen harç ve beton numuneleri üzerinde bakterilerin işlenebilirliğe ve basınç ve eğilme dayanımlarına etkisi araştırılmıştır. Çalışmadan elde edilen sonuçlar aşağıda maddeler halinde sıralanmıştır.

1. Hazırlanan ön deneme harçlarında belirgin dayanım artışları elde edilmediğinden, karışıma besin eklemek suretiyle yeni harç numuneler oluşturulmuştur. 28 günlük ön deneme harç numunelerinde, kontrol numuneleri için 21,13 MPa, 10^7 V. *Arenosii* için 20,20 MPa ve 10^9 V. *Arenosii* için 22,86 MPa basınç dayanımları tespit edilmiştir.
2. Besin eklenerek üretilen harç numunelerinde 28 günlük basınç dayanımları Kontrol, Kontrol + Besin, 10^7 V. *Arenosii*, 10^7 V. *Arenosii* + Besin, 10^9 V. *Arenosii* ve 10^9 V. *Arenosii* + Besin için sırasıyla 31,68MPa, 36,28 MPa, 33,30 MPa, 35,31 MPa, 38,21 MPa ve 40.66 MPa olarak belirlenmiştir. En iyi sonuç 10^9 V. *Arenosii* + Besin eklenen gruptan elde edilmiştir. Bu grubun basınç dayanımı kontrol grubuna göre %28 artış göstermiştir.
3. Taze beton üzerinde yapılan çökme deneyi sonuçlarına göre bakteri ilave edilmesi işlenebilirliği azaltmıştır. En yüksek çökme değeri 17,5 cm ile kontrol grubundan alınırken en düşük çökme değeri 13 cm ile 10^9 B. *Pasteurii* + Besin grubundan elde edilmiştir. Bununla beraber tüm grupların çökme değerlerinin 13 ile 17,5 cm arasında değiştiği ve yeterli işlenebilirliğe sahip olduğu söylenebilir.

4. Normal suda kür edilen numunelerde her iki bakteri türü için de en yüksek dayanımlar 10^8 CFU miktarında tespit edilmiş ve 10^9 CFU miktarına çıkıldığında dayanımlarda azalma görülmüştür. Bakterili suda kür edilen numunelerde ise en yüksek dayanım değerleri 10^9 CFU'lu gruplardan elde edilmiştir.
5. Basınç dayanımı sonuçlarına göre normal suda kür edilen beton numunelerinde en yüksek dayanım 10^8 CFU V. Arenosii bakteri ve besin ilave edilen gruptan elde edilmiştir. Diğer oranlarda bakteri kullanılan numunelerde kontrol grubuna göre artış olmakla beraber dayanım artışının daha az olduğu görülmüştür. En yüksek basınç dayanımı 49.26 MPa değerinde olup kontrol gruba göre %26,2 artış görülmüştür.
6. Eğilmede çekme dayanımı sonuçlarına göre normal suda kür edilen beton numunelerinin en yüksek değeri 10^8 V. Arenosii + Besin grubundan elde edilmiştir. Diğer oranlarda bakteri kullanılan numunelerde kontrol grubuna göre artış görülmüştür. En yüksek eğilme dayanımı 5,97 Mpa değerinde olup kontrol numunelere göre %17,75 artışa sebep olmuştur.
7. Beton numunelerde basınç dayanımı sonuçlarına göre bakterili suda kür edilen numunelerde en yüksek sonuç 10^9 V. Arenosii + Besin numunelerden elde edilmiştir. En yüksek Basınç dayanımı 51,38 MPa değerinde olup kontrol numunelere göre %42,5 artış gözlemlenmiştir.
8. Eğilmede çekme dayanımı sonuçlarına göre bakterili suda kür edilen beton numunelerin en yüksek sonuç 10^8 V. Arenosii + Besin numunelerden elde edilmiştir. En yüksek eğilme dayanımı 5,92 MPa değerinde olup Kontrol numunelere göre %47 artış görülmüştür.
9. Bakterili suda kür edilen numunelerde, normal suda kür edilen numunelere göre çoğunlukla daha fazla dayanım değerleri elde edilmiştir. Bunun gerekçesinin numunelerin yüzeyinde de kalsit oluşumuna bağlı olarak yüzeydeki boşlukların ve çatlakların doldurulması olduğu düşünülmektedir.

10. XRD ölçülerine göre $2\theta=29^\circ$ de maksimum saf kalsit pikleri belirlenmiştir. Ayrıca, diğer piklere karşılık gelen 2θ değerlerinin de literatürde belirtilen saf kalsit piklerine yakın olması, numunelerin çatlak yüzeyindeki mineral çökeltilerinin kalsit kristal olduğunu doğrulayıp, betondaki dayanım artışını desteklemektedir. Kalsit oluşumu ile çatlakların doldurulması betonun onarımına ve dayanımda artışına yol açtığı düşünülmektedir.
11. SEM fotoğraflarında oluşan kalsit kristalleri görülmektedir. Deneysel verilerle elde edilen dayanım artışları ve XRD ölçümlerinde belirlenen kalsit pikleri, SEM fotoğraf ve görüntüleri ile de desteklenmiştir.
12. Bundan sonra konu hakkında yapılacak olan çalışmalarda farklı bakteri türlerinin de kendi kendini onaran betonda etkilerinin araştırılmasının ve başta geçirimsizlik olmak üzere kendi kendini onaran betonların durabilite özelliklerinin incelenmesinin ayrıca bu beton türünün betonarme yapılarda kullanılabilirliğinin hem malzeme özellikleri hem de ekonomik açıdan değerlendirilmesinin konunun gelişimi için faydalı olacağı düşünülmektedir.

KAYNAKLAR

- ASTM C192/C192M - 2006. "Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory".
- ASTM C293 / C293M – 2016. "Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam With Center-Point Loading) ”.
- ASTM C33 / C33M - 2011. "Standard Specification for Concrete Aggregates", 1991-2011.
- ASTM C39/C39M - 2014. "Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens".
- ASTM C78 / C78M – 2018. "Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Third-Point Loading) ”.
- Anonymous, 2018a. <https://theseconstructor.org/concretes/bacterials-concrete-self-healing-concrete/17711/123>
- Anonymous, 2018b. http://www.zkg.de/en/artikel/zkg_201001_Progress_in_building_materials_analysis_Part_1__802946.html
- Anonymous, 2018c. <http://www.i-pi.com/~diana/slime/corrosion/svanbergite>
- Biswas, M., Majumda, S., Chowdhury, T., Chattopadhyay, B., Mandal, S., Halder, U., Yamasaki, Sh. 2010. "Bioremediase a unique protein from a novel bacterium BKH1, ushering a new hope in concrete technology", *Journal of Enzyme and Microbial Technology* 46 (2010) 581–587.
- Bundur, Z.B., Kirisits, M.J., Ferron, R.D. 2015. "Biomaterialized cement-based materials: Impact of inoculating vegetative bacterial cells on hydration and strength", *Journal of Cement and Concrete Research* 67 (2015) 237–245.
- Chahal, N., and Siddique, R. 2013. Permeation properties of concrete made with fly ash and silica fume: Influence of ureolytic bacteria", *Journal of Construction and Building Materials* 49 (2013) 161–174.
- 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" *Journal of Construction and Building Materials* 28 (2012) 351–356.
- Cohen MD. 1983. "Modeling of expansive cements", *Journal of Cement & Concrete Research*; 13:519–28.
- Day JL., Ramakrishnan V., Bang SS. 2003. "Microbiologically induced sealant for concrete crack remediation", In: *Proceedings of 16th Engineering Mechanics Conference*, Seattle, Washington.
- Dong, B., Wang, Y., Fang, G., Han, N., Xing, F., and Lu, Y. 2015. Smart releasing behavior of a chemical self-healing microcapsule in the stimulated concrete pore solution. *Journal of Cement & Concrete Composites* 56 (2015) 46–5.
- Dry C. 1994. "Matrix cracking repair and filling using active and passive modes for smart timed release of chemicals from fibers into cement matrices", *Smart Materials and Structures*; 3(2):118–23.
- Erdoğan Tu. 2003 "Beton", ODTU yayınları.
- Erdoğan, T.Y., 1995. "Karışım ve Bakım Suları", *Türkiye Hazır Beton Birliği*, S 1,3,9,12, İstanbul.
- Erdoğan, T.Y., 2003. *Beton*. ODTU Geliştirme Vakfı ve Yayıncılık A.S., Ankara, 741s.

- Felekoğlu, B., 2003. Kendiliğinden Yerleşen Betonun Fiziksel ve Mekanik Özelliklerinin Araştırılması. Yüksek Lisans Tezi. Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.
- Ferrara, L., Krelani, V., and Carsana M. 2014. A "Fracture testing based approach to assess crack healing of concrete with and without crystalline admixtures", *Journal of Construction and Building Materials* 68 (2014) 535–551.
- Gilabert, F.A., Garoz, D., Van Paepegem, W. 2015. "Stress concentrations and bonding strength in encapsulation-based self-healing materials", *Journal of Materials and Design* 67 (2015) 28–41.
- Guadalupe Sierra-Beltran, M., Jonkers, H.M., and Schlangen, E. 2014. "Characterization of sustainable bio-based mortar for concrete repair", *Journal of Construction and Building Materials* 67 (2014) 344–352.
- Gündeşli, U., 2008. Uçucu Kül, Silis Dumanı ve Yüksek Fırın Cürufunun Beton ve Çimento Katkısı Olarak Kullanımı Üzerine Bir Kaynak Taraması. Yüksek Lisans Tezi. Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Adana.
- Gürol G., 1999. "Ekonomik beton için beton bileşenleri çimento/su/ince ve kaba agrega/kimyasal ve mineral katkıları", *Dizayn ve Konstrüksiyon Dergisi*, 164.
- Han C., Hwang Y., Yang S., Gowripalan N., 2005. "Performance of spalling resistance of high performance concrete with polypropylene fiber contents and lateral confinement", *Journal of Cement & Concrete Research*, 35:1747–53.
- Hanus, M.J., Harris, A.T. 2013. "Nanotechnology innovations for the construction industry", *Journal of Progress in Materials Science* 58 (2013) 1056–1102.
- Heinen J., Babcock DS. 1988. "Cartridges of quick-setting cement and gelled water", US patent 4772326. Construction Products Research Inc.
- Hilloulin, B., Tittelboo, K.V., Gruyaer, E., De Belie, N., and Loukili, A. 2015. "Design of polymeric capsules for self-healing concrete", *Journal of Cement & Concrete Composites* 55 (2015) 298–307.
- Houst, Y.F., Maeder, U., Flatt, R.J., Widmer, J., Bowen P., Hoffmann, H., Sulser, U. and Buerge, T.A., 1999. "New superplasticizers from research to application, creating with concrete", *International Conference on Modern Concrete Materials Binders, Additives and Admixtures*, Scotland, 445-456.
- Huang, H., Ye, G., and Damidot, D. 2014. "Effect of blast furnace slag on self-healing of microcracks in cementitious materials", *Journal of Cement and Concrete Research* 60 (2014) 68–82.
- Huang, H., Ye, G., Shui, Zh. 2014. "Feasibility of self-healing in cementitious materials – By using capsules or a vascular system? ", *Journal of Construction and Building Materials* 63 (2014) 108–118.
- Jianguang, Zh., Yuanzhen L., Tao F., Mengjun Zh. , Lin Zh., Aijuan Zh., Zhu L. 2017. "Immobilizing bacteria in expanded perlite for the crack self-healing in concrete" *Construction and Building Materials*. 148 (2017) 610–617.
- Jiang, Zh., Li, W., Yuan, Zh. 2015. "Influence of mineral additives and environmental conditions on the self-healing capabilities of cementitious materials", *Journal of Cement & Concrete Composites* 57 (2015) 116–127.
- Jonkers, H. M. 2011. "Bacteria-based self-healing concrete", *Journal of Heron*, 56 (1/2).

- 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", *Journal of Ecological Engineering* 36 (2010) 230–235.
- Joseph, C., Jefferson AD., Isaacs B., Lark R., Gardner D. 2010. "Experimental investigation of adhesive-based self-healing of cementitious materials", *Magazine of Concrete Research*; 62(11):831–43.
- Li, VC., Lim, YM., Chan, YW. 1998. "Feasibility of a passive smart self-healing cementitious composite." *Composites B*; 29B:819–27.
- Nakatani, M., Nishimura, J., Hanaki, S., Uchida, H. 2014. "Crack-healing behavior induced by oxidation in SiN/SiC nanolaminated films", *Journal of Thin Solid Films* 556 (2014) 68–73.
- Nejadnik, M.R., Yang, X., Bongio, M., Alghamdi, H.S. , Beucken, J.J.J.P., Huysmans, M.C., Jansen, J.A., Jöns Hilborn, J., Ossipov, D., Leeuwenburgh, S.C.G. 2014. "Self-healing hybrid nanocomposites consisting of bisphosphonated hyaluronan and calcium phosphate nanoparticles", *Journal of Biomaterials* 35 (2014) 6918–6929.
- Pei, R., Liu, J., Wang, Sh., Yang, M. 2013. "Use of bacterial cell walls to improve the mechanical performance of concrete", *Journal of Cement & Concrete Composites* 39 (2013) 122–130.
- Postacıoğlu, B., 1987. "Beton-Bağlayıcı Maddeler, Agregalar, Beton", *Teknik Kitaplar Yayınevi*, 177-402.
- Roshavelov, T., 2002. "Concrete mixture proportioning based on rheological approach", *First North American Conference on the Design and Use of Self-Consolidating Concrete*. Chicago, IL:ACBM , pp. 113-119.
- S.S. Al-Jaroudi, A. Ul-Hamid, A.-R.I. Mohammed, S. Saner, 2007. "Use of X-ray powder diffraction for quantitative analysis of carbonate rock reservoir samples", *Powder Technology*. 175 (3) 115–121.
- Sangadji, S.,Schlangen, E. 2013. "Mimicking bone healing process to self repair concrete structure", *Journal of Procedia Engineering* 54 (2013) 315 – 326.
- Schlangen, E., Sangadji, S. 2013. "Addressing infrastructure durability and sustainability by self healing mechanisms - Recent advances in self healing concrete and asphalt ", *Journal of Procedia Engineering* 54 (2013) 39 – 57.
- Sisomphon, K., Copuroglu, O., Koenders, E.A.B. 2013. "Effect of exposure conditions on self healing behavior of strain hardening cementitious composites incorporating various cementitious materials", *Journal of Construction and Building Materials* 42 (2013) 217–224.
- Stuckrath, C., Serpell, R., Valenzuela, L. M., Lopez,M. 2014. "Quantification of chemical and biological calcium carbonate precipitation: Performance of self-healing in reinforced mortar containing chemical admixtures", *Journal of Cement & Concrete Composites* 50 (2014) 10–15.
- Thao, TDP., Johnson TJS., Tong QS., Dai PS. 2009. "Implementation of self-healing in concrete – proof of concept", *The IES J Part A: Civil Structure Engineering*; 2(2):116–25.
- Tomiuchi S., Nishihama Y. 1986. "Inorganic building boards with uniform strength", JP patent 61031338. Matsushita Electric Works, Ltd.
- TS 3530, 1980. "Beton agregalarının birim ağırlıklarının tayini", *Türk Standardları Enstitüsü*, Ankara.

- TS 706 EN 12620, 2003. "Beton Agregaları", Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS 802 -2009. "Beton Karışımı Hesap Esasları", Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 1097-6, 2002. "Agregaların mekanik ve fiziksel özellikleri için Deneyler - Bölüm 6: Tane yoğunluğu ve su emme oranının tayini", Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 12390-3, 2003. "Beton-sertleşmiş beton deneyleri-Bölüm 3: Deney numunelerinde basınç dayanımının tayini", Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 1744-1- 2011. "Agregaların kimyasal özellikleri için deneyler", Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- Van Tittelboom, K., De Belie, N., De Muynck, W., Verstraete, W. 2010. "Use of bacteria to repair cracks in concrete", *Journal of Cement and Concrete Research*, 40 (2010) 157–166.
- Van Tittelboom, K., De Belie, N., Lehmann, F., Grosse Ch.U., 2012. "Acoustic emission analysis for the quantification of autonomous crack healing in concrete", *Journal of Construction and Building Materials* 28 (2012) 333–341.
- Venkovic, N., Sorelli, L., Martirena, F. 2014. "Nanoindentation study of calcium silicate hydrates in concrete produced with effective microorganisms-based bioplasticizer", *Journal of Cement & Concrete Composites*, 49 (2014) 127–139.
- Wan Jo, B., Chakraborty, S., Kim K., H. 2014. "Investigation on the effectiveness of chemically synthesized nano cement in controlling the physical and mechanical performances of concrete", *Journal of Construction and Building Materials* 70 (2014) 1–8.
- Wang, J., Dewanckele, J., Cnudde, V., Van Vlierberghe, S., Verstraete, W., De Belie, N. 2014. "X-ray computed tomography proof of bacterial-based self-healing in concrete", *Journal of Cement & Concrete Composites* 53 (2014) 289–304.
- Wang, J., Van Tittelboom, K., De Belie, N., Verstraete, W. 2012. "Use of silica gel or polyurethane immobilized bacteria for self-healing concrete", *Journal of Construction and Building Materials* 26 (2012) 532–540.
- Wang, J.Y., Snoeck, D., Van Vlierberghe, S., Verstraete, W., and De Belie N. 2014. Application of hydrogel encapsulated carbonate precipitating bacteria for approaching a realistic self-healing in concrete. *Journal of Construction and Building Materials* 68 (2014) 110–119.
- Wang, J.Y., Soens, H., Verstraete, W., De Belie, N. 2014. "Self-healing concrete by use of microencapsulated bacterial spores", *Journal of Cement and Concrete Research* 56 (2014) 139–152.
- Wiktor, V., Jonkers, H. M. 2011. "Quantification of crack-healing in novel bacteria-based self-healing concrete", *Journal of Cement & Concrete Composites* 33 (2011) 763–770.
- Wiktor, V., Jonkers, H.M. 2015. "Field performance of bacteria-based repair system: Pilot study in a parking garage", *Journal of Case Studies in Construction Materials* 2 (2015) 11–17.
- Wong, L.S. 2015. "Microbial cementation of ureolytic bacteria from the genus bacillus: a review of the bacterial application on cement-based materials for cleaner production", *Journal of Cleaner Production* 93 (2015) 5- 17.
- Wu, M., Johannesson, B., Geiker, M. 2012. "A review: Self-healing in cementitious materials and engineered cementitious composite as a self-healing material", *Journal of Construction and Building Materials* 28 (2012) 571–583.

- Xu, J., Yao, W. (2014). "Multiscale mechanical quantification of self-healing concrete incorporating non-ureolytic bacteria-based healing agent", *Journal of Cement and Concrete Research* 64 (2014) 1–10.
- Yıldız, E., 2006. "Farklı tipteki puzolanların betonun mekanik özelliklerine etkisi", Yüksek Lisans Tezi-. Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Yuan L. 2009. "Novel glass fiber-reinforced cyanate ester/microcapsule composites", *Journal of Composite Materials*. 43(2009)1679-1694.
- Yuhong Wang, P.E., Zhao, K., Glover, Ch., Chen, L., Wen., Chong, D., Hu, Ch. 2015. "Effects of aging on the properties of asphalt at the nanoscale", *Journal of Construction and Building Materials* 80 (2015) 244–254.
- Zhang, Y., Guo, H.X., Cheng, X.H. 2015. "Role of calcium sources in the strength and microstructure of microbial mortar", *Journal of Construction and Building Materials* 77 (2015) 160–167.

ÖZGEÇMİŞ

Majid ATASHAFRAZEH, 1980 yılında İran/Tebriz’de doğdu. İlk, orta ve lise öğrenimini Tebriz’de tamamladı. 1999 yılında yükseköğrenimine başladığı Tebriz Azad Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Programını 2003 yılında tamamladı.

2003-2008 arasında İran’da farklı şirketlerde ve farklı görevlerde çalıştı ve inşaat sektöründe tecrübelerine sahip oldu. 2008 yılında Tebriz’de kendi şirketini açtı ve çalışma hayatına devam etti. 2010 yılında yüksek lisansın Atatürk Üniversitesinde başlayıp ve 2013 yılında tamamladı.

İyi derecede Türkçe, Farsça ve İngilizce bilmektedir. Auto Cad, Sap, Safe, Etabs, Abaqus, Tekla (X-Steel), Ms Project ve Primavera bilgisayar programlarını kullanabilmektedir.