BURSA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ❖ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MİKROBİYOLOJİK KALSİFİKASYONUN BETON ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Musa YILDIRIM

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

TEMMUZ 2019

BURSA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ❖ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MİKROBİYOLOJİK KALSİFİKASYONUN BETON ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Musa YILDIRIM

(171082908)

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Dr. Öğretim Üyesi Hacer BİLİR ÖZHAN

TEMMUZ 2019

BTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 171082908 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi MUSA YILDIRIM, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı "MİKROBİYOLOJİK KALSİFİKASYONUN BETON ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ" başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Dr. Öğretim Üyesi Hacer BİLİR ÖZHAN**
Bursa Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Dr. Öğretim Üyesi Hacer BİLİR ÖZHAN**.....
Bursa Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Ali MARDANİ AGHABAGLOU.....
Bursa Uludağ Üniversitesi

Prof. Dr. İsa YÜKSEL .....
Bursa Teknik Üniversitesi

Savunma Tarihi : 22 Temmuz 2019

FBE Müdürü : **Doç. Dr. Murat ERTAŞ** .....
Bursa Teknik Üniversitesi ...../...../.....

İNTİHAL BEYANI

Bu tezde görsel, işitsel ve yazılı biçimde sunulan tüm bilgi ve sonuçların akademik ve etik kurallara uyularak tarafımdan elde edildiğini, tez içinde yer alan ancak bu çalışmaya özgü olmayan tüm sonuç ve bilgileri tezde kaynak göstererek belgelediğimi, aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim.

Öğrencinin Adı Soyadı: Musa YILDIRIM

İmzası :

ÖNSÖZ

Danışman hocam Sayın Dr. Öğretim Üyesi Hacer BİLİR ÖZHAN'a yüksek lisans sürecim boyunca bana sağladığı olanaklardan ve gece gündüz demeden bana kattığı bilgi ve öğretilerden dolayı sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Mikrobiyolojik katkının hazırlanmasında destek olan Prof. Dr. Hamdi ÖĞÜT ve Araştırma Görevlisi Hilal GİRGİN' e teşekkür ederim.

Tez aşaması boyunca verdikleri manevi ve teknik desteklerinden dolayı çok kıymetli dostlarım Tolgahan KESKİN, Samet Selçuk GÜNDÜZALP ve Şerif BALLI' ya teşekkür ederim. Deneysel süreç boyunca verdiği destekten dolayı Araştırma Görevlisi Cavit Çağatay KIZILTEPE' ye teşekkür ederim.

Hayatımın her döneminde hayallerimi gerçekleşmek için yanımda olan, eksikliklerini hiçbir zaman hissettirmeyen başta kardeşim Emine YILDIRIM, annem Ayşe YILDIRIM ve babam Recep Baki YILDIRIM olmak üzere aileme sonsuz teşekkür ederim.

Temmuz 2019 Musa YILDIRIM

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ ..... **v**
İÇİNDEKİLER ..... **vi**
KISALTMALAR ..... **viii**
SEMBOLLER ..... **ix**
ÇİZELGE LİSTESİ ..... **x**
ŞEKİL LİSTESİ ..... **xi**
ÖZET ..... **xiii**
SUMMARY ..... **xiv**
1.GİRİŞ **1**
1.1 Mikrobiyal Yöntemle Kalsiyum Karbonat Çökelmesi (MICP) 3
2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR **8**
3. MATERYAL VE METOT **16**
3.1 Malzemeler 16
3.1.1 Çimento 16
3.2.2 Agrega 16
3.2.3 Su 17
3.2.4 Bakteri 17
3.2.5 Kimyasallar 18
3.2 Metot 19
3.2.1 Beton karışımlarının hazırlanması 19
3.2.1.1 TS 802 standardına göre yapılan beton karışım hesabı 19
3.2.1.2 Bir metreküp beton için karışım hesap değerlerinin belirlenmesi 23
3.2.1.3 Numunelerin hazırlanması ve kür işlemi 24
3.2.2 Basınç dayanım deneyi 32
3.2.2.1 Deneyin kapsamı 32
3.2.2.2 Deneyin yapılışı 32
3.2.3 Su emme deneyi 33
3.2.3.1 Deneyin kapsamı 33
3.2.3.2 Deneyin yapılışı 33
3.2.4 Kapiler su emme deneyi 35
3.2.4.1 Deneyin kapsamı 35
3.2.4.2 Deneyin yapılışı 35
3.2.5 Yüksek sıcaklık deneyi 36
3.2.5.1 Deneyin kapsamı 36
3.2.5.2 Deneyin yapılışı 37
3.2.6 Aside dayanıklılık deneyi 37
3.2.6.1 Deneyin kapsamı 37
3.2.6.2 Deneyin yapılışı 37
3.2.7 $CaCO_3$ oluşumuyla çatlak kapanması 38
3.2.7.1 Deneyin kapsamı 38

3.2.7.2 Deneyin yapılışı 38
4.BULGULAR VE TARTIŞMA 40
4.1 Basınç Dayanımı 40
4.2 Su Emme Oranı 43
4.2.1 Ağırlıkça su emme oranı 44
4.2.2 Hacimce su emme oranı 44
4.3 Kapiler Su Emme Oranı 46
4.4 Yüksek Sıcaklık Deneyi 51
4.5. Asit Dayanıklılık Deneyi 56
4.6.Mikrobiyal Kalsitleşme Etkisiyle Beton Çatlaklarının Kapatılması 60
5.SONUÇ VE ÖNERİLER 63
5.1 Deneysel Süreç Sonunda Ulaşılan Sonuçlar 63
5.2 Öneriler 65
KAYNAKLAR 66
ÖZGEÇMİŞ 70

KISALTMALAR

A : Beton numunesinin su yüzeyine değen taban alanı
BM : Bakteri katkılı karışım
BM-1 : 1 numaralı bakteri katkılı karışım
BM-2 : 2 numaralı bakteri katkılı karışım
BM-3 : 3 numaralı bakteri katkılı karışım
CB : Besili ve bakterili suda kürlenmiş katkısız karışım
K : Kılcallık katsayısı
KK : Kontrol karışımı
KK-1 : 1 numaralı kontrol karışımı
KK-2 : 2 numaralı kontrol karışımı
KK-3 : 3 numaralı kontrol karışımı
MICP : Mikrobiyal indüksiyon yöntemiyle kalsiyum karbonat oluşumu
N : Kılcallık katsayısı
OD : Bakterilerin sudaki bulanıklığını ölçerek yoğunluk tespiti yapan cihaz
Q1 : 1.numunenin ağırlığı
Q2 : 2.numunenin ağırlığı
Q3 : 3.numunenin ağırlığı
SEM : Taramalı elektron mikroskobu
t_d : Son okumanın yapıldığı zaman (dakika)
TS : Türk standardı
D_{max} : En büyük agrega tane çapı
W_{doygun}: Suya doygun ağırlık (g)
W_{kuru} : Kuru ağırlık (g)
W_{su} : Su içindeki ağırlık (g)

SEMBOLLER

δ **:** Özgül ağırlık
℃ **:** Santigrat derece

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 3.1 : Kullanılan çimentonun özellikleri. **16**
Çizelge 3.2 : Agrega en büyük tane büyüklüğü seçiminin yapı boyutuna göre seçimi. **19**
Çizelge 3.3 : Agrega tane büyüklüklerine göre su emme oranları. **22**
Çizelge 3.4 : Kullanılan agrega gruplarının özgül ağırlık değerleri **24**
Çizelge 3.5 : Beton karışım hesabı tablosu..... **24**
Çizelge 3.6 : BM numunelerinin kür suyu içeriği. **31**
Çizelge 4.1 : KK numunelerinin 28 günlük ağırlıkları. **43**
Çizelge 4.2 : BM numunelerinin 28 günlük ağırlıkları..... **44**
Çizelge 4.3 : Numunelerin ağırlık olarak su emme miktarları (%) **44**
Çizelge 4.4 : KK ve BM numunelerinin hacimce su emme yüzdeleri (%). **45**
Çizelge 4.5 : KK numunelerinin kapiler ağırlık sonuçları..... **47**
Çizelge 4.6 : BM numunelerinin kapiler ağırlık sonuçları. **48**
Çizelge 4.7 : KK ve BM numunelerinin yüksek sıcaklık sonrasındaki dayanımları. **52**
Çizelge 4.8 : Asit etkisi maruz kalan numunelerin ağırlık kayıpları. **57**
Çizelge 4.9 : KK ve BM numunelerinin asit deneyinden sonraki basınç dayanımları. **58**

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1 : Çeşitli yapı malzemelerinin üretimi için harcanan enerji miktarları (Pentalla,1997). **1**
Şekil 1.2 : Kendi kendini iyileştiren beton geliştirme yöntemleri (Muhammad ve diğ. 2016). **3**
Şekil 1.3 : Biyomineralizayon oluşturma yöntemleri (Alazhari, 2017)..... **4**
Şekil 1.4 : Bakterinin duvarında oluşan kalsiyum karbonatlaşma süreci. (a) bakteri yapısı, (b) negatif yüklenen bakterinin pozitif yapıları çekmesi, (c) biyomineralizasyon (Seifan ve diğ. 2016). **5**
Şekil 1.5 : $CaCO_3$ üretiminin mühendislikte kullanım alanları (Phillips, 2013). **6**
Şekil 3.1 : Kullanılan bakterinin konsantrasyon hali. **17**
Şekil 3.2 : Besiyer içindeki bakteri numunesi. **18**
Şekil 3.3 : En büyük tane büyüklüğü 16 mm olan agreganın gradasyon eğrisi..... **19**
Şekil 3.4 : Elek analizi deney seti. **20**
Şekil 3.5 : Agregaların etüvde kurutulması. **20**
Şekil 3.6 : S/Ç oranı ile basınç dayanımı arasındaki ilişki. **21**
Şekil 3.7 : 4-8 mm arasındaki tane büyüklüğüne sahip agreganın kuru yüzey doygun hal ve kuru ağırlıkları arasındaki farkı gösteren görsel. **23**
Şekil 3.8 : Deneme numunelerinin taze hali. **25**
Şekil 3.9 : Deneme Karışımlarının kalıp sökümü öncesi ve sonraki görünümü. **25**
Şekil 3.10 : Kullanılan çimento, agrega ve su. **26**
Şekil 3.11 : Döküm öncesi hazırlanan çimento, iri ve ince agregalar. **26**
Şekil 3.12 : Kullanılan betoniyer ve haznesine malzeme dökümü. **27**
Şekil 3.13 : Malzemeler karıştırıldıktan sonraki döküme hazır hale gelmiş beton. .. **28**
Şekil 3.14 : Kullanılan kalıp örneği ve vibratör. **29**
Şekil 3.15 : Betonların kalıplara yerleştirildikten sonraki görünümleri. **29**
Şekil 3.16 : Kalıplardan yeni sökülmüş KK numuneleri. **30**
Şekil 3.17 : Beton karışım suyuna ilave edilen bakteri konsantrasyonu. **30**
Şekil 3.18 : Bakterili karışımların besiyerlerinde küre bırakılmış hali. **31**
Şekil 3.19 : Beton numunelerinin kırım sonrasındaki görüntüleri. **32**
Şekil 3.20 : 300 ton kapasiteli basınç deneyi presi. **33**
Şekil 3.21 : Beton numunelerinin sudaki ağırlıklarının ölçülmesi. **34**
Şekil 3.22 : Kapiler deneyi yapım aşaması. **35**
Şekil 3.23 : Beton numunelerinin kül fırını içerisindeki yerleşimi. **36**
Şekil 3.24 : Preste çatlaklar oluşturulan numune örneği. **39**
Şekil 4.1 : Bakteri içeren numune (BM) basınç dayanımı deneyi. **40**
Şekil 4.2 : 7 günlük numunelerin basınç dayanımı değerlerinin grafik gösterimi..... **41**
Şekil 4.3 : 28 günlük basınç dayanımı sonuçları. **42**
Şekil 4.4 : KK ve BM numunelerinin özgül ağırlık değerleri. **46**
Şekil 4.5 : BM numunelerinin kapiler su emme deneyi. **47**
Şekil 4.6 : KK numunelerine ait kapiler su emme grafiği. **48**

Şekil 4.7 : BM numunelerine ait kapiler su emme grafiği. **49**
Şekil 4.8 : KK ve BM kapiler su emme grafikleri. **50**
Şekil 4.9 : Yüzeyinde ve gözeneklerinde $CaCO_3$ oluşmuş bir BM örneği. **50**
Şekil 4.10 : Yüzeyinde ve gözeneklerinde CaCO3 oluşmuş bir BM örneği. **51**
Şekil 4.11 : Betonarme çeliği ve betonun yüksek sıcaklık etkisi altındaki davranışı. **52**
Şekil 4.12 : Kül fırınından çıkmış bir numunenin basınç dayanımının ölçülmesi. ... **53**
Şekil 4.13 : Yüksek sıcaklığın numuneler üzerinde yarattığı basınç dayanımı düşüşü. **54**
Şekil 4.14 : Basınç dayanım kaybı yüzdeleri. **54**
Şekil 4.15 : Yüksek sıcaklık etkisine maruz kalmış bir numunenin kırım sonrası rengi. **55**
Şekil 4.16 : Yüksek sıcaklık etkisine maruz kalmış (sol) ve yüksek sıcaklık etkisine maruz bırakılmamış numunenin (sağ) kırım sonrası gözlenebilen renk farkı. ... **55**
Şekil 4.17 : Asit çözeltisi içindeki beton numuneleri. **56**
Şekil 4.18 : Asit etkisine maruz kalmış bir numunenin etüvlenmiş hali. **57**
Şekil 4.19 : KK ve BM numunelerinin ağırlık kaybı yüzdeleri. **58**
Şekil 4.20 : KK ve BM numunelerinin basınç dayanımlarına asit etkisi. **59**
Şekil 4.21 : KK ve BM numunelerindeki asit etkisiyle basınç dayanımı düşüşü. **59**
Şekil 4.22 : Beton yüzeyindeki CaCO3 oluşumları. **61**
Şekil 4.23 : 0,22mm genişliğindeki çatlağın $CaCO_3$ ile kapatılması. **61**
Şekil 4.24 : 0,3 mm genişliğindeki çatlağın $CaCO_3$ ile kapatılması. **62**

MİKROBİYOLOJİK KALSİFİKASYONUN BETON ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ

ÖZET

Bu çalışmada, *Bacillus megaterium* türü bakteri biyolojik katkı olarak kullanılarak, betonda mikrobiyal yöntemlerle kalsiyum karbonat üretimi (MICP) araştırılmıştır. 30×10^5 hücre/ml yoğunluğunda kullanılan bakteri, beton karışım suyuna direkt olarak ilave edilmiştir. 10×10×10 cm boyutlarında küp beton numuneleri üretilmiştir. Bakterinin mikrobiyal enzimleri sayesinde beton içinde $CaCO_3$ oluşturmanın beton özelliklerine etkisi incelenmiştir. Bakterinin beton özelliklerine etkisini belirlemek amacıyla basınç dayanımı, su emme oranı, kapiler su emme oranı, yüksek sıcaklık etkisi ve asite dayanıklılık etkisi deneyleri yapılarak kontrol numuneleriyle kıyaslanmıştır. Buna ilave olarak, betonun mekanik özelliklerine olan etkisinin yanı sıra beton çatlakları ve yüzeyindeki gözenekleri doldurma etkisi de gözlemlenmiştir. Basınç dayanımı presinde yarı çatlak hale getirilen, bakteri katkılı olarak hazırlanmış bir kısım numuneler yine aynı oranda bakteri ve besiyer içeren sıvı içinde bekletilerek kalsiyum karbonat oluşumu sağlanmıştır. Basınç dayanımı deneyinde kullanılmak üzere; su kürü uygulanmış kontrol numuneleri, bakteri ve besiyer içeren sıvıda kürlenmiş kontrol numuneleri, bakteri ve besiyer içeren sıvıda kürlenmiş bakteri katkılı beton numuneleri olmak üzere 3 tip beton numunesi çeşidi üretilmiştir. 7 günlük ve 28 günlük basınç dayanımı sonuçlarında ulaşılan en yüksek basınç dayanımı değeri bakteri katkılı betonda elde edilmiştir. Kontrol numunesine göre 7 günde %5.07, 28 günde %9.54 oranında artış göstermiştir. Bakteri sayesinde üretilen $CaCO_3$, su emme değerlerinin de azalmasını sağlamıştır. 28 günlük ağırlıkça su emme oranında %12,99, hacimce su emme oranında %11.72 oranında azalma göstermiştir. Kapiler su emme deneyinde de olumlu etki gösteren katkı, %50 ye yakın bir şekilde kılcallığı düşürmüştür. Yüksek sıcaklık etkisi deneyinde sıcaklığa karşı da dayanımı arttıran kalsitleşme sonucunda bakterili betonlar kontrol numunelerine kıyasla %13.78 sıcaklıktan daha az etkilenmiştir. Durabilite deneyinde olumlu etki gösteren bakteri, HCL asidine karşı daha fazla dayanım göstermiştir. Asit etkisine maruz kalmış bakterili numunelerin kontrol numunelerine göre basınç dayanımı değeri %40.12 daha yüksek bulunmuştur. $CaCO_3$' ın beton çatlakları kapama özelliğini kullanarak numuneler üzerinde genişliği 0.3 mm olan çatlaklar kapatılmıştır. Beton yüzeyi üzerinde kalsit oluşumları net bir şekilde gözlemlenmiştir.

Anahtar kelimeler: Mikrobiyolojik kalsifikasyon, Bakterili Beton, Çatlak Onarımı, Asit Etkisi.

EFFECT OF MICROBIOLOGICAL CALCIFICATION ON PROPERTIES OF CONCRETE MIXTURE

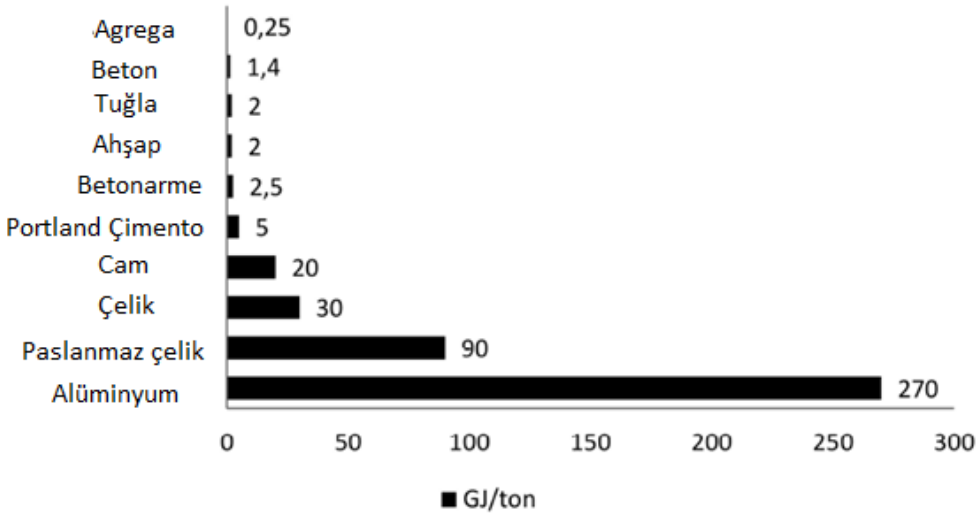
SUMMARY

In this study, microbial induction calcium carbonate production (MICP) method was used and *Bacillus megaterium* was used as biological additives. The bacterium was used at a density of 30×10^5 cells/ml was added directly to the concrete mixing water. 10 ×10 ×10 cm dimensions of cube concrete samples were produced. The effect of $CaCO_3$ formation on the properties of concrete was investigated by using microbial enzymes of bacteria. In order to determine the effect of bacterium on concrete properties, compressive strength, water absorption rate, capillary water absorption rate, fire effect and acid effect test results was compared with that of control samples. In addition to the effect on the mechanical properties of the contaminated concrete, the effect of filling the concrete cracks and pores on the surface was observed. Calcium carbonate formation was ensured by keeping the bacteria added samples which were pre-cracked in the compressive strength press in the same amount of liquid containing bacteria and medium. In compresssşive strenght test; water cured control sample, bacterial and nutrient containing liquid cured control sample, and bacterial and nutrient cures bacterial concrete were used in 3 types. 7-day and 28-day compressive strength results that the highest compressive strength value was obtained in bacterial concrete. Compared to the control sample, it increased 5.07 % in 7 days and 9.54% in 28 days. The $CaCO_3$ produced by the bacteria also reduced the water absorption values. Water absorption rate of 28 days by weight 12.99 %, and 11.72 % by volume reduction in water absorption. The additive, which also had a positive effect in the capillary water absorption test, reduced capillity to close to 50%. In the fire effect test, as a result of calcitization, which increases the resistance against heat, bacterial concretes were affected by 13.78 % less concrete compared to the control samples. Bacteria which showed positive effect in durability test showed more resistance to HCL acid. It was found that the compressive strength results of the bacteria exposed to acid effect were 40.12% higher than the control samples. Using properties of healing the crack by $CaCO_3$, 0.3 mm crack on specimens surface was healed thanks to bacterium. Calcium carbonate formation was clearly observed on surface of concrete specimens.

Keywords: Microbiological Calcification, Bacterial Concrete, Crack healing, Acid Effect.

1.GİRİŞ

Beton; ekonomi, yüksek durabilite, estetik kaygıları karşılayabilme, yapısının kendi içinde tutarlı ve basınç dayanımın yüksek olması gibi sebeplerle en çok tercih edilen bir yapı malzemesidir. Teknik boyutunun yanında çevresel ve ekonomik boyutları da çok önemlidir. Beton üretim süreci içerisinde ve sonucunda CO_2 gazı çıkışı gözlenen bir malzemedir. Bir malzemenin çevreci olup olmadığına üretiminde harcanan enerji miktarına bakılarak bilgi sahibi olunabilir. Şekil 1.1' de çeşitli yapı malzemelerinin üretiminde harcanan enerji miktarları gösterilmiştir. Şekil 1.1'de görüldüğü üzere 1 ton betonarme üretmek için harcanan enerji 2.5 gigajoules iken bu değer 1 ton çimentoda 5 gigajoules'e kadar çıkmıştır. Bu şekle bakarak çevre sorunlarında asıl aktörün beton değil çimento olduğu sonucuna ulaşılabilir. Çimentonun beton içindeki kullanım oranı incelenmelidir.



Şekil 1.1 : Çeşitli yapı malzemelerinin üretimi için harcanan enerji miktarları (Pentalla,1997).

Betondan salınan CO_2 miktarının %74-%80 arasında bir değeri portland çimentodan kaynaklanmaktadır. Total beton CO_2 emisyonunun sadece %13-%20 arasındaki değeri agregalardan kaynaklanmaktadır. Bu emisyon değerinin kaynağı ise bu süreçte kullanılan iri agregaların taşınma ve üretim sürecinde kullanılan makinelerin harcadığı fosil yakıtlardır. İnce agregaların bu süreçte kayda değer bir etkisi bulunmamaktadır.

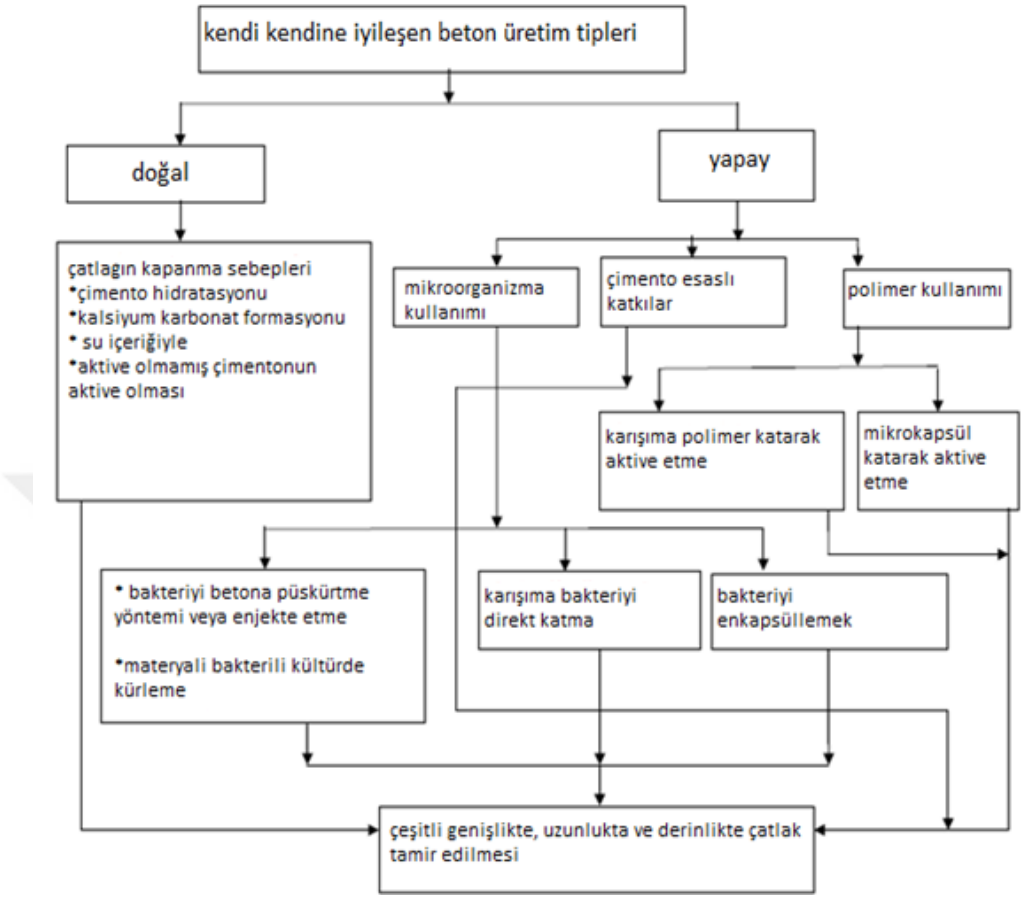
Çünkü malzeme genellikle hazır şekilde kullanıma uygun şekilde temin edilmektedir (Flower,2007; Faresin,2012). Beton üretim sürecinde hemen hemen her aşamada CO_2 gazı ortaya çıkmaktadır. Çimento üretimi sırasında açığa çıkan yüksek sıcaklık, toz, toksin ve alerjik kimyasallar ve ağır metaller de çevreye ve çevredeki canlılara ciddi zararlar vermektedir. Bunun yanında çimentoyla birlikte, akrilamid, epoksi, poliüretan gibi çimento esaslı tamir malzemeleri de çevreye zarar veren maddeler arasında yer almaktadır. Üretilen çimentonun bileşenleri yüksek miktarda mangan (Mn), magnezyum (Mg), titanyum dioksit (TiO_2) gibi maddeler içermektedir.

Çimento endüstrisi, başta kadmiyum (Cd), krom (Cr), bakır (Cu), civa (Hg), kurşun (Pb), selenyum (Se), çinko (Zn) gibi benzer birçok ağır metal atığının doğaya salınmasına ve çevre kirliliği oluşmasına yol açmaktadır (Marlowe ve Mansfield, 2002; ÇED Rehberi, 2009). Bu zehirli kimyasal maddeler akarsulara ve yeraltı kaynaklarına karışarak beklenilenden daha geniş bir çapta etki gösterir. Bunun yanı sıra topraktaki yararlı mineralleri ve yaşayan canlıları da etkileyerek yok olmalarına sebep olur.

Beton servis ömrü boyunca birçok dış etkiye maruz kalır. Bu etkiler beton üzerinde çatlaklar (yapısal ve yapısal olmayan), dökülmeler, ayrışmalar yaratır. Bunun için tamire ihtiyaç duyulur. Tamir işlemleri gelişmiş yapılarda oldukça masraflıdır. ABD' de yıllık tamir işlemlerine harcanan miktar 18 ile 21 milyar dolar aralığındayken (Emmons, 2006) bu durum Avrupa'nın harcadığı yıllık inşaat bütçe miktarının %50' si oranında olmaktadır. (Alazhari, 2017). Kullanılan tamir malzemelerinin çoğu çimento esaslı olup, maliyetleri çimentodan daha fazladır.

Bu etkilere karşı koyabilmek adına da yenilenebilir ve iyileşebilen bir beton ihtiyacı doğmuştur. Mikro düzeyde başlayan çatlaklara başlangıçta yapılan müdahaleyle, basınç dayanım değerlerinin ve geçirgenlik özelliklerini de arttırarak betonarme yapı içerisindeki donatının korozyona uğraması önlenmiş olunur. Bu yolla inşa edilen yapılar daha az tamir masrafıyla daha uzun servis ömrü sunarak uzun vadede daha az beton kullanımını sağlayacaktır. Çevreye zararsız yapısı ve ekonomik olmaları sebebiyle mikroorganizmalar, katkı olarak beton içerisinde kullanılmaya başlanmıştır. Çünkü bakteri katkılı betonlar kullanılarak gerçekleştirilen mikrobiyolojik kalsifikasyon (MICP) ile betonun mekanik, fiziksel ve kimyasal özellikleri geliştirilebilir. Bunun yanı sıra çatlak kapamada da geniş bir kullanım alanları oluşmuştur. Bu yöntemle yapılan çalışmaların sayısı da hızla artmaktadır. Şekil 1.2'

de mikroorganizmaların kendi kendine iyileşen beton içindeki yeri ve diğer iyileştirme yöntemleri sınıflandırılmıştır.



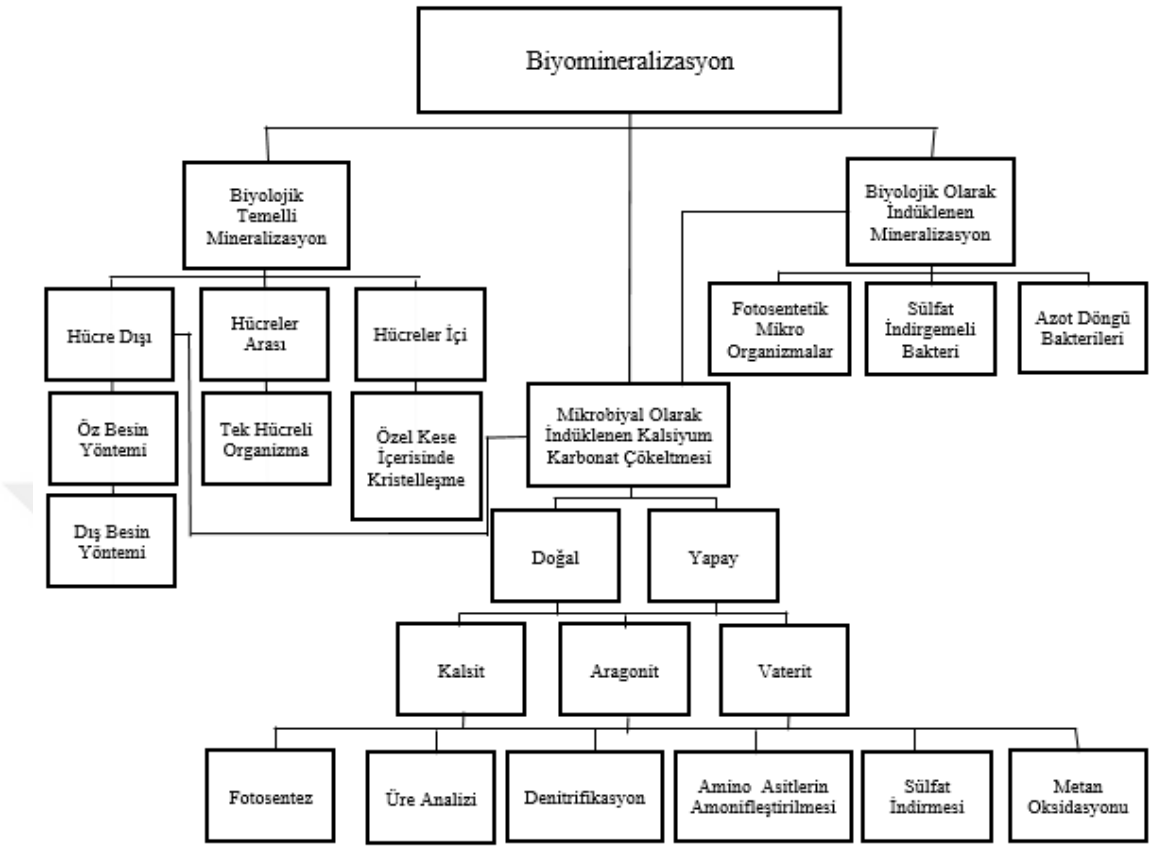
Şekil 1.2 : Kendi kendini iyileştiren beton geliştirme yöntemleri (Muhammad ve diğ. 2016).

1.1 Mikrobiyal Yöntemle Kalsiyum Karbonat Çökelmesi (MICP)

Kalsiyum karbonat ($CaCO_3$), mikrobiyal aktiviteler yardımıyla hem doğal ortamda hem de yapay şekilde üretilebilen oldukça katı olan bir bileşiktir. Bu bileşik inşaat mühendisliği içinde önemli bir yer tutar. Çünkü çimentonun yapısı büyük çoğunlukta kalker ve kilden oluşmaktadır. Çimentoyu oluşturan kalkerin ise %90'ı $CaCO_3$'tır. Bu nedenle toplamda çimento bileşenin %65-70'ini $CaCO_3$ (kalsiyum karbonat) oluştururken, geri kalan kısmını ise kil bileşenleri oluşturur.

Mikrobiyal $CaCO_3$ oluşumu, yaygın olarak toprak, su ve deniz çökeltilerinde görülen bir oluşumdur (Cura ve diğ. 2001). Şekil 1.3' de biyomineralizasyon oluşum yolları gösterilmiştir. MICP beş önemli faktör tarafından yönetilen basit bir biyo-kimyasal süreçtir. Bu beş önemli faktör; kalsiyum konsantrasyonu, çözünmüş inorganik karbon

konsantrasyonu, pH, çekirdeklenme alanlarının ulaşılabilirliği ve nikel içeren metalo enzim; üreaz'dır (Candoğan, 2015).



Şekil 1.3 : Biyomineralizayon oluşturma yöntemleri (Alazhari, 2017).

Mikrobiyal kalsit oluşumu farklı yollarla oluşturulabilir;

- Foto sentetik mikroorganizmalar tarafından gerçekleştirilen siyanobakteriyel fotosentez,
- Sülfat indirgeyen bakteriler tarafından sülfat indirgenmesi
- Nitrat indirgeyen bakteriler tarafından denitrifikasyon
- Amonifikasyon
- Ürolitik bakteriler tarafından gerçekleştirilen üre hidrolizi (Achal ve diğ. 2013)

Bakterinin $CaCO_3$ üretimi için yaptığı kimyasal tepkime denklemlerle gösterilmektedir.

Denklem 1.1' de görüldüğü üzere üre, alkolofilik mikroorganizma tarafından üretilen üreaz enzimi ile biyokimyasal reaksiyona girerek 1 mol NH_3 (amonyak) ve 1 mol NH_2COOH (karbamik asit) oluşturmuştur.

Denklem 1.2’ de görüldüğü gibi bu maddeler ise kendiliğinden 1 mol NH_3 ve 1 mol karbonik asite (H_2CO_3) dönüşmüştür.

Denklem 1.3’ de ise çıkan ürünler, kolay ayrışabilen bir yapıya sahiptir. Bu nedenle H_2CO_3, HCO_3 ve H^+ iyonlarına ayrışmıştır.

Denklem 1.4’ de görülen 2 mol NH_3 ise su ile birleşerek 2 mol NH_4 (amonyum) ve 2 mol OH^- (hidroksit)’e ayrışmaktadır.

Denklem 1.5 ve Denklem 1.6’ da görülen son tepkime sonucunda ise bakteri pH yükselmesiyle birlikte eksi yüklenir ve etrafına Ca^{+2} yapısını çeker. Bunun sonucunda da Ca^{2+} iyonu ile CO_3^{2-} iyonu birleşerek kalsit yapısını oluştururlar (Hall-stoodley ve diğ. 2004). Bu sürece biyomineralizyon da denir.

$$CO(NH_2)_2 + H_2O \rightarrow NH_2COOH + NH_3 \quad (1.1)$$

$$NH_2COOH + H_2O \leftrightarrow NH_3 + H_2CO_3 \quad (1.2)$$

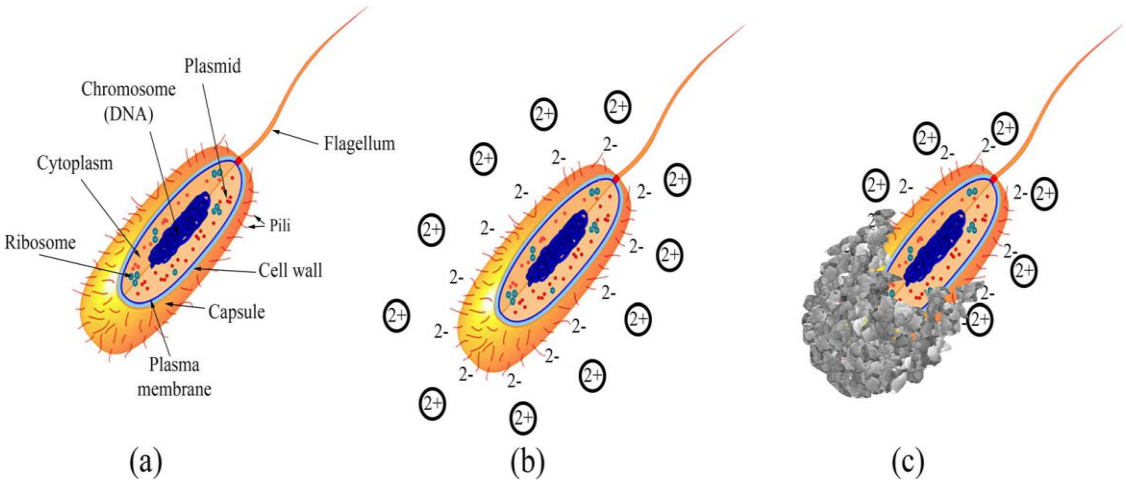
$$H_2CO_3 \leftrightarrow HCO_3 + H^+ \quad (1.3)$$

$$2NH_3 + 2\,H_2O \leftrightarrow 2NH_4^+ + 2\,OH^- \quad (1.4)$$

$$Ca^{+2} + \text{Hücre} \rightarrow \text{Hücre} - Ca^{2+} \quad (1.5)$$

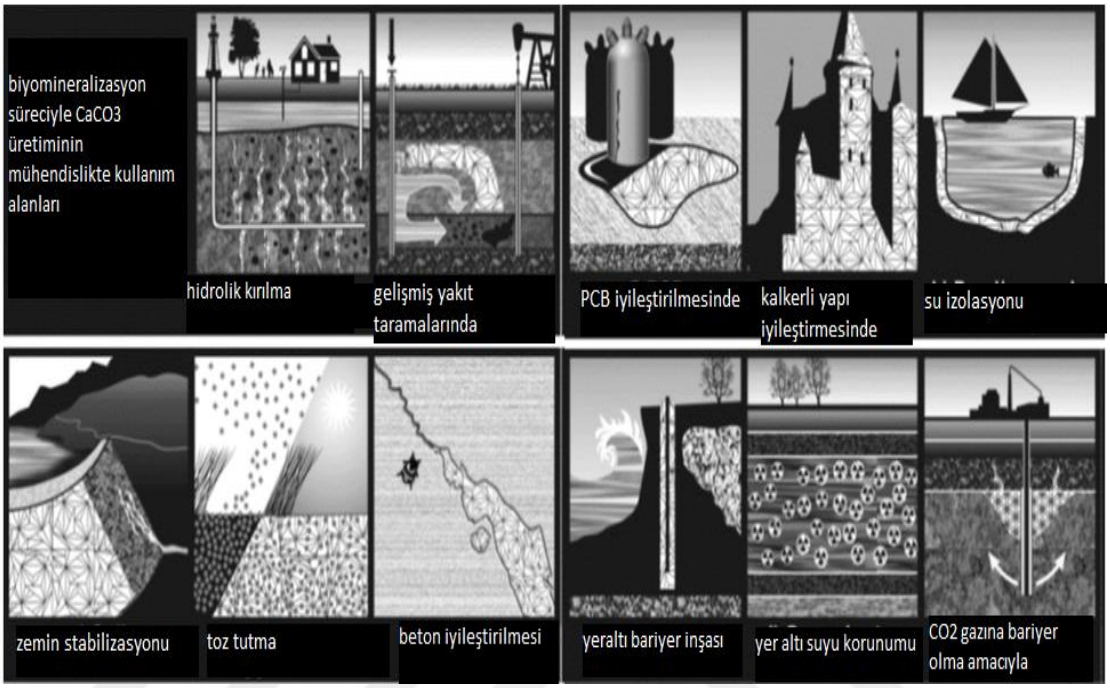
$$\text{Hücre} - Ca^{2+} + CO_3^{2-} \rightarrow \text{Hücre} - CaCO_3 \quad (1.6)$$

Şekil 1.4’de bakterilerin negatif yüklenmesi ve bunun etkisiyle bakteri duvarlarında Ca^{2+} toplanması görsellenmiştir. Toplanan bu kalsiyumlar karbonat yapısıyla birleşerek istenen nihai ürün oluşmaktadır.



Şekil 1.4 : Bakterinin duvarında oluşan kalsiyum karbonatlaşma süreci. (a) bakteri yapısı, (b) negatif yüklenen bakterinin pozitif yapıları çekmesi, (c) biyomineralizasyon (Seifan ve diğ. 2016).

MICP teknolojisiyle meydana getirilen kalsiyum karbonatın sağladığı faydalar nedeniyle inşaat mühendisliği dalında oldukça geniş bir kullanım alanı vardır. Şekil 1.5' de bakteriler sayesinde kalsiyum karbonat oluşumunun mühendislik uygulamalarındaki çeşitliliği görülmektedir.



Şekil 1.5 : $CaCO_3$ üretiminin mühendislikte kullanım alanları (Phillips, 2013).

Son yıllarda oldukça gelişmekte olan MICP süreciyle yakından ilişkili olan bu çalışmada bakterili beton ve bakterili besiyer üretilerek çeşitli kıstaslarda test edilecektir. Bu çalışmanın temel amacı, beton numunelerinin içinde biyolojik bir katkı olan bakteriyi kullanarak betonun mekanik ve yapısal özellikleri üzerindeki etkilerinin gözlemlenmesidir.

Bu çalışmada ilk olarak numune üretimi gerçekleşmiştir. Kontrol karışımları (KK) ve Bakterili karışımlar (BM) olmak üzere deneylerde kullanılacak 10 ×10 ×10 cm'lik küp beton numuneleri üretilmiştir ve deneysel süreç başlatılmıştır.

Hazırlanan çalışma; karışımların üretilmesi, basınç dayanımlarının ölçülmesi, su emme ve kapilerite değerlerinin ölçülmesi, asit etkisi ve yüksek sıcaklık etkisinin incelenmesi ve kalsiyum karbonatın beton çatlaklarında oluşumunu gözlemlemek olmak üzere 6 ayrı deneysel bölüme ayrılmıştır. Bu bölümler deneyler kısmında detaylı şekilde açıklanmıştır.

Tez çalışmasından hedeflenen ana maddeler şu şekildedir;

1- MICP teknolojisini beton içinde uygulamak.
2- Uygulanan bakteri sayesinde oluşan kalsiti gözlemleyebilmek.
3- Betonda oluşturulan çatlakları kalsitleşme sonucu kapamak
4- 28 günlük beton basınç dayanımlarını geliştirmek.
5- Kalsitleşme sonucu betonun yüksek sıcaklığa karşı dayanımlarını arttırmak.
6- Bakteri katkısı sayesinde betonun aside dayanımını ve durabilite değerlerini arttırmak.
7- Kalsitleşme sonucunda su emme ve kapiler su emme oranları azaltmak.

2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Andalib ve diğ. (2016), beton numunelerinde kullanılacak olan *Bacillus Megaterium* adlı bakterinin optimum konsantrasyon değerinin belirlenmesine yönelik çalışma yapmışlardır. İlk aşamada C35 beton sınıfı dizayn edilerek basınç dayanımları değerleri üzerinden 10^3, 10^5 ve 10^7 hücre/ml yoğunluktaki konsantrasyonları kıyaslamışlardır. 7, 14, 28, 60 günlük basınç dayanımı değerlerinin karşılaştırmasında, hepsinde en yüksek sonuçlara 10^5 hücre/ml konsantrasyonunda ulaşılmıştır. Çalışmanın ikinci aşamasında 10^5 hücre/ml değerinin hangi oranda kullanılması gerektiği incelenmiştir. Beş farklı hücre konsantrasyonu kullanılan çalışmanın bu bölümünde 7, 14, 28, 60 günlük numuneler hazırlanarak basınç dayanımları numuneler arasında kıyaslanmıştır. Bu kıyaslama sonucunda en verimli sonuç, 30×10^5 hücre/ml konsantrasyonunda elde edilmiştir. Çalışmanın son bölümünde ise bulunan bu değerin hangi beton sınıfında en efektif olacağını incelemişlerdir. Buna istinaden 30, 35, 40, 45, 50 MPa basınç dayanımlarında betonlar üretilerek kıyaslanmıştır. Bu kıyaslama sonucunda en yüksek etkiyi, 120 günün sonunda basınç dayanımında %24 lük bir artış gözlemlenen 50 MPa dayanımına sahip beton numune olarak gözlemlemişlerdir. Çalışma sonucunda SEM ve EDS yöntemleri ile bakterinin etkisini fiziksel olarak da göstermişlerdir.

Krishnapriya ve diğ. (2015), yapmış oldukları çalışmada bakterilerin kalsifikasyon özelliklerini kullanarak çatlakları iyileştirme ve basınç dayanımlarını arttırma özelliklerini incelemişlerdir. Çalışmalarında kullanılan bakteriler; *Bacillus megaterium BSKAU, Bacillus Licheniformis BSKNAU* and *Bacillus Flexus BSKNAU* türü bakterilerdir. İlk olarak basınç dayanımlarının belirlemesi amacıyla 28 günlük dayanımı 25 MPa olan 150 × 150 × 150 mm boyutlarında beton numuneler hazırlamışlar ve beton karışım suyuna bakteri konsantrasyonlarını ayrı ayrı ilave etmişlerdir. Dökümünü gerçekleştirdikleri numuneleri nemli ortamda muhafaza edilerek su kürüne bırakmışlardır. En yüksek basınç dayanım artışını %16,1'lik oran ile *Bacillus Megaturium* katkılı betonda belirlemişlerdir. Mikro düzeydeki çatlakların iyileştirilmesiyle ilgili olarak, haftalık kalsit oluşumu gözle tespit edilen numunelerin

10 hafta sonucunda çatlaklarında kapanmanın olduğunu gözlemlemişlerdir. 81 gün sonucunda ise bazı ince çatlakların tamamen kapandığı ve bakterilerin çatlak iyileştirme işlemini başarıyla yapabildiği sonucuna ulaşmışlardır.

Reddy V ve diğ. (2012), çalışmalarında *Bacillus Subtilis JC3* cinsi bakteri kullanarak beton numuneleri üzerindeki basınç dayanımı ve durabililiteye olan etkilerini incelemişlerdir. İlk olarak bakteri hücre konsatrasyonun belirlenmesi amacıyla farklı konsantrasyonlarda 100 x 100 x 100 mm küp beton numuneleri üretilmiştir. Daha sonrasında adi, standart ve iyi derecelendirilmiş betonlar üretilerek basınç dayanımları kıyaslanmıştır. Daha önceki yapılan çalışmalara benzer olarak bu çalışmada da iyi derecelendirilmiş yani yüksek beton dayanıma sahip betonlarda bakteri etkisini daha çarpıcı şekilde göstermiştir. Üretilen tüm betonlardaki dayanım artışları ortalama olarak alındığında ise basınç dayanımının %23 oranında arttığını tespit etmişlerdir. Çalışmalarının ikinci aşamasında ise durabilite etkileri gözlemlenmiştir. Bu amaçla üretilen beton numunleri %5 oranında sülfirik asit (H_2SO_4) ve hidroklorik asit içeren sıvı içinde bekletilmiştir. Asitten çıkarılan numunelerin ağırlıkları ve basınç dayanımları ölçülerek, tüm bakterili numunelerin kontrol numunelerine göre ağırlıkları ve basınç dayanımları daha yüksek çıktığı belirlenmiştir. Bu şekilde bakterinin durabiliteye etkisini gözlemlemişlerdir.

El-Enein ve diğ. (2013), *Sporosarcina Pasteurii* isimli bakteri katkılı harç numuneleri üreterek basınç dayanımı ve su emme kapasitesi üzerindeki etkisini gözlemleyen çalışma yapmışlardır. Hazırlanacak harç numunelerin karışım suyuna OD (bakterinin yoğunluğunu tespit edilmesine yarayan cihaz) değerlerine göre bakteri ilave edilmiştir. Kontrol harç numunesi, 0.5 OD bakterili, 1 OD bakterili ve 1.5 OD bakterili karışımlar hazırlanarak numuneleri kıyaslamışlardır. İlk olarak 28 günlük basınç dayanımları sonuçlarında, 1 OD li karışımda %33 lük maksimum artış oranını gözlemlerlerken, su emme etkisinde ise en tesirli etkiye 1.5 OD li karışımda ulaşmışlardır. Çalışmanın sonucunda ise kalsitleşmeye gösterilmesi gereken öneme ve SEM görüntülerine yer verilmiştir. SEM görüntülerinde ise 0.5 OD karışımlarında daha küçük kalsitleşmelerin olduğu ancak 1.5 OD li karışımlarda ise daha büyük $CaCO_3$ bileşimini gözlemlemişlerdir.

Vijay ve diğ. (2017), bakterili kendi kendine iyileşebilir betonun genel özelliklerini ve iyileştirme yapısını içeren bir literatür taraması yapmışlardır. İlk olarak bakterinin kalsitleşme sürecinin nasıl gerçekleştiğine dair kimyasal ve fiziksel araştırmaları

özetlemişlerdir. Bugüne kadar yapılan bakteri cinslerinin hangi oranda kullandığını ve bu bakterilerin hangi beton özelliğine ne oranda etki ettiğini içeren bir tablo oluşturmuşlardır.

Vekariya ve Pitroda (2013), çalışmalarında beton çatlaklarının MICP teknolojsiyle (beton içinde mikroorganizma kullanarak kalsiyum karbonat üretilmesini sağlayan sistem) kapatılma sürecini araştırmışlardır. Çalışmada ilk olarak, bakterilerin sınıflandırılma ve türleri, sonrasında ise bakterilerin çatlak kapamasında hangi kimyasal süreçlerden geçtiğini formül ve şekillerle açıklamışlardır. Ayrıca hangi bakterilerin, hangi tür uygulamalarda kullanılmasının uygun olduğunu gösteren tabloya da çalışmalarında yer vermişlerdir.

Seifan ve diğ. (2016) , bakteri katkılı betonları inceleyen kapsamlı bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Biyolojik betonun; ekonomik, çevresel ve yenilenebilirlik açısından önemine dikkat çekmişlerdir. Ardından kalsiyum karbonatlaşma süreci anlatılarak bu sürecin beton çatlaklarını gidermenin ve daha dayanıklı bir beton üretmenin akılcı bir çözümü olduğunu belirtmişlerdir. Yenilenebilir beton için bakteri kullanımının vasküler (kılcal yollar oluşturma sistemi), katkı olarak beton içinde kullanma ve enkapsülleme (bakterinin etrafında kapsül oluşturarak koruma sistemi) gibi üç ayrı yöntemle yapılabileceğini açıklamışlardır. *Bacillus sphaericus, S. Pasteurii, Bacillus Cohnii, Bacillus Pseudofirmus* ve *Diaphorobacter Nitroreducens* cinsi bakterilerin beton katkı maddesi olarak kullanıldığında basınç dayanımı, geçirgenlik ve su emme deneylerine verdiği pozitif ve negatif etkileri tablo halinde sunmuşlardır.

Achal ve diğ. (2013), yaptıkları çalışmada *Bacillus SP* türü bakteri kullanarak 70.6 x 70.6 x 70.6 mm boyutlarında küp harç numuneleri üreterek biyolojik katkı olan bakterinin durabilite özelliklerine katkısını ve çatlak iyileştirme özelliğini test etmişlerdir. Üretilen numuneler besiyer, üre ve $CaCl_2$ karışımdan oluşan bir sıvıda kürlenmiştir. Yapılan deneyler sonucunda harç numunelerinde %50, klor geçirgenliğinde de kayda değer bir azalmanın olduğunu saptamışlardır. Ayrıca numuneler üzerinde oluşturulan yapay çatlakların bakteri etkisiyle başarıyla kapandığı sonucunu da gözlemlemişlerdir. Bakterili harç numunelerinin basınç dayanımı değerlerini kontrol numunelerine kıyasla %40 daha yüksek olarak elde etmişlerdir. Çalışmalarının sonucunda bakterilerin, basınç dayanımı arttırması ve çatlakları

kapaması sebebiyle beton sektöründe yaygın bir kullanıma ulaşabileceği görüşüne yer verilmiştir.

Meera ve Subha (2007), biyolojik beton özelliklerini inceleyen çalışmalarında, *Bacillus Subtilis* cinsi bakterisinin betonun durabilite ve mekanik özelliklerine etkisini incelemişlerdir. Deney süreçlerinde 15×15×15 cm boyutlarında küp numuneler ve 20×10×10 cm boyutlarında silindir numuneler kullanılmıştır. 7 ve 28 gün sonunda çekme ve basınç dayanımı sonuçlarına bakılmıştır. 10^5 hücre/ml bakterili karışımın değerlerinde basınç dayanımı %42, çekme dayanımı değeri ise %62 daha fazla çıkmıştır. Diğer numunelerle ise 28 gün kür sonucunda su emme, klor geçirgenliği ve aside karşı gösterdiği dayanımı incelemişlerdir. Çalışmalarının sonucunda, su emme ve klor geçirgenliği daha düşük çıkan bakterili betonların, aside karşıda daha az kütle kaybederek daha dayanımlı olduklarını göstermişlerdir.

Bhavana ve diğ. (2014), yaptıkları çalışmada mikrobiyolojik yöntemle mikro çatlakları kapatmayı hedeflemişlerdir. Beton karışım suyu içerisine *Bacillus Subtilis* türünde 10^5 hücre/ml oranında bakteri ilave edilerek 3,7 ve 28 günlük basınç, eğilme ve çekme dayanım değerlerine bakmışlardır. Ayrıca çalışmanın bir bölümünde çimento miktarının ağırlık olarak %10 ve %30'u oranında çimento yerine uçucu kül ilave etmişlerdir. En yüksek basınç dayanımı değerlerine %10 uçucu kül içeren karışımlarda ulaşmışlardır.

Chahala ve.Siddique (2013), yaptıkları çalışmada yenilenebilir beton elde etmek amacıyla *Sporosarcina Pasteurii* türü bakteri kullanarak üretilen betonların üzerlerinde oluşturulan çatlakların kapanıp kapanmama durumunu incelemişlerdir. Beton karışımı içine, çimento miktarının %10, %20 ve %30 oranında çimento çıkartılarak aynı oranda uçucu kül ilave etmişlerdir. Aynı işlem %5 ve %10 oranında çimento yerine silis dumanı içinde uygulanmıştır. Bakteri oranlarını ise 10^3, 10^5 ve 10^7 hücre/ml olarak belirleyerek su emme, porozite, klor geçirgenliği ve basınç dayanımı değerlerini araştırmışlardır. Tüm uçucu kül ve silis dumanlı karışımlarda bakterili karışımlarının basınç dayanımını arttırdığı, geçirgenliği ve boşluk oranını azalttığı sonucuna ulaşmışlardır.

Ingle ve diğ. (2017), çalışmalarında *Sporosarcina Pasteurii* türünde bakterili beton ve beton içinde yerel bir atık maddesi olan pirinç tozu kullanımının etkisini gözlemlemişlerdir. Çimento miktarının %2, %4 ve %6 sı oranında çimento yerine

pirinç tozunu beton karışımına ilave etmişlerdir. 10^3, 10^5 ve 10^7 hücre/ml konsantrasyonunda bakteri karışımlı betonlar üreten araştırmacılar, basınç dayanımında artış gözlemlerken geçirgenlik ve porozite oranlarında ise düşüş gözlemlemişlerdir. Ayrıca karışımlara bakteri ilave edilmesiyle tüm bakteri konsantrasyonlarında beton numunelerinin durabilite özelliklerinde artış gözlemlenmiştir.

Ganesh ve Siddiraju (2016), çalışmalarında kalsiyum laktat ve *Sporosarcina Pasteurii* türü bakteriyi beraber kullanarak beton çatlaklarını kapatmayı hedeflemişlerdir. Beton içeriğinde çimento miktarının %5 ve %10 oranında kalsiyum laktat yer değiştirilerek numuneler hazırlamışlardır. C40 beton sınıfını hedef beton sınıfı olarak seçerlerken, elastisite modülü, eğilme mukavemeti ve basınç dayanımı değerlerini ölçmüşlerdir. Basınç dayanımı değerlerinde 10×10×10 cm boyutlarında küp numuneler kullanılmıştır. 7 ve 28 günlük basınç dayanım değerlerinde en yüksek dayanım değerinin %10 kalsiyum laktat kullanılan karışımlarda elde edildiği sonucuna ulaşmışlardır.

Khaliq ve Ehsan (2016), yaptıkları çalışmada bakterilerin yapıyı kendi kendine iyileştirme ve çatlakların onarımına etkisini incelemişlerdir. Çalışma boyunca *B. Subtilis* türü bakteri kullanılmıştır. Bakteri 2.8×10^8 hücre/cm^3 yoğunluğunda beton karışımlarına ilave edilmiştir. 3, 7, 14 ve 28 gün kadar küre maruz bırakılan numunelerin üzerlerinde, belli bir basınçta yüke maruz bırakmak suretiyle mikro çatlaklar oluşturmuşlardır. Daha sonra bu çatlakların kalsitleşme sonucunda nasıl bir kapanma süreci izlediğini SEM aracılığıyla gözlemlemişlerdir. Farklı günlerde oluşturulan çatlakların milimetre cinsinden kapanma seviyelerini kıyaslamışlardır. Beton içinde bu süreçte oluşan $CaCO_3$ miktarını özel tekniklerle ölçmüşler ve son aşama olarak ise 3,7,14 ve 28 gündeki basınç dayanım değerlerini kıyaslamışlardır.

Parmar ve diğ. (2013), çalışmalarında *Bacillus Sphaericus* türü bakteri kullanmışlardır. Bu bakteri türünün beton basınç dayanımı, durabilite değerlerini ve çatlak kapama özelliğini incelemişlerdir. Basınç dayanımı değerlerinde, bakteri katkılı betonlarda kontrol numunelerine göre 7 gün sonucunda % 16.4, 28 gün sonunda %17.3 ve 56.gün sonunda %17.6 artış gözlemlemişlerdir. Durabilite değerlerini test edebilmek için $MgSO_4$ çözeltisine numuneleri 28 gün boyunca bırakarak, katkılı betonların daha az ağırlık kaybı yaşadığı sonucuna ulaşmışlardır. Çatlakları kapamak için ise içinde bakteri ve ince kum bulunan özel bir karışım oluşturularak çatlak içine

doldurmuşlar. Doldurulan bu çatlaklar üzerine her 6 saatte bir besi damlatarak bakteriyi beslemişlerdir. Bu işlem 28 gün boyunca tekrarlanarak beton basınç dayanımlarında artış gözlemlenmiştir.

Chithra P ve Varghese (2016), yayınladıkları çalışmada *B. Subtilis* bakteri türünü 10^3, 10^5, 10^7 konsantrasyonlarda mikrobiyolojik beton katkısı olarak kullanarak beton numuneleri üretilmiştir. Ayrıca çalışmalarında, çimentonun %10, %20 ve %30 oranlarında uçucu külle yer değiştirilerek numuneler üretilmiştir. Ultra ses geçiş hızı testi, yarma deneyi, eğilme dayanımı ve basınç dayanımı testleri yapılmıştır. Beton sınıfını C30 olarak seçerek ve 28. ve 56. gün sonunda numuneleri teste tabi tutmuşlardır. Test sonucunda %10 oranında uçucu kül ve 10^5 konsantrasyonunda bakteri katkılı üretilen numunelerin tüm mekanik özelliklere, $CaCO_3$ üretimi sayesinde olumlu yönde daha yüksek sonuçlar verdiği sonucuna ulaşmışlardır.

Rajesh ve Venugopal (2017), Bacillus Subtilis türü bakteri katkı maddesi olarak kullanarak yaptıkları çalışmada adi ve standart derecelendirilmiş iki farklı türde beton numuneleri üretmişlerdir. Daha önceki çalışmalar baz alınarak bakteri yoğunluğunu 105 hücre/ml olarak seçmişlerdir. C20 ve C30 beton sınıfında iki farklı türde 36 adet küp, silindir ve prizma şeklinde beton numuneler elde etmişlerdir. Numuneler üzerinde basınç dayanımı, yarma çekme deneyi ve eğilme deneyi yaparak, bakterinin özellikle mekanik özelliklere olan etkisini gözlemlemişlerdir. Bakterili betonların basınç dayanımında 7 gün sonunda %15.23, 28 günün sonunda ise %14.8 artış elde etmişlerdir. Aynı kıyaslamaları, karışımlara çimento yerine %10 ve %30 oranlarında uçucu kül ilave ederek de yapmışlardır. Bakterili numuneleri uçucu küllü karışımlarla kıyaslamışlardır.

Achal ve diğ. (2011), yaptıkları çalışmada uçucu külle üretilmiş beton numuneleri üzerinde mikrobiyal kalsitleşme oluşturarak basınç dayanım değerlerinin ve durabilite özelliklerini incelemişlerdir. Yapılan çalışma boyunca biyolojik katkı olarak *Bacillus Megaterium* türü bakteri kullanılmıştır. 70.6 × 70.6 ×70.6 mm boyutlarında küp şeklinde çimento harçları hazırlanmıştır. Bakteri harç üretim aşamasında harç içerisine direkt olarak katılmıştır. İçinde 5×10^7 hücre/ml konsantrasyonunda bakteri bulunan numuneler döküm ve kuruma aşamalarının ardından besiyer içeren bir karışım içerisinde kürlenmiştir. Üretilen harçlarda çimentonun %10, %20 ve %40 oranlarında uçucu kül eklenerek farklı numuneler üretmişlerdir. Bu numunelerin basınç dayanımı, su emme ve su geçirmezlik özelliklerini test etmişlerdir. Ayrıca numunelerin

kalsitleşmesi SEM yoluyla gözlemlenmiştir. 28 günlük kür işleminin ardından uçucu kül ilavesiz bakterili betonda %21 oranında basınç dayanımı artışını gözlemişlerdir. %10 uçucu kül içeren bakterili numunelerde %19 oranında, %20 uçucu kül içeren bakterili betonlarda %14 oranında basınç dayanımında artış elde etmişlerdir. %40 uçucu kül ihtiva eden numunelerde ise kıyasla en az artış elde edilerek artış oranı %10 olarak bulunmuştur. Su emme oranlarında ise %10 ve %20 uçucu kül içeren numunelerde 3.5 kat kadar azalma saptanmıştır. %40 uçucu kül içeren numunelerde ise su emme 2 kat daha azdır.

Andalib ve diğ. (2014), yaptıkları çalışmada mikrobiyal yöntemle kalsit oluşturmanın betonun durabilitesini arttırdığını kanıtlamak adına deneyler yapmışlardır. 30×10^5 hücre/ml yoğunluğunda bakteri kullanılan ve C40, C45, C50 derecelendirilmiş beton numunelerini üretmişlerdir. Üretilen bakterili numunelerin durabiliteye etkisini belirlemek amacıyla iki tür aside (H_2SO_4 ve HCI) 60, 90 ve 120 gün boyunca maruz bırakmışlardır. Sonrasında mikroorganizmaların basınç dayanımına etkisini ölçerek, 30 x 10^5 hücre/ml yoğunluğunda en yüksek basınç dayanımı elde edilerek 3gün sonunda %4.90, 7 gün sonunda %6.82, 14 gün sonunda %9.26, 28 günün sonunda %9.77 ve 60 gün sonunda %12.60 oranında artış saptamışlardır. Bakteri içeren numunelerin daha az ağırlık kaybı yaşadığını ve durabilitesinin daha yüksek olduğunu vurgulamışlardır.

Chahal ve diğ. (2012), *Sporoscarcina Pasteurii* türü bakteri türünü beton numunelerinde katkı olarak kullanarak bakterinin basınç dayanımına ve hızlı klor geçirimliği değerlerine etkisini incelemişlerdir. Bakterili ve bakterisiz beton numunelerini uçucu kül ilaveli ve ilavesiz 10^3, 10^5, 10^7 hücre/ml konsantrasyonlarında bakteri numuneleri şeklinde hazırlamışlardır. En yüksek basınç dayanımı değerine 10^5 yoğunluğunda ki uçucu kül ilaveli betonlarda, %22 oranında basınç dayanımı artışı ve 4 kat daha az su emme oranıyla ulaşmışlardır.

Qıan ve diğ. (2015), yaptıkları çalışmada hazırladıkları beton harcının üzerine, farklı genişliklerde olacak şekilde yapay çatlaklar oluşturmuşlardır. Bu çatlaklar üzerine bakteri süspansiyonu enjekte edilerek, mikrobiyal aktivite sonucunda $CaCO_3$ oluşumunu gözlemlemişlerdir. SEM ve XRD tarama yöntemleriyle çatlaklardaki kalsitleşme miktarları gözlemlenerek daha geçirimsiz bir beton elde etmişlerdir. Test edilen betonların su geçirgenliğinde de azalma görmüşlerdir.

Ramachandran ve diğ. (2001), yaptıkları çalışmada beton numunelerinde 25,4 mm derinliğinde çatlaklar oluşturmuşlardır. Bu çatlak numunelerin bir kısmını bakteri enjekte edilmiş kumla kapamışlardır ve diğer numunelerine herhangi bir müdahalede bulunmamışlardır. 28 günün sonunda numuneleri basınç dayanımları testine tabi tutmuşlardır. Basınç dayanımı deneyleri sonucunda bakteri ve kum karışımı çatlak derinliğine sahip numuneler ile müdahale edilmemiş numuneler arasında %61 oranında bakterili numuneler yönünde artış olduğunu tespit etmişlerdir.

3. MATERYAL VE METOT

Bu bölümde, Bursa Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Yapı Malzemesi Laboratuvarında, mikrobiyolojik kalsifikasyonun beton özelliklerine etkisini araştırmaya yönelik olarak yapılan standart basınç, asitlik etkisi, kapilerite, yüksek sıcaklık ve su emme deneylerinde kullanılan malzemeler ve özellikleri verilmiştir.

3.1 Malzemeler

3.1.1 Çimento

Tüm karışımların üretiminde CEM I 42.5R tipi çimento kullanılmıştır. Çimentonun özellikleri Çizelge 3.1' de gösterilmiştir.

Çizelge 3.1 : Kullanılan çimentonun özellikleri.

Çimentonun fiziksel özelikleri	
Özgül ağırlık	3.15
Mekanik özelikleri (MPa)	
1-günlük basınç dayanımı	14.70
2-günlük basınç dayanımı	26.80
7-günlük basınç dayanımı	49.80
28-günlük basınç dayanımı	58.50
İncelik	
Özgül yüzey (Blaine, cm^2/g)	3530

3.2.2 Agrega

Deneysel süreçte kullanılan agregalar TS 706 EN 12620 standardına uygun olup, tüm iri agrega ve ince agrega Akçansa Çimento Sanayi ve Ticaret AŞ- Bursa Agrega Tesisinden temin edilmiştir.

Deneysel süreç öncesi ilk olarak istenen agrega gradasyon eğrisi çizilmiş sonrasında buna uygun kum ve agregalar elenerek kullanılmıştır. Bu işlemler ve agrega gradasyon

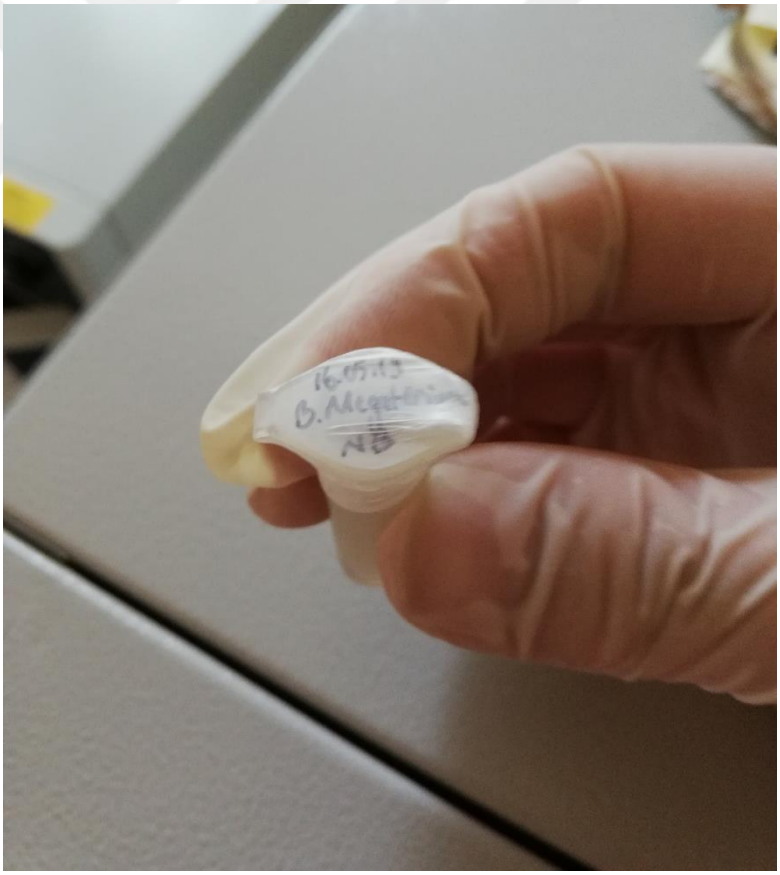
eğrisi “3.2.1 Beton Karışımlarının Hazırlanması” başlığı altında açıklanmıştır. Şekil 3.3’de kullanılan agrega granülometrisi görülmektedir.

3.2.3 Su

Deney boyunca BTÜ İnşaat Mühendisliği laboratuvarı musluk suyu olan Bursa şebeke suyu kullanılmıştır.

3.2.4 Bakteri

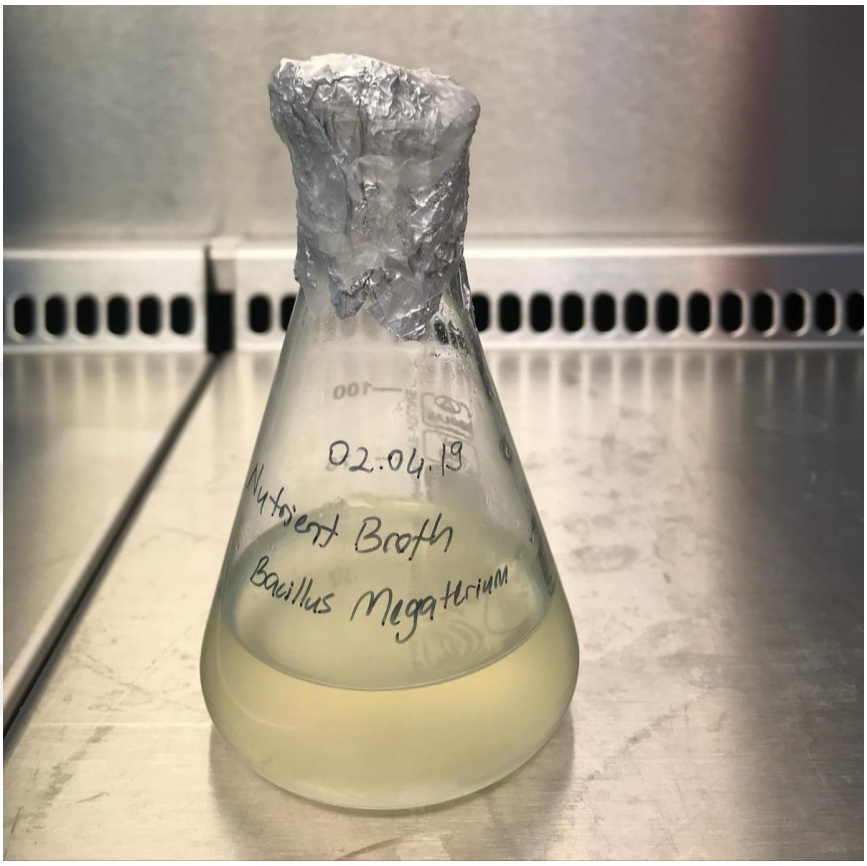
Bu çalışma boyunca *Bacillus Megaterium* türü bakteri kullanılmıştır. Refik Saydam Hıfzıssıhha Enstitüsü Kültür Koleksiyonundan (Ankara, Türkiye) temin edilmiştir. Kullanılan *Bacillus Megaterium* bakteri türü patojenik olmayan bir bakteri olduğundan, literatürde insan sağlığına olumsuz etkisiyle ilgili bir sonuçla karşılaşılmamıştır. Şekil 3.1’ de beton karışım suyuna eklenen bakteri görülmektedir.



Şekil 3.1 : Kullanılan bakterinin konsantrasyon hali.

Liyolize halde temin edilen suşlar aktivite edilene kadar +4 °C de buzdolabında muhafaza edilmiştir.

Bacillus Megaterium suşunun aktivasyonu ve saklanıp muhafazası süreçlerinde farklı besiyerleri kullanılmıştır. Bakterinin aktivasyonu için Nutrient Agar, TSB Agar katı besiyerleri kullanılmıştır. Şekil 3.2' de görülen ve araştırmada kullanılan besiyerleri farklı maddelerin farklı oranlarda birleştirilmesiyle hazırlanmaktadır



Şekil 3.2 : Besiyer içindeki bakteri numunesi.

3.2.5 Kimyasallar

Çalışmada kullanılan kimyasallar, kalsiyum karbonatın oluşumunda etkili olan bakterinin yaşamsal aktivitesini sağlamak ve muhafaza etmek amaçlı olarak bakterinin üretimi ve besiyerinde kullanılmıştır.

- Nutrient agar
- Nutrient broth (CM0001, OXOID)
- Trytic Soy Agar (105458, MERCK)
- Urea (U5378, SIGMA)
- $CaCI_2$ (102378, Merck)

3.2 Metot

3.2.1 Beton karışımlarının hazırlanması

3.2.1.1 TS 802 standardına göre yapılan beton karışım hesabı

Beton karışım hesabı yapılırken, TS 802 standardı temel alınmıştır.

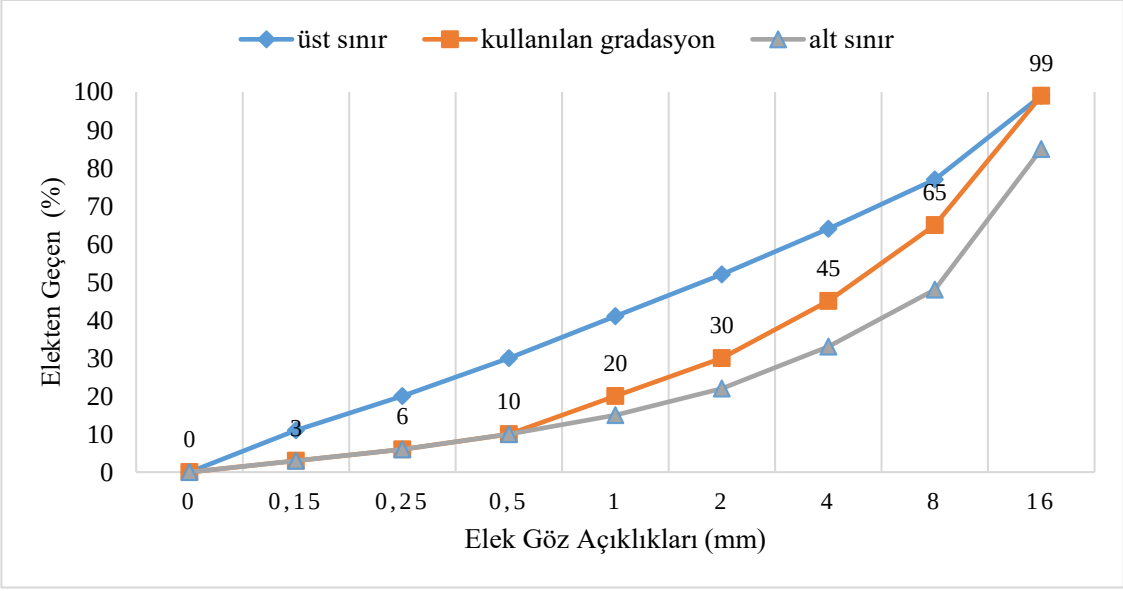
İlk olarak en büyük agrega tane çapı (D_{max}) belirlenmiştir. Çizelge 3.2' de yapı elamanı boyutlarına göre Dmax'ın belirlenmesi gösterilmiştir.

Çizelge 3.2 : Agrega en büyük tane büyüklüğü seçiminin yapı boyutuna göre seçimi.

Yapı elemanı kesitinin en dar boyutu cm	Agrega en büyük tane büyüklüğü (en fazla) (mm)			
	Donatılı perde, kiriş ve kolonlar	Sık donatılı döşemeler	Seyrek donatılı ve donatısız döşemeler	Donatısz perdeler
6 - 14	16	16	32	16
15 - 29	32	32	63	32
30 - 74	63	63	63	63

Kullanılacak kalıpların 10×10×10 cm'lik küp olduğu düşünülerek D_{max} 16 mm seçilmiştir. Şekil 3.3'de kullanılan agregaların iri ve ince olan bir kısmı görülmektedir.

D_{max} seçildikten sonra granülometri belirlenmelidir. Şekil 3.3 ' de TS 802 standardında yer verilen maksimum ve minimum sınırlar arasında yer alan çalışmada kullanılan agreganın gradasyon eğrisi görülmektedir. Şekil 3.4 ve Şekil 3.5' de kullanılan elek seti ve agregaların elek analizine hazırlanması gösterilmiştir.



Şekil 3.3 : Deneylerde kullanılan ve Dmax=16 olan agreganın gradasyon eğrisi.

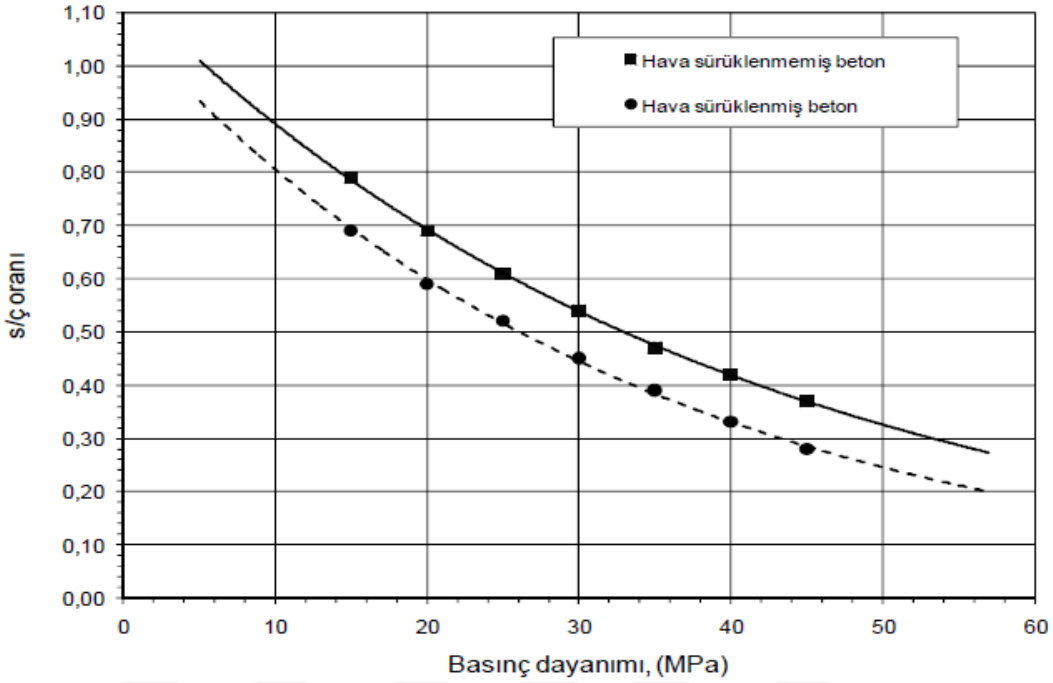


Şekil 3.4 : Elek analizi deney seti.



Şekil 3.5 : Agregaların etüvde kurutulması.

İkinci aşama olarak su/çimento oranı belirlenmelidir. Su/çimento oranının basınç dayanımıyla doğrudan bir ilişkisi vardır. O yüzden bu aşamada hedef basınç dayanımı belirlenmiştir. Şekil 3.6 kullanılarak su/çimento oranı seçilmiştir.



Şekil 3.6 : S/Ç oranı ile basınç dayanımı arasındaki ilişki.

Daha öncesinde yapılan çalışmalar incelendiğinde bakteri etkisinin yüksek dayanımlı betonlarda daha fazla etki gösterdiği bilgisi göz önünde bulundurularak hava sürüklenmemiş beton su/çimento oranı 0.45 seçilmiştir. Elde edilecek betonun en az 40 MPa basınç dayanımına sahip olması istenmektedir.

Betonun su içeriğine ve kullanılan kimyasal katkılara bağlı olarak belirlenen kıvam sınıfları TS EN 206-1 standardına uygun olmalıdır.

Beton kıvamı çökme deneyiyle belirlenir. Yapılan deneyler sonucunda tüm beton karışımlarında elde edilen çökme değeri 40 mm olarak belirlenmiştir.

Bu çalışmada kimyasal katkı kullanılmadığı gibi hava sürükleyici de kullanılmamıştır Nispeten yüksek dayanım sınıfında beton üretme hedefine karşın kimyasal akışkanlaştırıcı kullanılmamasının sebebi biyolojik bir katkı olan bakteriye verebileceği zararlardan doğan çekincelerdendir.

Yapılacak beton karışımı için agrega dane çapı ve çökme değerleri göz önüne alınarak su miktarı 195 kg/m^3 seçilmiştir. Bu değer 1 m^3 beton üretmek için 195 kg su kullanılması gerektiğini ifade eder. Ancak bu değerin içine agreganın emeceği su

miktarı dahil değildir. Bu değer agreganın muhteva ettiği su miktarına göre değişecektir. Dolayısıyla agreganın emeceği su miktarı hesaplanmalıdır. Bu sebepten ayrılan her grup agreganın ayrı ayrı su emme miktarları hesaplanmıştır. Örnek olarak, 8-16 mm grubundan agregalar etüve koyularak 24 saat boyunca 105 ℃ de kurumaya bırakılmıştır. Ardından tartılıp kuru ağırlığı (W_{kuru}) not edilmiştir. Ardından su dolu bir kaba bırakılarak 24 saat boyunca su emmeleri sağlanmıştır. 24 saatin sonunda kuru bir havlu yardımıyla yüzeylerinde görünen su alınmıştır. Böylelikle kuru yüzey doygun hal (Wd_{oygun}) ağırlıkları belirlenmiştir.

Denklem 3.1 ile beton içinde kullanılacak agreganın su emme miktarı belirlenmiştir;

$$\text{Su emme oranı (\%)} = \left[\frac{W_{doygun} - W_{kuru}}{W_{kuru}}\right] \text{x } 100 \qquad (3.1)$$

Burada W_{doygun} agrega doygun ağırlığını, W_{kuru} agrega kuru ağırlığını ifade etmektedir.

Bu deney süreci her bir agrega sınıfı için devam etmiştir. Deney sonucunda elde edilen veriler Çizelge 3.3'de gösterilmiştir.

Çizelge 3.3 : Agrega tane büyüklüklerine göre su emme oranları.

Agrega tane büyüklüğü	Su emme oranı (%)
8-16 mm	0.4
4-8 mm	0.7
2-4 mm	1
0-2 mm	5

2 mm altı ince agreganın su emme miktarı, agreganın sağlandığı yerden verilen bilgilendirme doğrultusunda %5 olarak kabul edilmiştir.

Tablodan elde edilen değerler kullanılacak agrega ağırlığı hesaplandıktan sonra yüzdelik değeriyle çarpılarak ilave su miktarı bulunacaktır. Şekil 3.7' de suya doygun ve kuru haldeki agregaların tartım işlemleri gösterilmektedir. Ağırlık değerleri arasındaki fark çıkartılarak agregaların toplam emdiği su miktarı bulunacaktır.



Şekil 3.7 : 4-8 mm arasındaki tane büyüklüğüne sahip agreganın kuru yüzey doygun hal ve kuru ağırlıkları arasındaki farkı gösteren görsel.

Sıradaki aşamada ise standartta beton içindeki hava miktarının seçimi vardır. Bu seçimde iklim koşulları ve en büyük agrega tane büyüklüğü önemlidir. Hava içeriği hava sürüklenmemiş beton için %2.5 seçilmiştir.

3.2.1.2 Bir metreküp beton için karışım hesap değerlerinin belirlenmesi

3.2.1.1 bölümündeki TS 802 standardına göre yapılan beton hesabına göre, 1 m^3 beton için belirlenen değerler; Su/çimento oranı: 0.45, su miktarı: 195 kg/m^3, hava boşluk oranı: %2.5 ve çimento miktarı 434 kg'dır. Elde edilen bu değerler sonucunda toplam hacim miktarı tamamlanarak agrega miktarı da tayin edilmiştir.

Miktarları belli olan malzemelerin hacimleri hesaplanarak toplam beton hacminden çıkartılarak agrega hacmi bulunabilir. Çizelge 3.4' de çalışmada kullanılan agrega grupları ve özgül ağırlık değerleri verilmiştir. Çizelge 3.5' de ise karışım hesabı sonucunda bulunan malzemelerin miktar ve hacimleri verilmiştir.

Çizelge 3.4 : Kullanılan agrega gruplarının özgül ağırlık değerleri

Agrega tane büyüklükleri	Hacimsel oranı (%)	Özgül ağırlığı
8-16 mm	35	2.75
4-8 mm	20	2.75
0-4 mm	45	2.65

Çizelge 3.5 : Beton karışım hesabı tablosu

1 m^3 beton içeriği		
Malzeme	Ağırlıkça(kg)	Hacimce (m^3)
Su	195	0.195
Çimento	434	0.138
Hava (%2.5)	-	0.025
8-16 mm agrega	618	0.225
4-8 mm agrega	353	0.128
0-4 mm agrega	766	0.289
Toplam	2367	1.000

Agrega miktarlarının belirlenmesinin ardından su emme oranlarına ilave su miktarı hesaplanmıştır. Çizelge 3.3'de agregaların su emme oranları verilmiştir. Buradan yola çıkarak ilave su miktarı 1 m^3 beton için 33,3 kg olarak belirlenmiştir.

3.2.1.3 Numunelerin hazırlanması ve kür işlemi

Numune hazırlama işlemi temel olarak deneme numunelerinin hazırlanması, kontrol karışımlarının (KK) hazırlanması ve bakteri katkılı numunelerin hazırlanması olmak üzere üç bölüme ayrılmıştır.

Deneme numuneleri, yapılan hesapların pratikte nasıl olduğunu gözlemlemek amacıyla imal edilen bir ön çalışmadır ve sonuçları deney sonuçlarında yer almaz. Şekil 3.8 ve Şekil 3.9' da görüldüğü üzere bu işlem için 1 adet 15×15×15 cm boyutunda bir küp numune, 15 cm çapında 20 cm yüksekliğinde 1 silindir numune ve 10×10×10 cm boyutlarında 2 adet küp numune üretilmiştir. Sonrasında kontrol karışımları (KK) dökülmesi aşamasına geçilmiştir.



Şekil 3.8 : Deneme numunelerinin taze hali.



Şekil 3.9 : Deneme karışımlarının kalıp sökümü sonrası su küründeki görünümü.

Kontrol numuneleri için 20 adet 10×10×10 cm boyutlarında küp numuneler üretmek gerekmektedir. 1 küpün hacmi 1 dm^3 yapmaktadır. Böylelikle toplamda KK için 20 dm^3 beton üretilmiştir.

Üretim gerçekleştirilmeden önce malzemeleri hazırlamak gerekir. İlk olarak agregalar 5 g hassasiyete sahip 150 kg kapasiteli bir terazide tartılarak toplam kütle kovalarda elde edilmiştir. Toplam su miktarı 0.1 g hassasiyete bir terazide tartılıp hazırlanmıştır. Aynı terazide belirlenen miktardaki çimento da hazırlanmıştır. Şekil 3.10'da kullanılan agrega, su ve çimento görülmektedir. Şekil 3.11'de ise çimento ve iki grup halindeli ince agrega görülmektedir.



Şekil 3.10 : Kullanılan çimento, agrega ve su.



Şekil 3.11 : Döküm öncesi hazırlanan çimento, iri ve ince agregalar.

Şekil 3.12' de bir kısmının görüldüğü üzere tüm malzemeler hazırlandıktan sonra numuneler beton mikserinde karıştırılmıştır ancak karışım öncesinde betoniyerin

numuneleri dökülen haznesi sulanarak nemli şekle getirilmek önemlidir. Aksi takdirde betoniyerin zemini kuru olduğu için betonun suyundan eksiltecektir.



Şekil 3.12 : Kullanılan betoniyer ve haznesine malzeme dökümü.

Betoniyer hazırlandıktan sonra içine agrega ve çimento koyularak 2 dakika boyunca kuru karışım yapılmıştır. Sonrasında toplam suyun yarısı ilave edilerek 1-2 dakika karıştırılmıştır. Geriye kalan su da karışıma ilave edilerek döküm için uygun hale gelene kadar karıştırılmıştır. Betoniyer haznesinin çevresinde ve haznenin dibinde ince malzemeler karıştırma boyunca birikme eğilimi gösterir. Bunlar betonun boşluk oranını ve diğer özelliklerini etkileyebilir. O yüzden karıştırma süresince betoniyerin kenarlarında kalan ince malzemelerin birikmemesi sağlanmıştır.

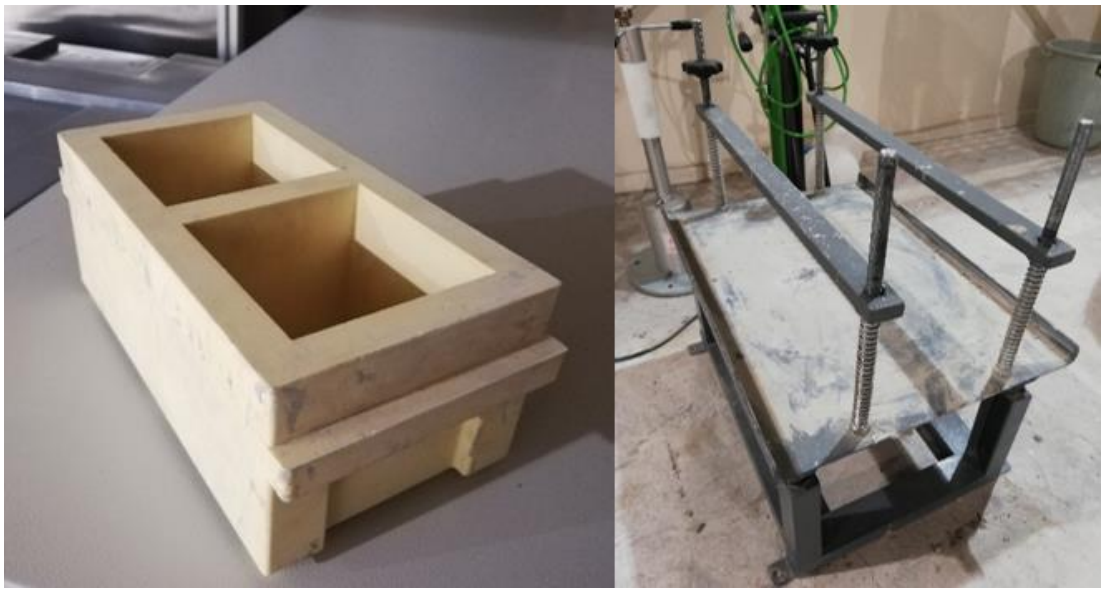
Toplamda beton malzemeleri 5-6 dakika boyunca karıştırılmıştır. Şekil 3.13’ de malzemelerin betoniyer içindeki kalıba döküm için hazır hali gösterilmiştir.



Şekil 3.13 : Malzemeler karıştırıldıktan sonraki döküme hazır hale gelmiş beton.

Bu işlemden sonra betonun istenilen kıvam değerinde olup olmadığı gözlemlemek için çökme deneyi yapılmıştır. TS EN 12350-2 kısmındaki standartlara uyularak deney gerçekleştirilmiştir.

Beton üretim işlemi gerçekleştikten sonra betonları 10×10×10 cm boyutundaki plastik küp kalıplara doldurma işlemi yapılmıştır. Şekil 3.14'de boş kalıp örneği görülmektedir. Kalıplama işlemi yapılmadan önce kalıplar beton numunelerinin hasar almadan çıkabilmesi adına yağlanmıştır. Kalıplar betonla doldurulduktan sonra 120 saniye boyunca vibratöre konularak içindeki boşlukların iyice kapanması ve betonun yerleşmesi sağlanmıştır.



Şekil 3.14 : Kullanılan kalıp örneği ve vibratör.

Şekil 3.15'de ki gibi kalıplar içerisine yerleştirilen betonlar 24 saat boyunca oda sıcaklığında ve doğrudan güneş almayacak şekilde kurumaya bırakılmıştır.



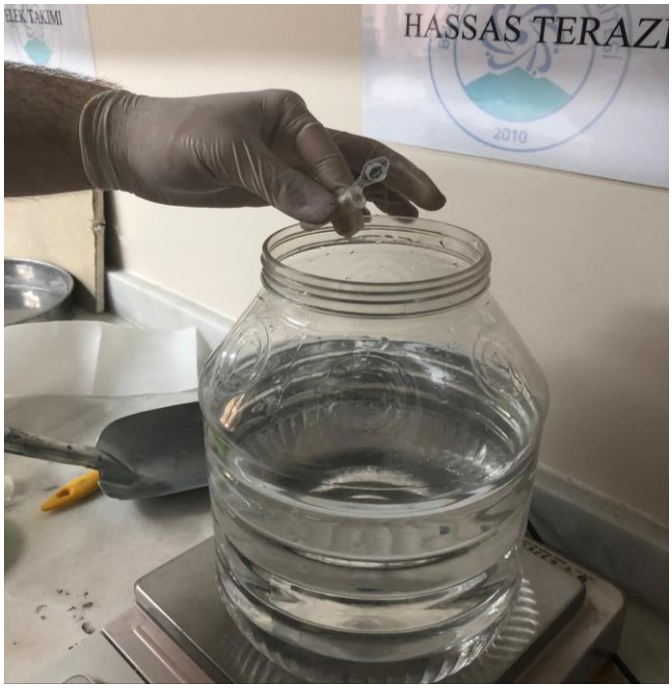
Şekil 3.15 : Betonların kalıplara yerleştirildikten sonraki görünümleri.

Betonlar kalıp içinde kuruduktan sonra kompresör yardımıyla kalıptan itinayla sökülmüştür. Şekil 3.16'da görülen KK numuneleri su kürüne bırakılmıştır.



Şekil 3.16 : Kalıplardan yeni sökülmüş KK numuneleri.

Bacillus Megaterium türündeki bakteri katkılı karışımların (BM) hazırlanmasında ise KK numunelerinin hazırlanmasındaki tüm adımlar aynen uygulanmıştır. Tek fark, karışım suyu içerisine tüm karışım suyu oranını 30×10^5 bakteri yoğunluğuna çekecek bakteri katkısıdır. Bu katkı karışım suyuna direkt olarak elle ilave edilmiştir. Şekil 3.17'de bakterinin beton karışım suyuna ilave edilme şekli görülmektedir.



Şekil 3.17 : Beton karışım suyuna ilave edilen bakteri konsantrasyonu.

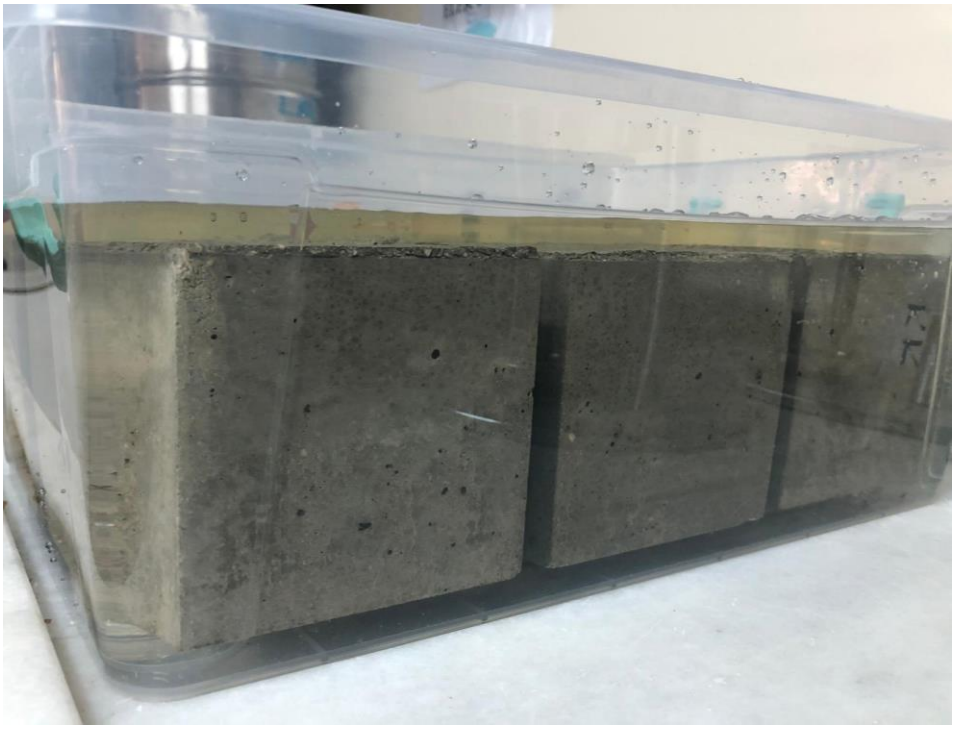
İlave edilen bakteri 3.7 litre su için 2-3 küçük damla kadardır. Katkı katıldıktan sonra su iyice karıştırılmıştır. Bakterili su olabildiğince kısa sürede beton döküm işlemine geçilmelidir.

BM numunesi hazırlama süreci bu aşamadan sonra KK üretim süreciyle aynıdır ve aynı deney sonuçları elde edilmiştir. Ancak BM numuneleri kalıp sökümü sonrasında su kürüne değil, bakterinin yaşamsal faaliyetlerini devam ettirmesi için özel bir sıvı içinde kür işlemine tabi tutulmuştur. Bu sıvının içeriği Çizelge 3.6' da gösterilmiştir. Şekil 3.18' de ise bakterili ve besiyerli kür sıvısının sarımtırak rengi gözlenebilir.

Çizelge 3.6 : BM numunelerinin kür suyu içeriği.

Katkı adı	Her 1 litre için eklenecek miktarlar
Nutrient broth	3 gram
$CaCl_2$	2.8 gram
Üre	20 gram
Bacillus Megaterium	30×10^5 hücre/ml

Beton numuneler, bu sıvı içerisinde kapaklar kapalı olacak şekilde kür işlemine bırakılmıştır. Bu süreç boyunca besinin ve bakterinin dibe çökmesini önlemek amacıyla karıştırılmıştır.



Şekil 3.18 : Bakterili karışımların besiyerlerinde küre bırakılmış hali.

3.2.2 Basınç dayanım deneyi

3.2.2.1 Deneyin kapsamı

Bu deneyin amacı üretilen beton numunelerin maksimum basınç dayanımını belirlemek ve kullanılan biyolojik katkının etkisini gözlemlemektir. Deney standartları "TS 3114, ISO 4012 Beton-Deney Numunelerinin Basınç Dayanımı Tayini" standardında belirtilmiştir. Tüm deney süreci bu standart göz önünde bulundurularak yürütülmüştür.

3.2.2.2 Deneyin yapılışı

Çalışmada tüm numuneler bir ayrıtı 10 cm olan plastik küplere dökülmüştür. 24 saat sonunda beton numuneleri kompresör yardımıyla kalıplardan çıkarılmıştır. Çıkarılan numuneler kendi özel kür havuzlarında beklemeye alınmıştır. Kontrol numuneleri su küründe, katkılı betonlar ise kendi besiyerlerinde kürlenmiştir.

Basınç dayanım gününe göre kürden çıkarılan numuneler prese yerleştirilerek kırılmıştır. Kullanılan pres, iki bloktan oluşmaktadır ve numune bu bloklar arasına koyularak yük uygulanır. Yükleme hızı, beton numunelerinin gerçekçi dayanımlarını gözlemlemek adına 0,6 MPa/sn olarak ayarlanmıştır. Numuneler kırılıp artık basınç dayanımı gösteremediği anda pres durdurularak sonuçlar kaydedilmiştir.

Her yaştaki numunelerden 3 adet kırılarak ortalama değerleri alınmıştır. Şekil 3.19' da numunelerin kırımdan sonraki hali görülmektedir. Şekil 3.20' de kırım işleminde kullanılan 300 ton kapasiteli basınç dayanımı pres makinesi görülmektedir.



Şekil 3.19 : Beton numunelerinin kırım sonrasındaki görüntüleri.



Şekil 3.20 : 300 ton kapasiteli basınç deneyi presi.

3.2.3 Su emme deneyi

3.2.3.1 Deneyin kapsamı

Su emme deneylerinin yapılmasının sebebi betondaki oluşturulmak istenen yoğunluk artışına bağlı olarak su emme oranlarındaki değişimi gözlemlemektir. "TS 3624-Sertleşmiş Betonda Özgül Ağırlık, Su Emme ve Boşluk Oranı Tayini" standardı göz önünde bulundurularak 28 günlük su emme oranları ölçülmüştür.

3.2.3.2 Deneyin yapılışı

Su emme deneyi çalışmada iki farklı kıstasta yapılmıştır. Bunlar ağırlıkça su emme ve hacimce su emmedir.

Ağırlıkça su emme oranını belirlemek için öncelikle kullanılacak numunenin kuru ve suya doygun ağırlığının bilinmesi gerekmektedir. Bu sebeple su küründen çıkarılan ve artık su içerisinde bırakılmayla ağırlığı değişmeyecek kadar doygun olan numunenin etrafında ki ıslaklıklar kuru bir bez yardımıyla kabaca silinerek hassas tartıda suya

doygun halinin ağırlığı tartılmıştır. Sonrasında ise bu numuneler 105 ℃ derece etüvde 24 saat boyunca kurumaya bırakılmıştır. Etüvden çıktıktan sonra oda sıcaklığında kurutulan numunelerin kuru halinin ağırlığı tekrar tartılmıştır. Ardından bu değerler kullanılarak ağırlıkça su emme oranları belirlenmiştir.

Hacimce su emme oranı belirlemede ise sudan doygun olarak çıkarılan numuneler özgül ağırlık deney seti vasıtasıyla sudaki ağırlıkları tayin edilmiştir. Şekil 3.21' de kullanılan özgül ağırlık seti ve sudaki ağırlığı belirlemek üzere yapılan deneyden bir görüntü yer almaktadır.



Şekil 3.21 : Beton numunelerinin sudaki ağırlıklarının ölçülmesi.

3.2.4 Kapiler su emme deneyi

3.2.4.1 Deneyin kapsamı

Deney boyunca "TS EN 12390-7 Sertleşmiş beton deneyleri" standardı dikkate alınmıştır. Şekil 3.22' de numunelerin kapiler su emme deneyi esnasında çekilen fotoğrafına yer verilmiştir.



Şekil 3.22 : Kapiler deneyi yapım aşaması.

3.2.4.2 Deneyin yapılışı

28 gün kür işlemine tabi tutulan numuneler suya doygun duruma gelmişlerdir. Kılcallığı ölçmek bu durumda mümkün olmadığından etüvde değişmez ağırlığa gelene kadar kurutulmuşlardır. Bu süre ortalama olarak 24 saat ve 105 ℃ dereceye denk gelmektedir. Etüvden alınan numuneler oda sıcaklığına gelene kadar soğumaya bırakılmıştır. Kapiler su emme deneyi için toplam 3 beton numunesi kullanılmıştır.

Numunenin sadece suya değen yüzünden su alması beklendiği için yan yüzleri su geçirmeyecek şekilde yalıtılmıştır. Deney öncesi numunenin ağırlığı tartılarak, içinde 5 mm yüksekliğinde su bulunan kaba bir yüzü suya temas edecek şekilde bırakılmıştır. 0, 15, 30, 60, 90, 135, 180, 225, 270, 1440 dakika periyotlarında numune ağırlıkları belirlenmiştir. Deney boyunca kapiler emme ve buharlaşma nedeniyle su seviyesinde düşüş yaşamamak için su ilave edilmiştir.

Denklem 3.1’ de görülüğü üzere yapılan bu ölçümler sonunda kılcallık katsayıları hesaplanabilir. Kılcallık bir yapı malzemesinin geçirimliliği hakkında bilgi sahibi olmak için önemlidir.

$$N = (m_1-m_0) / (A\sqrt{t}) \quad (3.1)$$

Burada N kılcallık katsayısını (cm^3/cm^2 √dak), m_0 numunelerin ilk ağırlıklarını (g), m_1 numunelerin belli bir zaman dilimi sonunda ağırlıklarını (g), A numunelerin suya değen taban alanlarını (cm×cm), t numunelerin suyla temas ettiği süreyi (dakika) ifade eder.

3.2.5 Yüksek sıcaklık deneyi

3.2.5.1 Deneyin kapsamı

Bu deneyin amacı beton numunelerini belirli bir sıcaklığa maruz bırakarak yapısındaki değişimi gözlemleyip 2 ayrı grup numunesi arasındaki dayanım farklılıklarını belirlemektir. Deney yapım süreci boyunca “Eurocode 4- Part 1-2: Structural fire design Structural Fire Design ” standardı dikkate alınmıştır.

Şekil 3.23’ de kullanılan kül fırını içindeki beton numunelerinin henüz fırınlanmamış hali gözükmektedir.



Şekil 3.23 : Beton numunelerinin kül fırını içerisindeki yerleşimi.

3.2.5.2 Deneyin yapılışı

Kalıptan alınıp 28 gün kür uygulanan numuneler, Eurocode'a göre yapılar için kritik bir değer olan 400℃ sıcaklığında olan kül fırınında 2 saat 30 dakika boyunca tutulmuştur. 400℃ ye kadar yapılarda, kullanılan donatıların özelliklerinde herhangi bir değişim gözlemlenmemektedir. Ancak bu dereceden sonra donatının yapısında bozulmalar ve akmalar gözlenir. Bu sebeple ilgili standartta 400 ℃ sıcaklığa 2 saat boyunca dayanmalıdır maddesi yer almaktadır. Bu sebeplerden dolayı beton numunelerinin 400 ℃ de olan dayanımları araştırılmıştır. Her eşdeğer grup için 2 adet numune fırına verilmiştir. Kül fırını 400 ℃ 'ye 40 dakika sonunda çıkması için ayarlanmıştır. Bu sürenin daha kısa tutulmasının sebebi betona ani bir ısı yükleyip, betonun basınç dayanımında test edilemeyecek seviyeye gelmesi içindir. 2 saat 30 dakika boyunca 400 ℃ de tutulan numuneler, bu sürenin sonunda kül fırının kapağı açılmadan soğulmaya bırakılmıştır. Numunenin yavaş bir şekilde fırın içinde soğumaya bırakılması, sıcaklık farkına maruz kalarak beton üzerinde çatlamaların oluşmasına engel olması sebebiyle önem taşır. Oda sıcaklığına gelen beton numuneleri, basınç dayanımı presinde kırılarak basınç dayanımları değerlerine ulaşılmıştır. Bu değerlerden yola çıkarak yüksek ısının normal beton numunelerine etkisi ve bakteri kullanılarak üretilen beton numuneleri arasındaki farkın olup olmadığı, eğer varsa ne düzeyde olduğu belirlenebilmektedir.

3.2.6 Aside dayanıklılık deneyi

3.2.6.1 Deneyin kapsamı

İnşa edilen yapılar, zaman içerisinde birçok fiziksel ve kimyasal etkiye maruz kalırlar. Bu nedenle yapılar olabildiğince uzun süre tasarlandığı şekilde kalmalıdır. Dış etkilere olan bu dayanıklılığa durabilite denir. Numuneler asit çözeltisi içerisine bırakılarak durabilitesi hakkında bilgi sahibi olunmuştur. Deney boyunca "TS 3440, Zararlı Kimyasal Etkileri Olan Su, Zemin ve Gazların Etkisinde Kalacak Betonlar İçin Yapım Kuralları" standardı göz önünde bulundurulmuştur.

3.2.6.2 Deneyin yapılışı

28 gün boyunca küre tabi tutulan bakterili ve kontrol numunelerinden üçer adet alınmıştır. Bu numuneler etüvde 24 saat 105 ℃ de tutularak kurutulmuştur. Kuruma işleminin ardından oda sıcaklığında bir gün boyunca soğumaları beklenmiştir. Ardından kuru ağırlıkları hassas terazide ölçülmüştür. Belirli oranda asit içeren

karışımlar hazırlanmıştır. %6 oranında HCL asidi içeren çözelti içerisine numuneler bırakılarak 10 gün boyunca beklenmiştir. Çözelti 5 gün sonunda yenisiyle değiştirilmiştir. 10 günün sonunda etüvlenerek kuru hale getirilen numuneler tartılarak, asit nedeniyle kaybedilen ağırlıkları tespit edilmiştir. Ardından basınç dayanım presinde kırılarak, asidin durabiliteye olan etkisi gözlemlenmiştir. Bakterili betonlarla kontrol numuneleri kıyaslanmıştır.

3.2.7 $CaCO_3$ oluşumuyla çatlak kapanması

3.2.7.1 Deneyin kapsamı

Beton dış etkilere maruz kalarak birçok kimyasal ve fiziksel zarar görür. Bu etkilerin sonucunda yüzeyinde ve içyapısında çatlaklar oluşur. Çalışmanın bu kısmında oluşan bu çatlakların mikrobiyal süreç sonunda kapanmaları gözlemlemektir.

3.2.7.2 Deneyin yapılışı

Beton karışım suyuna bakteri ilave edilmiş numuneler kalıptan alındıktan sonra 7 gün boyunca besiyerlerinde kür işlemine tabi tutulmuşlardır. 7 günün sonunda basınç dayanım presinde yüzeyinde çatlak oluşana dek yük uygulanarak yarı çatlak hale gelmiş numuneler üretilmiştir. Bu numuneler sonrasında bakteri ve besi ihtiva eden sıvılarına geri koyularak belirli aralıklarla fotoğraflanmışlardır.

Bunun yanı sıra içinde bakteri bulundurmayan katkısız su ile üretimi gerçekleşen kontrol karışımlarından da aynı yöntemle çatlaklar oluşturularak aynı besiyer içerisine bırakılmıştır. Buradaki amaç içerisinde bakteri bulundurmayan numunelerde de kalsitleşme sonucu çatlaklar kapanıp kapanmadığını belirlemektir. Şekil 3.24'de yarı çatlak hale getirilerek bakteri etkisi gözlemlenecek bir numuneye yer verilmiştir.

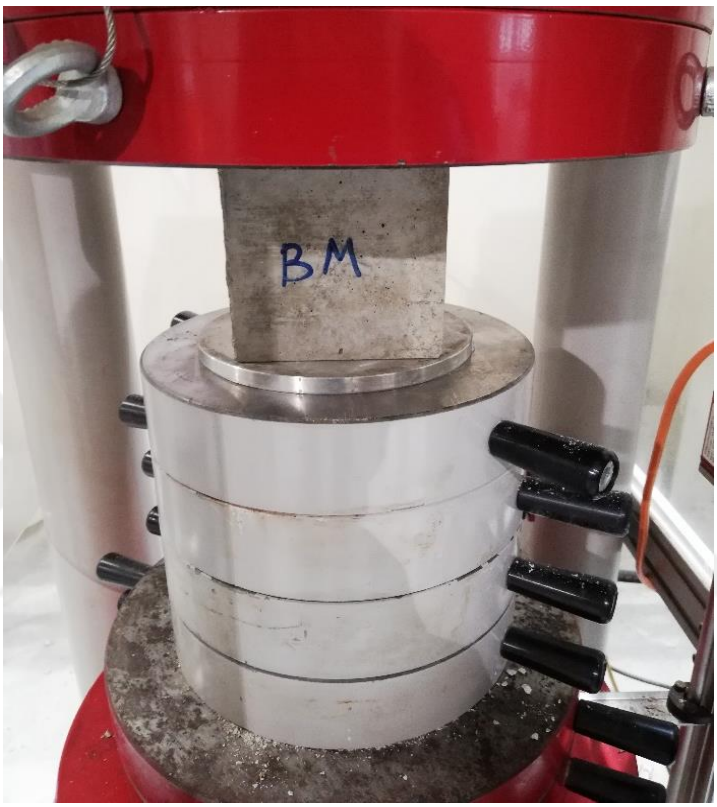


Şekil 3.24 : Preste çatlaklar oluşturulan numune örneği.

Belirlenen kürleme gününden sonra çıkarılan numunelerin çatlak kapama özellikleri ve yüzeyde oluşan $CaCO_3$ yapıları gözlemlenmiştir. Çatlak kapama ve öncesi fotoğraflanarak kıyaslanmıştır.

4.BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1 Basınç Dayanımı



Şekil 4.1 : Bakteri içeren numune (BM) basınç dayanımı deneyi.

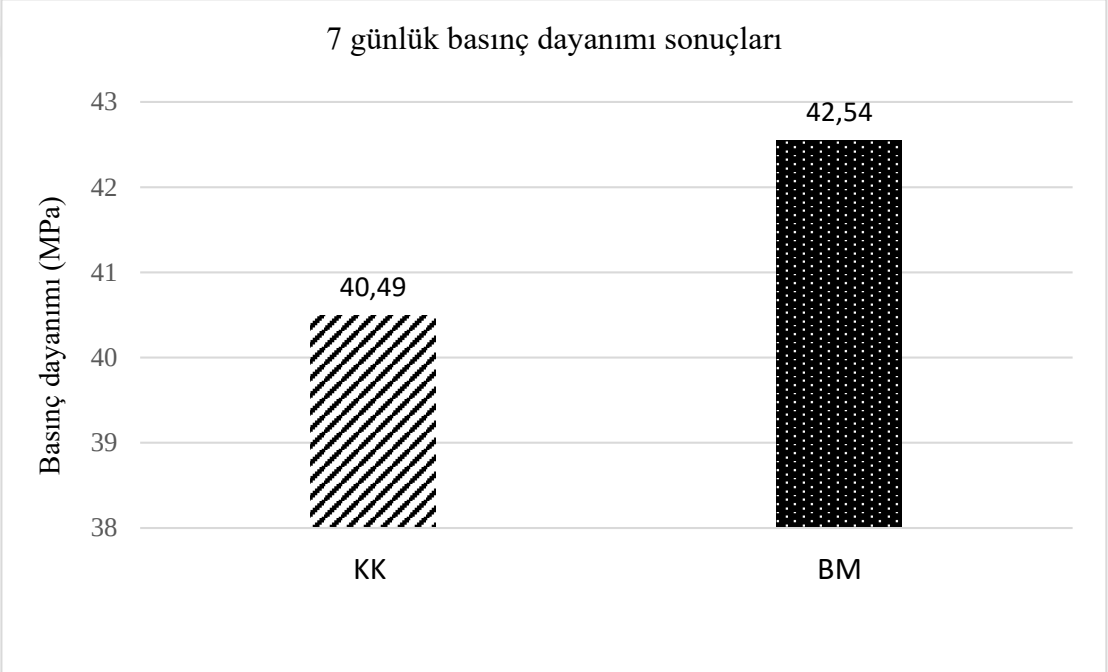
Basınç dayanımı deneyinde 3 tip numune test edilmiştir. Bunlar; kontrol karışımları (KK), Bakterili karışımlar (BM) ve bakteri içermeyen ancak bakterili besiyerde kürlenmiş (KB) numuneleridir. Tüm basınç dayanımı deneylerinde her numune türü için üçer adet numune kullanılmıştır.

İlk olarak 7 gün sonunda KK kontrol karışımları, BM bakterili karışımlar ve KB bakterili besiyerde kürlenmiş numuneleri kırılmıştır. Şekil 4.1' de elde edilen basınç dayanımlarının ortalamaları grafik olarak görülmektedir.

Şekil 4.1 incelendiğinde açıkça görülmektedir ki bakteri katkısı 7 gün sonunda etkisini basınç dayanımları değerleri üzerinde göstermeye başlamıştır. KK numunelerinin ortalamasının 40.49 MPa olan dayanım değeri, BM numunelerinde %5.07 artış

göstererek 42.54’ e yükselmiştir. Andalib ve diğ. (2016) yaptığı çalışmada da 30×10^5 yoğunluğunda bakteri kullanılarak çeşitli beton sınıfları üretilmiştir. Çalışmalarında C40 sınıfı için buldukları 7 günlük dayanım artışı %4.90 olarak elde edilmiştir. Bu çalışmada bulunan %5.07 değerine oldukça yakın bir değerdir. Bu değer *Bacillus Megaterium* türü bakteri kullanılarak yapılmış diğer çalışmalarla kıyaslandığında literatürde bulunan değerlere yakın bir değer olduğu görülmektedir.

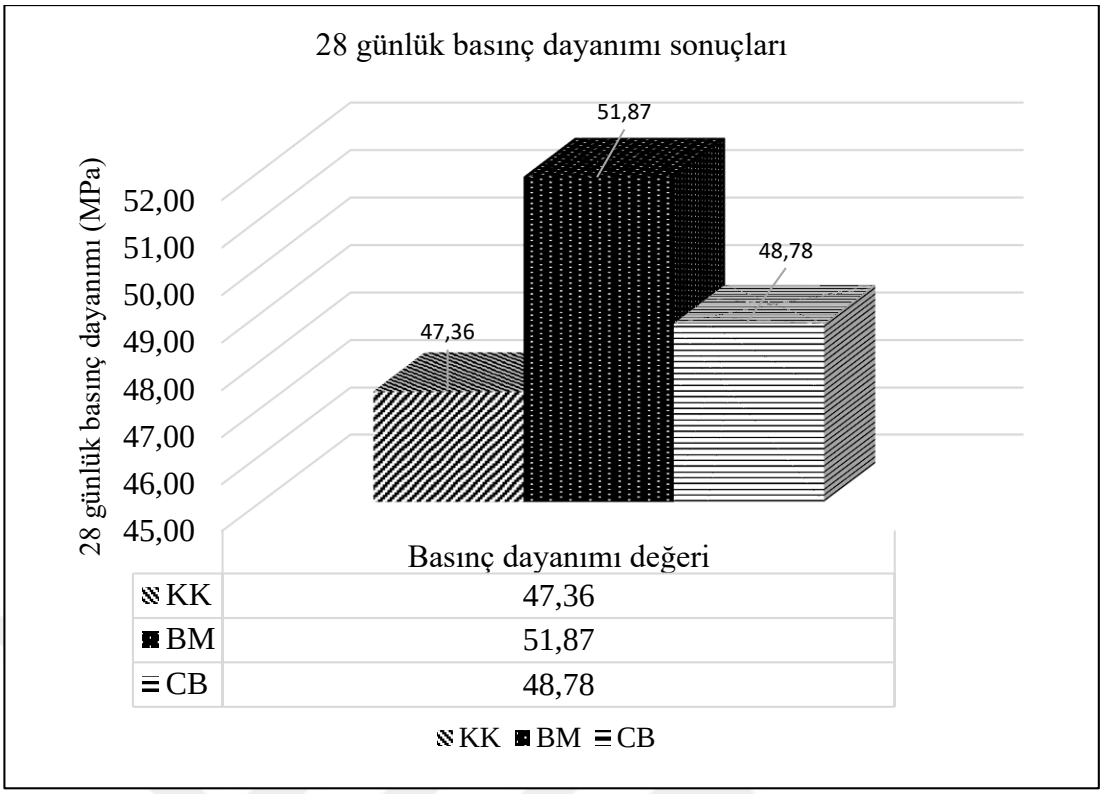
Bu artışın temel sebebi beton içindeki boşluklarda beton yüzey gözeneklerinde $CaCO_3$ oluşmasıdır. Bakteriler harç kısımlarda oluşumlar göstererek daha sıkı ve daha mukavemetli bir beton meydana getirmişlerdir (Ramachandran ve diğ, 2001; Ghosh ve Mandal, 2006).



Şekil 4.2 : 7 günlük numunelerin basınç dayanımı değerlerinin grafik gösterimi.

Kalsitleşme sürecinin devam edip etmediğini ölçmek adına 28 günlük numuneler kırılmıştır. KK ve BM numunelerinden 3’er adet kullanılmıştır. 28 günde, 7 günden farklı olarak; bakterili besiyerde kürlenen ancak karışımında bakteri içermeyen numune (CB) de kıyaslama içine sokulmuştur.

Şekil 4.2’ de 28 günlük basınç dayanımının tayin edilmesi deneyi sonucunda elde edilen değerlerin ortalaması alınarak grafik şeklinde kıyaslanması görülmektedir. En yüksek basınç dayanımı BM numunesinde görülmüştür.



Şekil 4.3 : 28 günlük basınç dayanımı sonuçları.

28 gün sonunda da görülmüştür ki basınç dayanımı artışı devam etmektedir. Bu beton içindeki bakterilerin hala canlılığını koruduğuna ve MICP sürecinin devam ettiğine delildir.

28 gün sonunda BM karışımlarının KK numunelerine göre %9.54 daha fazla dayanım gösterdiği görülmüştür. Ramin Andalib'in 2016 yılında yaptığı çalışmada bu değer %9.77'dir. Değerin çok yakın çıkması sonuçların sağlıklı olduğunu göstermektedir. Bu oran artışı da benzer şekilde, zaman geçtikçe beton içerisindeki kalsit oranının artarak, betonun içindeki boşluk oranın azalması şeklinde yorumlanabilir. Çünkü 7 günlük KK ve BM arasındaki fark %5.04 'ken, 28 günde bu değer %9.54 'e kadar çıkmıştır.

28 gün sonunda bakteri içermeyen ve kontrol numunesiyle aynı içeriğe sahip olan ancak bakterili ve besiyerli sıvıda bekletilen numuneler de test edilmiştir. Bu testin yapılmasındaki amaç bakterinin beton üretiminin hangi aşamasında daha efektif olduğunu belirlemektir. Bu deney sonucunda CB numunesindeki dayanım KK numunesine göre %3.01 daha fazladır. KK numunesine göre daha dayanımlı beton üretimi gerçekleştirilse de içinde bakteri içeren BM numunelerine göre daha düşük bir dayanımdır. Bunun sebebi olarak bakterinin beton içinde kullanımının daha efektif

olduğu söylenebilir. Bu çalışmada sonuca paralel olarak Ridha ve diğ. (2018) yaptığı çalışmanın sonucu gösterebilir. Ridhanın çalışmasında da kontrol karışımı, bakteri katkılı beton, bakterili numune de kürlenen bakterisiz beton numuneleri olmak üzere 3 tip beton üretilmiştir. Çalışmalarının sonucunda, yapılan bu çalışmaya eş değer olarak, sadece bakterili besiyerde kürlenen numune kontrol karışımdan daha yüksek dayanıma sahip çıksa da bakteri katkı numunelerden daha düşük dayanıma sahip olduğu sonucu elde edilmiştir.

Basınç dayanımı sonuçlarında net bir şekilde görülmüştür ki beton içinde kalsitleşmeyle $CaCO_3$ oluşturmak beton basınç dayanımınlarını arttırarak olumlu bir etki yaratmıştır.

4.2 Su Emme Oranı

Malzemelerin ne kadar su emdiğini tayin etmek yapı malzemelerinin kullanımı açısından önemli bir parametre oluşturduğu için su emme deneyi yapılır. Malzemelerin su emme kapasiteleri donma-çözülme, geçirgenlik ve durabilite özellikleri açısından önem taşır.

28 gün kür işleminin ardından numunelerin suya doygun halindeki, kuru halindeki ve su içinde halinin ağırlıkları tartılarak su emme miktarları belirlenmiştir. Çizelge 4.1 ve Çizelge 4.2’ de verilen değerler su emme deneyi boyunca kullanılmıştır.

Su emme deneyi ağırlıkça su emme ve hacimce su emme olarak 2 ayrı şekilde yapılmıştır.

Çizelge 4.1 : KK numunelerinin 28 günlük ağırlıkları.

KK numunelerinin ağırlık değerleri			
Numune adı	Suya doygun hal (g)	Su içinde (g)	Kuru hal (g)
KK-1	2426	1370	2312
KK-2	2396	1350	2281
KK-3	2412	1371	2305

Çizelge 4.2 : BM numunelerinin 28 günlük ağırlıkları.

BM numunelerinin ağırlık değerleri			
Numune adı	Suya doygun hal (g)	Su içinde (g)	Kuru hal(g)
BM-1	2428	1379	2329
BM-2	2452	1398	2356
BM-3	2424	1380	2322

4.2.1 Ağırlıkça su emme oranı

Kısaca emilen su miktarının ağırlık olarak malzemenin ağırlığına yüzdesel oranıdır. Malzemenin boşluk oranı olarak fikir sahibi olmaya yarayan bu deney sonucunda elde edilen sonuçlar Çizelge 4.3'de gösterilmiştir.

Çizelge 4.3 : Numunelerin ağırlık olarak su emme miktarları (%)

Numune Adı	KK	BM
1	4,93	4,27
2	5,02	4,07
3	4,65	4,37
Ortalama	4,87	4,23

Çizelge 4.3 incelendiğinde BM numunelerinde su emme oranında belirgin bir düşüş olduğu görülmektedir. Beton numunesinin %4.87 olan su emme oranı, %4.23'e düşmüştür. Bu düşüş %12.99 azalmaya tekabül eder. Eğer bu değer betonun içindeki mevcut boşluk değeriyle orantılanacak olursa yapılan bu çalışmada, KK numunesine göre %12.99 daha dolu bir içyapı elde edildiği sonucu görülmüştür.

4.2.2 Hacimce su emme oranı

Numunenin hacimsel olarak ne kadar su ile dolduğunu ifade eden değer tespit edilmiştir. Ağırlıkça su emmeden farkı numunelerin su içindeki ağırlıkları da tartılarak boşluksuz ağırlığı da elde edilir. Çizelge 4.1 ve Çizelge 4.2' de beton numunelerinin ağırlık ölçüm değerleri verilmiştir. Çizelge 4.4' de bulunan değerler numunelerin içindeki toplam suyun hacimsel yüzdeleridir.

Çizelge 4.4 incelendiğinde KK numunelerinde hacimsel olarak %10.68 olan su emme oranı BM numunelerinde %9.41' e kadar gerilemiştir. Beton hacminin toplam %10.68' in suyla dolu olduğu düşünüldüğünde bu değeri düşürmek donma-çözülme değerleri içinde önem taşır. Mevcut değer %11.72 azalarak 9.41 e gerilemiştir. Beton içindeki su hacminin %11.72 azalması suyun sebebiyet vereceği toplam genleşme ve büzülme sonucu oluşacak çatlakları azaltacaktır.

Çizelge 4.4 : KK ve BM numunelerinin hacimce su emme yüzdeleri (%).

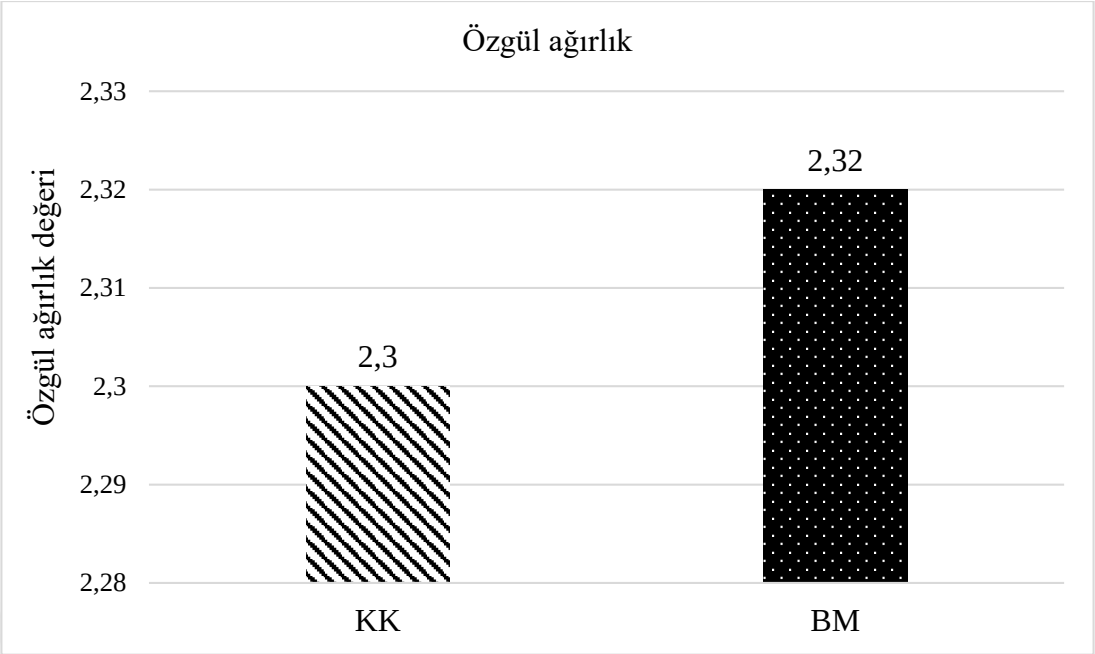
Numune adı	KK	BM
1	10,80	9,10
2	10,96	9,72
3	10,29	9,43
Ortalama	10,68	9,41

Beton numunelerinin ağırlıkça ve hacimce su emme oranının düşmesi betonun yüzeylerinde ve içyapısında $CaCO_3$ oluşumu ile ilişkilidir. Kalsiyum karbonatın betonun gözeneklerini doldurduğunu gözlemlemek amacı ile sudaki ağırlıkları da ölçülmüş ve özgül ağırlıkları verilmiştir. Denklem 4.1 kullanılarak özgül ağırlıkları belirlenmiştir.

$$\delta = W_{doygun} / (W_{doygun} - W_{su}) \quad (4.1)$$

Burada δ simgesi özgül ağırlık değerini, W_{doygun} numunelerin suya doygun ağırlığını (g), W_{su} numunelerin su içindeki ağırlığını (g) ifade eder.

Şekil 4.4'de bakteri katkısının ortalama özgül ağırlıklarındaki değişimlere etkisi görülmektedir. Ortalama özgül ağırlık değerinin 2.30'dan 2.32 çıkması birim hacimde daha ağır bir malzeme üretildiğine işaret eder. Bu da numune içinde mikrobiyal $CaCO_3$ olduğunu kanıtlar bir veridir. Oluşan kalsit numunenin boşluklarını doldurarak su emme değerlerini düşürürken özgül ağırlığını beklendiği üzere arttırmıştır



Şekil 4.4 : KK ve BM numunelerinin özgül ağırlık değerleri.

4.3 Kapiler Su Emme Oranı

Betonun içinde irili ufaklı birçok boşluk ve görülmeyen kanallar vardır. Bunların bazıları dışarı açık, bazıları kapalı ve bazıları mikron seviyelerinde olan kılcal (kapiler) boşluklardan oluşur. Dışarı açık olan içeriye doğru ilerleyebilen bu kanal ve boşluklar betonun dışarıya karşı korunumunda tehlike yaratır. Buradan zararlı sıvılar ve gazlar malzemenin içyapısına sızarak malzeme özelliklerini bozar. Geçirimlilik adına önemli bir kıstas olan kapilerite çalışmanın bu bölümünde incelenmiştir.

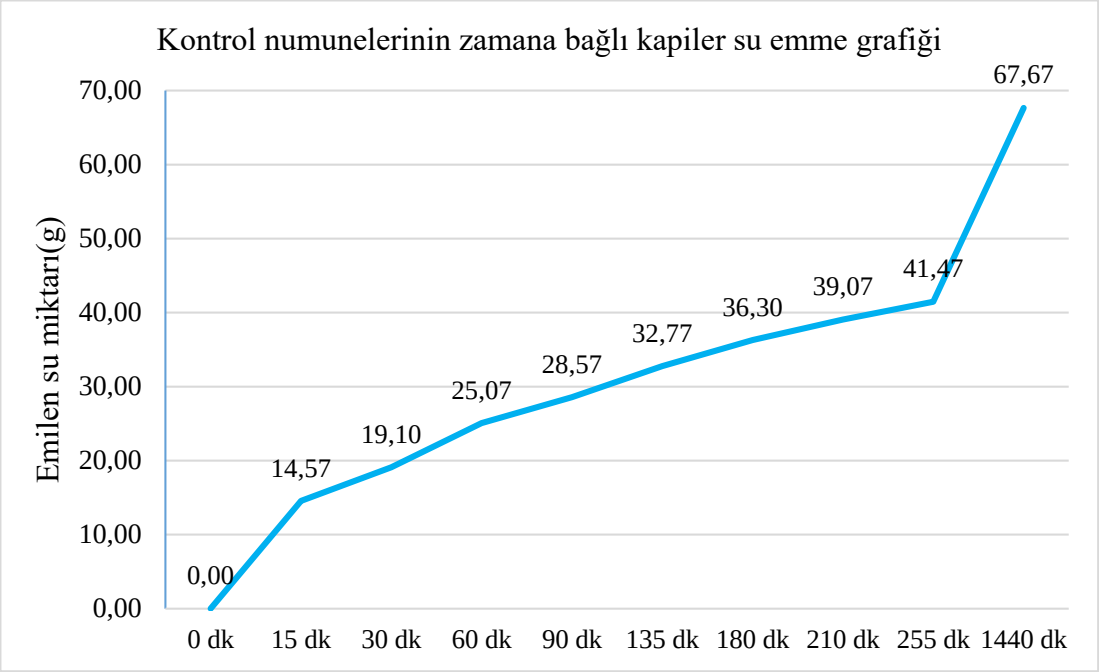
İlk olarak numunelerin yan yüzeylerine su geçirmez bant kaplanarak yan yüzeylerden su emmesi engellenmiş ve deney sürecince sadece alt yüzeyden su emmesi sağlanmıştır. Şekil 4.5’ de BM numunelerinin kapiler su emme deneyi sırasındaki görüntüsü yer almıştır. Deneyde BM ve KK numunelerinden 3’er adet kullanılmıştır. Numuneler belirli aralıkla tartılarak ağırlıkları belirlenmiştir. Çizelge 4.5’ de bu ağırlıklar gösterilmiştir. Çizelge 4.5’ den elde değerler ışığında ağırlık farkları belirlenmiştir. Şekil 4.6’ da ise bu değerler zamana bağlı olarak çizgi olarak görülmektedir.



Şekil 4.5 : BM numunelerinin kapiler su emme deneyi.

Çizelge 4.5 : KK numunelerinin kapiler ağırlık sonuçları.

KK numunelerinin ağırlıkları			
Geçen süre	Q1(g)	Q2(g)	Q3(g)
0 dk	2314,9	2283,7	2307,7
15 dk	2331,8	2299,1	2319,1
30 dk	2337,0	2303,7	2322,9
60 dk	2343,6	2309,8	2328,1
90 dk	2347,5	2313,5	2331,0
135 dk	2351,6	2317,4	2335,6
180 dk	2354,9	2320,8	2339,5
210 dk	2357,6	2323,6	2342,3
255 dk	2360,0	2326,0	2344,7
1440 dk	2386,3	2352,3	2370,7

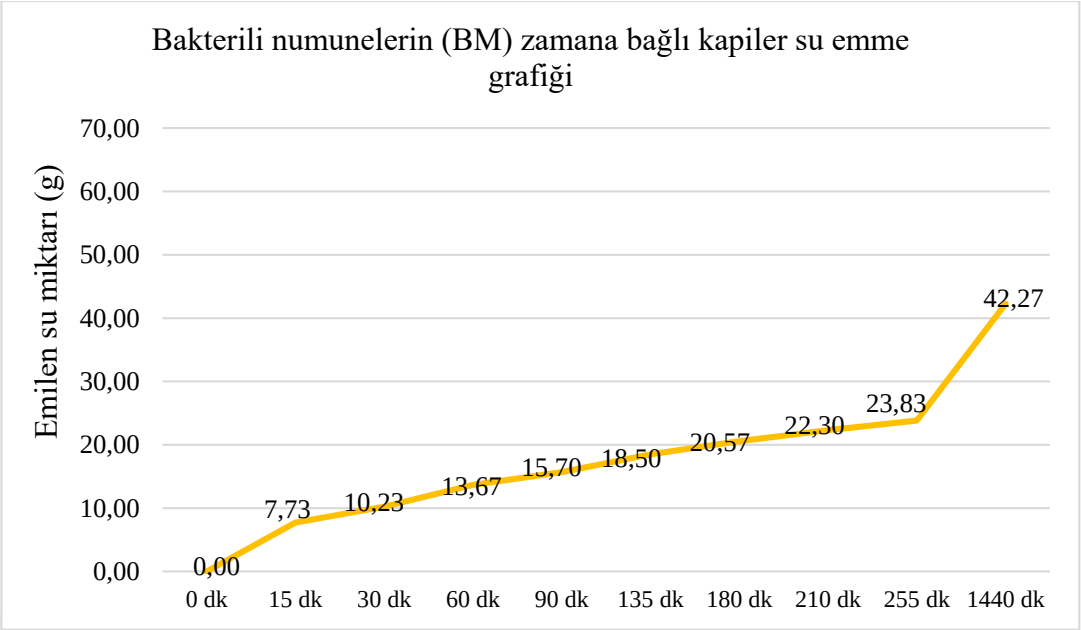


Şekil 4.6 : KK numunelerine ait kapiler su emme grafiği.

Aynı işlemler BM numuneleri içinde tekrarlanmıştır. Çizelge 4.6' da numunelerin su emme değerleri zamana bağlı olarak tablolanmıştır. Şekil 4.7 bu çizelgede bulunan değerlerden türetilmiştir.

Çizelge 4.6 : BM numunelerinin kapiler ağırlık sonuçları.

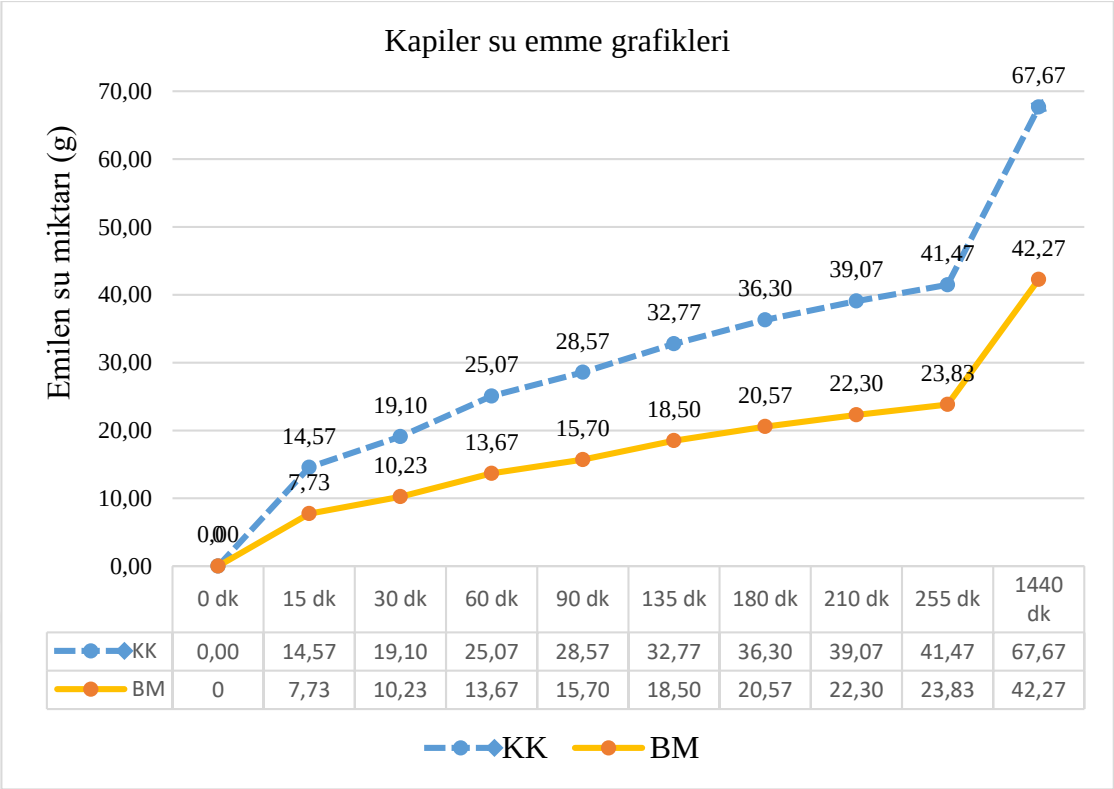
BM numunelerinin ağırlıkları			
Geçen süre	Q1(g)	Q2(g)	Q3(g)
0 dk	2330,2	2357,7	2324,0
15 dk	2337,6	2365,3	2332,2
30 dk	2340,3	2367,7	2334,6
60 dk	2343,6	2370,5	2338,8
90 dk	2345,8	2372,2	2341,0
135 dk	2348,5	2375,1	2343,8
180 dk	2350,7	2377,0	2345,9
210 dk	2352,4	2378,7	2347,7
255 dk	2354,0	2380,2	2349,2
1440 dk	2372,2	2398,4	2368,1



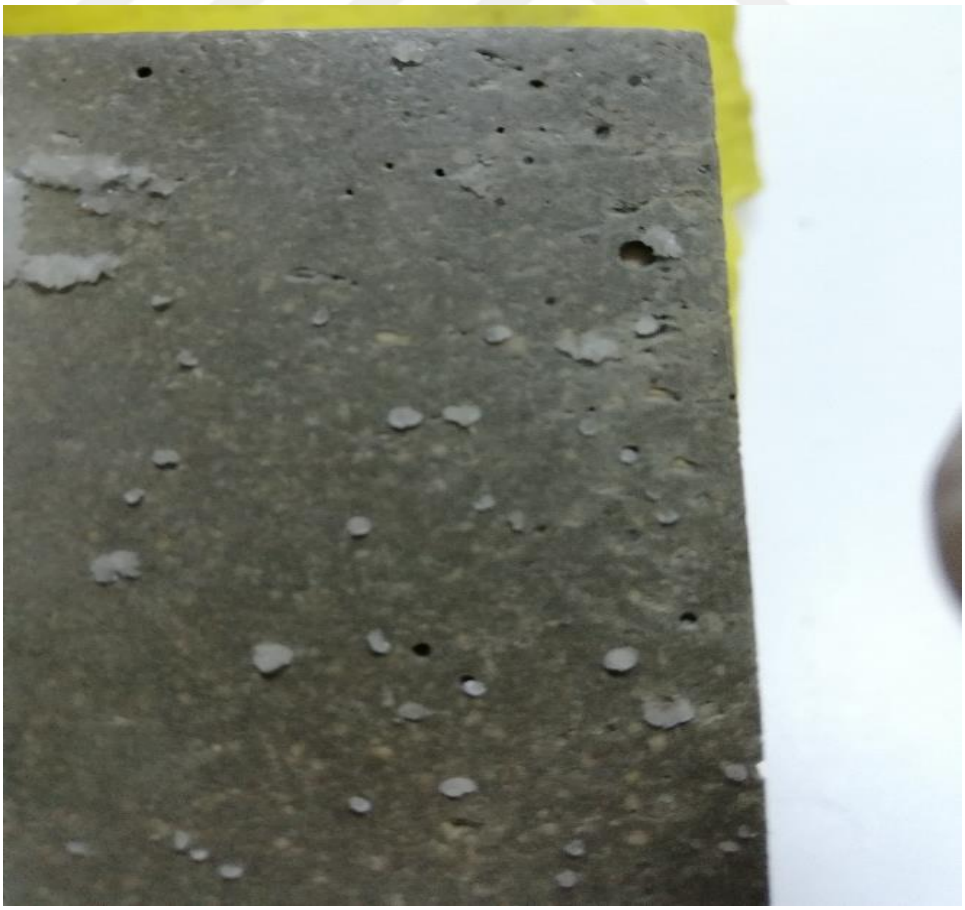
Şekil 4.7 : BM numunelerine ait kapiler su emme grafiği.

Şekil 4.8'de görülen çizgiler arasındaki değerler incelendiğinde aralarındaki emilen su farkının düşüşü gözlenebilir. KK ve BM numuneleri arasındaki su emme farkı ilk tartım olan 15. dakika bile yarı yarıyayken, ilerleyen dakikalarda da BM numuneleri %50 oranında daha az ağırlık artışına sahip olmuştur. 1440 dakikanın sonunda ise numunenin %37.53 oranında daha az su emmediği gözlemlenmiştir. Bu etkinin nedeni ise bakterinin betonun içindeki kılcal çatlakları da doldurarak geçirimliliği azaltması olarak gösterilebilir. Oluşan $CaCO_3$ betonun yüzeyinden itibaren içyapısında oluşarak daha sıkı ve yoğun bir malzeme meydana gelmiş olur. Bu konuda yapılan diğer araştırmacılar da bu çalışmada bulunan sonuçlarla benzer değerler elde etmişlerdir. Şekil 4.9'da beton yüzeyinde oluşmuş $CaCO_3$ oluşumları görülebilmektedir.

Achal'ın 2011 yılında yaptığı çalışmada, harç yüzeyinde ve gözeneklerinde mikrobiyal $CaCO_3$ oluşumu sonucu, porozitede azalma gözlemlemiştir. Buna bağlı olarak, su geçirgenlik testinde, örneklere üst yüzeyden uygulanan sıvının kontrol gruplarında 33-41 mm kadar ilerlediğini, deney gruplarında ise 9-20 mm'e kadar ilerleyerek sabitlendiği gözlemlenmiştir. Yapılan çalışma sonucunda da daha az su emmesi, daha az kılcallık ve geçirgenlik olduğunu kanıtlar. Achal'ın 2013 yılında yaptığı çalışmada da %50 geçirgenliğinin azaldığı belirlenmiştir.



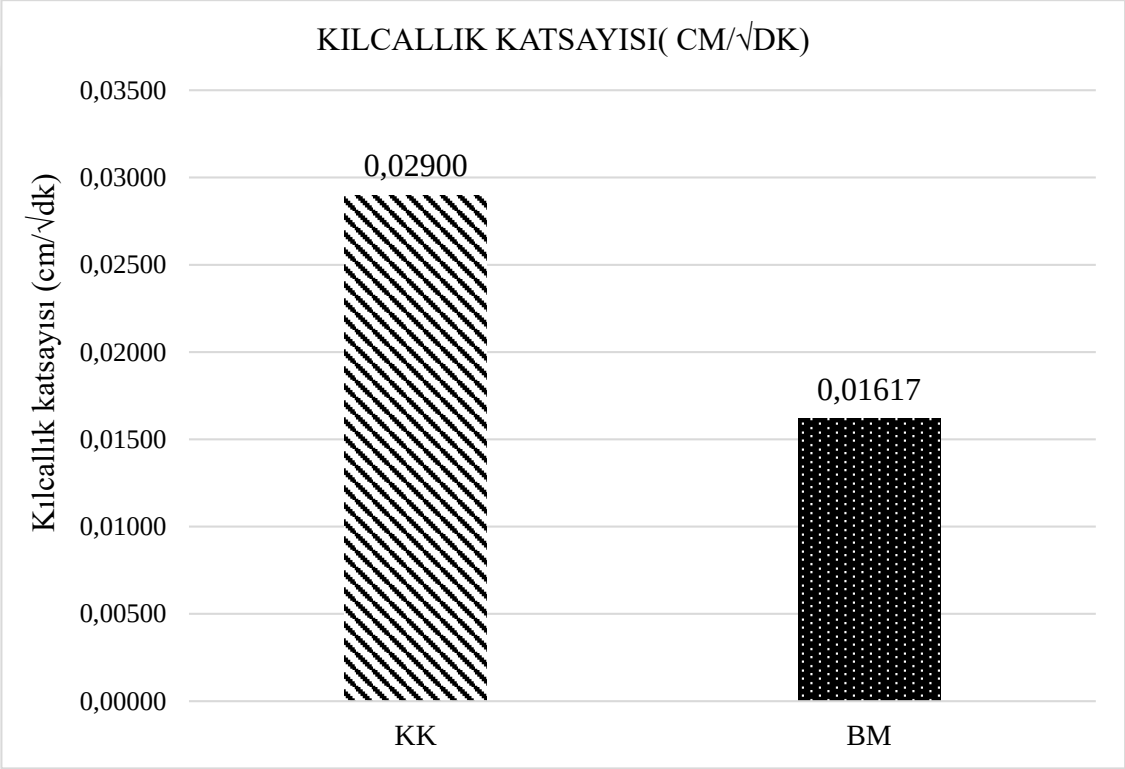
Şekil 4.8 : KK ve BM kapiler su emme grafikleri.



Şekil 4.9 : Yüzeyinde ve gözeneklerinde $CaCO_3$ oluşmuş bir BM örneği.

Çizelge 5 ve Çizelge 6'daki ağırlık artışları ve numune ağırlıkları göz önüne alarak tüm ölçümlerin ortalama kılcallık katsayıları hesaplanmıştır.

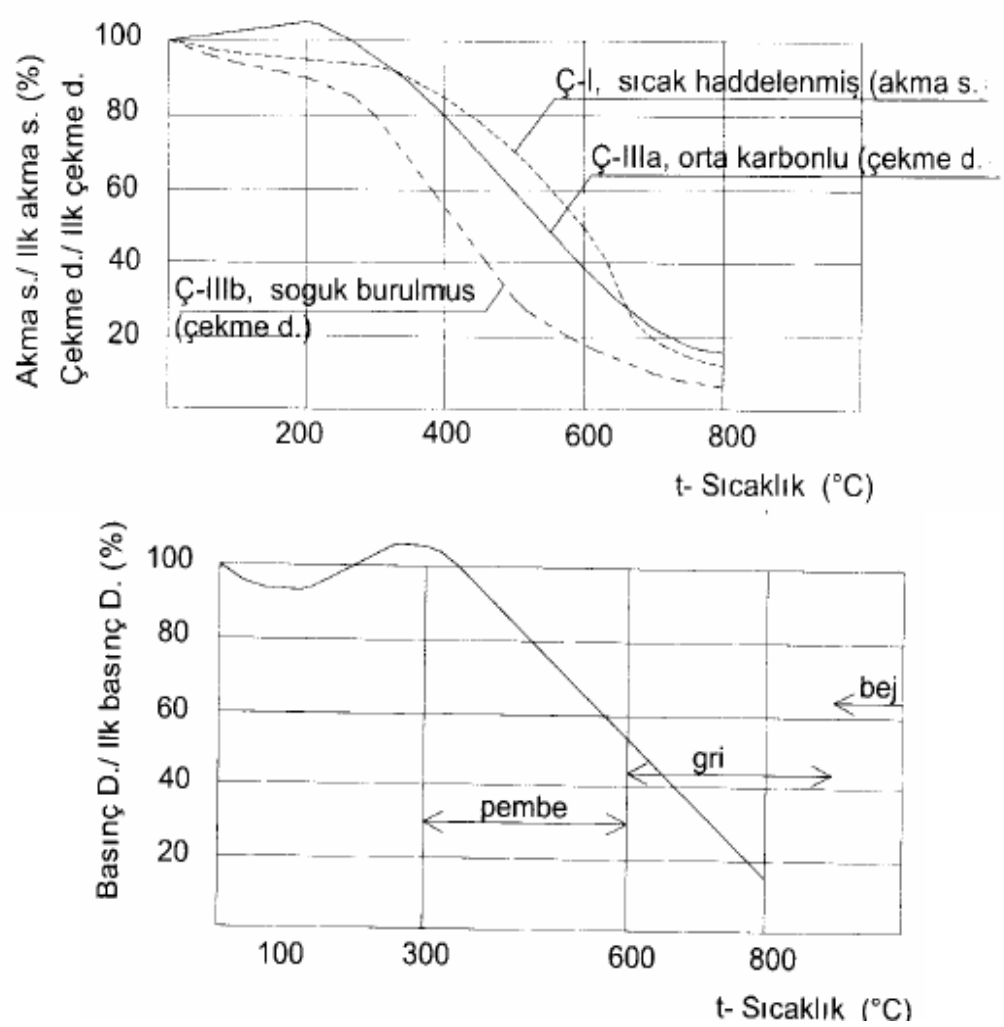
Şekil 4.9'da beton yüzeyinde beyaz rengiyle dikkat çeken $CaCO_3$ oluşumlarının etkisi kılcallık katsayısı grafiğinde açıkça görülmektedir. Taban yüzeyinde de oluşan bu yapılar betonun geçirimsizlik özelliğini arttırmaktadır. Bu durum, betonun yüzeyindeki gözenekleri ve kılcal yolları kapatmasıyla gerçekleşmiştir. Şekil 4.10'da görülen değerler incelendiğinde kılcallık katsayısının %44.2 azaldığı görülmektedir. Bu düşüş değerinden yola çıkılarak bakteri katkısının oluşturduğu MICP süreci sonunda oluşan $CaCO_3$ yapısının 2 kat daha geçirimsiz bir beton ürettiği söylenebilir.



Şekil 4.10 : Yüzeyinde ve gözeneklerinde CaCO3 oluşmuş bir BM örneği.

4.4 Yüksek Sıcaklık Deneyi

400 ℃ betonarme donatısının akması açısından önemli bir değer olduğu seçilmiştir. "Eurocode 4- Part 1,2 : Structural Fire Design " standardında, beton yapılarının 2 saat boyunca 400 ℃ ye dayanması gerektiği belirtilmiştir. Şekil 4.11' de çelik ve betonun değişik sıcaklıklar altında gösterdiği davranışlar görülmektedir.



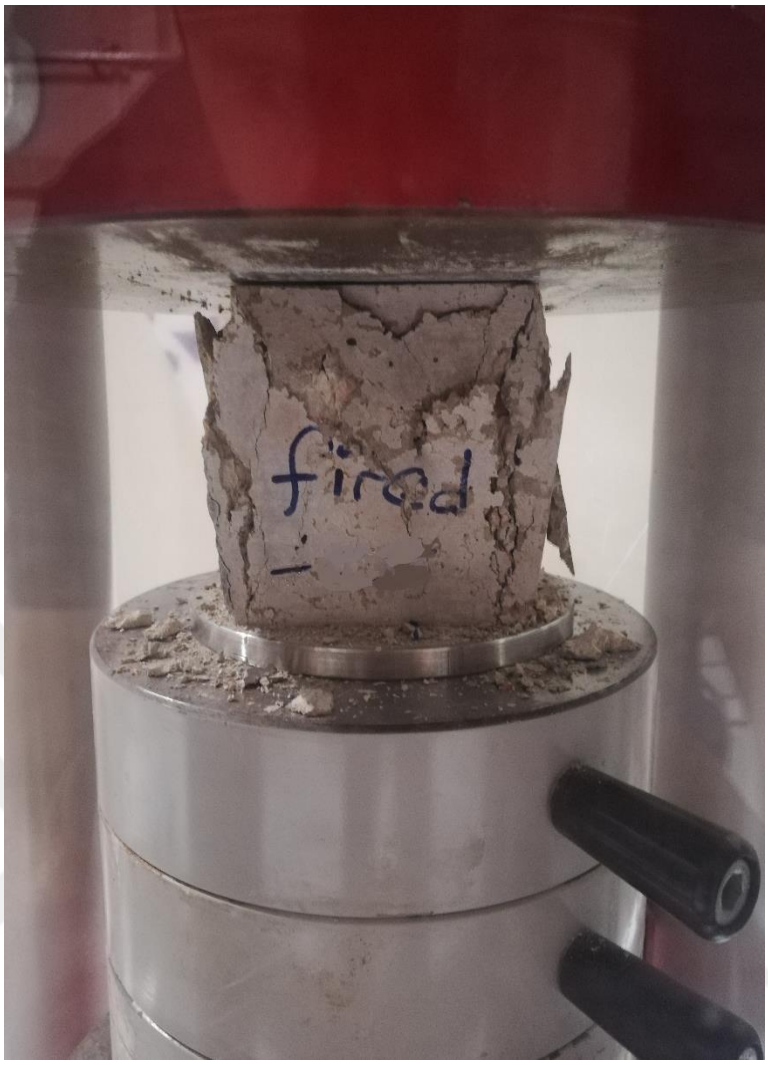
Şekil 4.11 : Betonarme çeliği ve betonun yüksek sıcaklık etkisi altındaki davranışı (Arda ve Yardımcı, 1995).

Fırından çıkarılan numuneler basınç dayanımı presi kullanılarak kırılmıştır. Çizelge 4.7' de kırım sonuçlarına yer verilmiştir.

Çizelge 4.7 : KK ve BM numunelerinin yüksek sıcaklık sonrasındaki dayanımları.

Yüksek sıcaklık etkisine maruz kalmış numunelerin basınç dayanımı değerleri (MPa)			Ortalama (MPa)
	1.numune	2.numune	
KK-28 günlük	34,39	33,06	33,72
BM-28 günlük	38,25	38,48	38,36

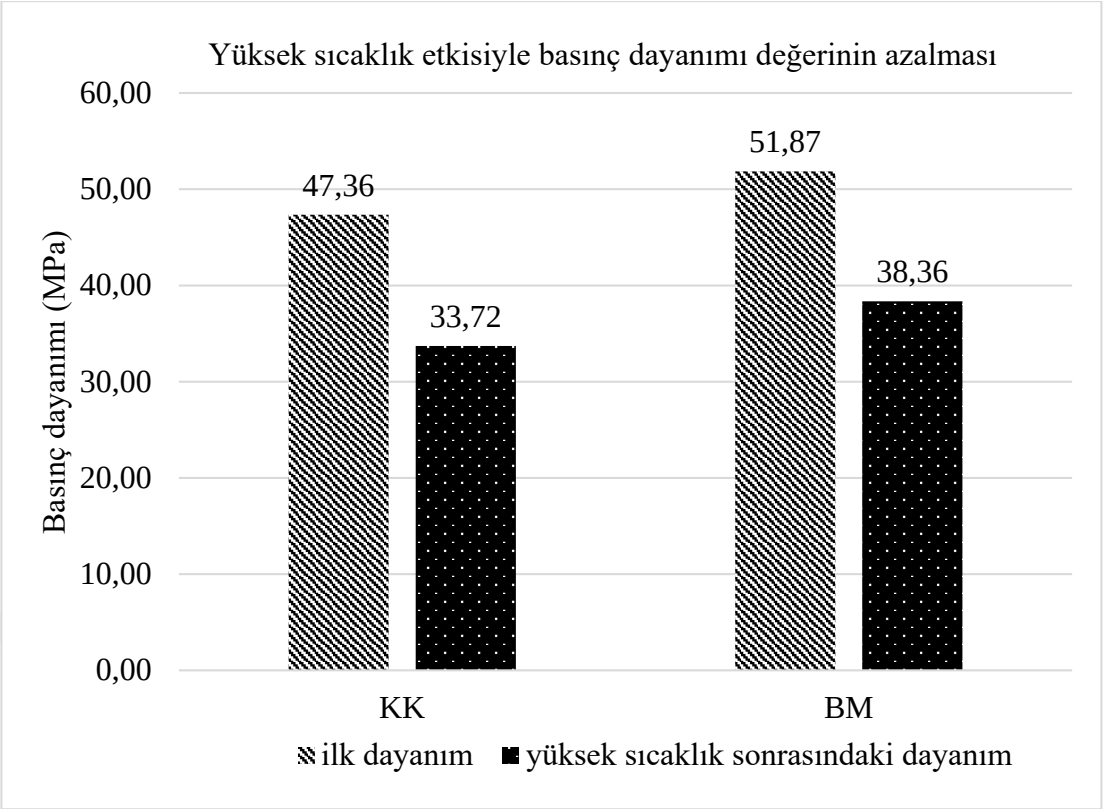
Şekil 4.12' de görüldüğü şekilde kırılarak yüksek sıcaklık etkisi sonrasındaki basınç dayanımları elde edilen numuneler, 28 günlük normal şartlarda kırılmış beton numunelerinin basınç dayanımları ile kıyaslanmıştır.



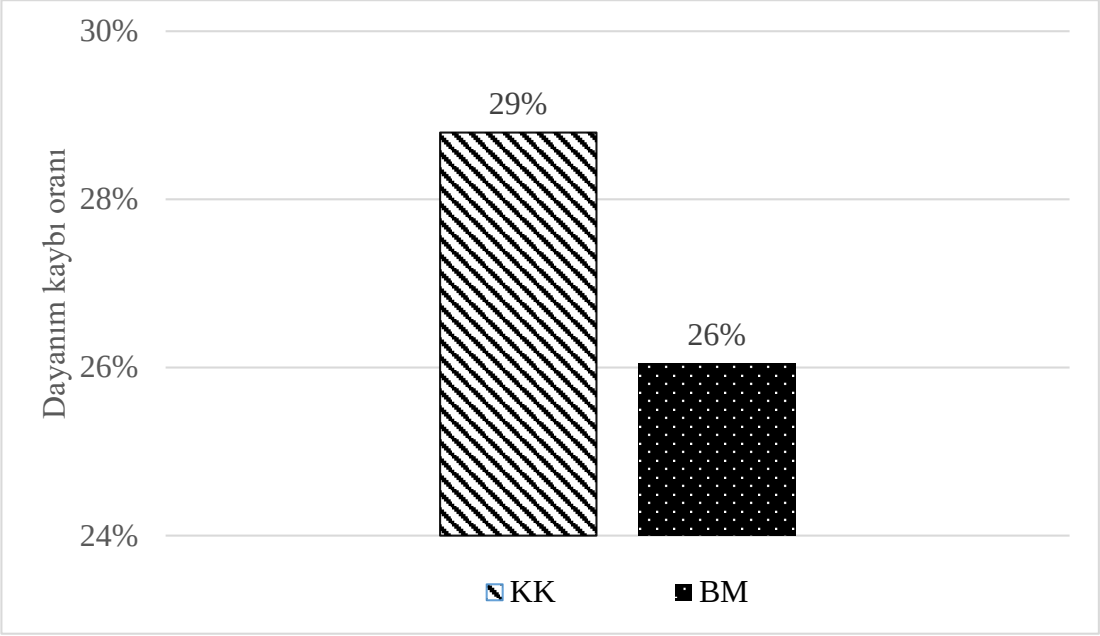
Şekil 4.12 : Kül fırınından çıkmış bir numunenin basınç dayanımının ölçülmesi.

Şekil 4.13 incelendiği takdirde yüksek sıcaklığın numunelerde ciddi bir dayanım düşüşüne neden olduğu görülmektedir. Şekil 4.14' de verilen oranlara bakıldığında KK numunelerinde %29 azalma, BM numunelerinde ise %26 olarak yaşanmıştır. Sonuçlar, birbirleriyle kıyaslanırsa; BM numuneleri KK dayanımlarına göre %13.78 daha fazla dayanım göstermiştir.

Tamamen eşit şekilde üretilen KK ve BM numunelerinde sadece MICP sayesinde kalsitleşme yaratılarak %13.78 oranında yüksek sıcaklığa karşı daha dayanıklı bir beton üretimi gerçekleştirilmiştir. Oluşan $CaCO_3$ yapısı betonarme içerisindeki donatıdan çok daha yüksek sıcaklıklarda bozulmaya başlayan bir yapıdır. Bu sebeple beton içinde üretiminin ısıya karşı dayanımda faydası görülmüştür.



Şekil 4.13 : Yüksek sıcaklığın numuneler üzerinde yarattığı basınç dayanımı düşüşü.



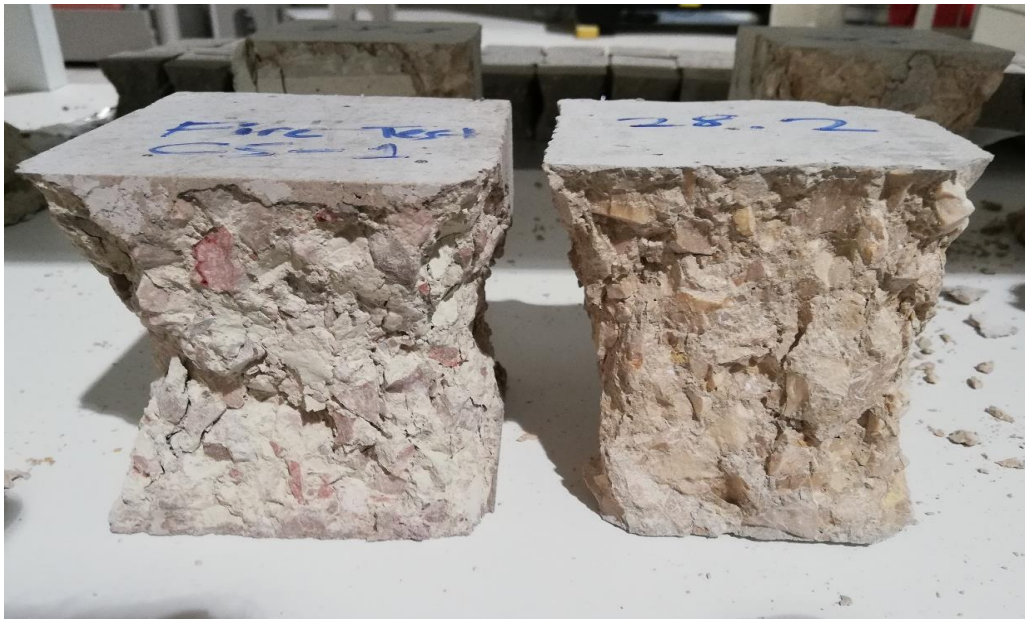
Şekil 4.14 : Basınç dayanım kaybı yüzdeleri.

Yüksek sıcaklık etkisiyle bozulmaya sebep olacak kadar yüksek ısıya çıkıldığına kanıt olarak kırılmış numunelerin agrega renklerine bakılabilir. Örneğin renk, pembe veya kırmızı ise sıcaklığın 300-600°C'ye, gri ise 600-900°C'ye, sarımtırak bej ise 900-1000°C'ye yükseldiği ifade edilmektedir (Kızılkanat ve Yüzer,2008).

Şekil 4.15’ de kırılan numunelerin agregalarındaki pembelikler beklendiği gibi gözlemlenmiştir. Şekil 4.16’da normal ve yüksek sıcaklık etkisi sonrası kırılmış numunelerin yan yana gözlenebilen renk değişimi görülmektedir.



Şekil 4.15 : Yüksek sıcaklık etkisine maruz kalmış bir numunenin kırım sonrası rengi.



Şekil 4.16 : Yüksek sıcaklık etkisine maruz kalmış (sol) ve yüksek sıcaklık etkisine maruz bırakılmamış numunenin (sağ) kırım sonrası gözlenebilen renk farkı.

4.5. Asit Dayanıklılık Deneyi

Portland çimentosuyla imal edilen betonu, asit içinde durabilite testine tabi tutan birçok çalışma yapılmıştır. Ancak biyo-betonlar üzerinde yapılan bu çalışmalar kısıtlı sayıdadır. Çalışmanın bu bölümünde bakteri katkılı üretilmiş beton ile normal portland çimentoyla imal edilmiş betonun durabilite özellikleri kıyaslanmıştır.

HCL (hidroklorik) asidi endüstri sularında en çok rastlanan kimyasallardan biri olduğu için tercih edilmiştir. HCL asidi, bilinen en etkili asitlerden biridir.

Beton içine nüfuz eden asit çimento pastasında parçalanmalara ve çözülmelere neden olur (Türkel ve diğ. 2007). Asidin beton içine nüfuz etmemesi için beton içine giren kılcal yollar ve gözeneklerin kapatılması gerekir. Bakteri tarafından oluşturulan kalsitleşme süreci sonunda meydana gelen $CaCO_3$ beton içinde filler malzeme gibi iş görerek bu boşlukları doldurabilir. Betondaki porozite değeri ile durabilite değerlerinin ters orantılı olması beklenir.

28 günlük KK ve BM numunelerinden 3'er adet kullanılmıştır. Şekil 4.17' da görüldüğü gibi tartıdan alınan numuneler %6 oranında HCL asidi içeren çözeltiye bırakılmışlardır. Çimentonun %90 oranında $CaCO_3$ içeren bir yapıya sahip olduğu bilinmektedir. Kullanılan bakterinin de $CaCO_3$ üretmesi sonucu betonun geçirimlilik özelliklerini azaltarak asidin beton içine daha az nüfuz etmesi beklenmektedir.



Şekil 4.17 : Asit çözeltisi içindeki beton numuneleri.

Belirlenen miktarda su kabın içine döküldükten sonra asit yavaş yavaş ilave edilmiştir. Bu işlem asit boğmak olarak bilinir. Beton numuneleri de çözelti içine bırakılarak 10 gün boyunca aside maruz bırakılmıştır.

Asit çözeltisinden çıkarılan numuneler 24 saat boyunca su dolu bir kap içinde tutulmuşlardır. Ardından etüvde 24 saat boyunca 105°C'de kurumaya bırakılmışlardır.

Fırından çıkarılmış numunelerin sıcaklığı oda sıcaklığına ulaşana kadar beklendikten sonra üzerlerindeki tozlar temizlendikten sonra tartılmıştır. Şekil 4.18'de asidin beton numunesine verdiği fiziksel tahribat gözükmektedir.



Şekil 4.18 : Asit etkisine maruz kalmış bir numunenin etüvlenmiş hali.

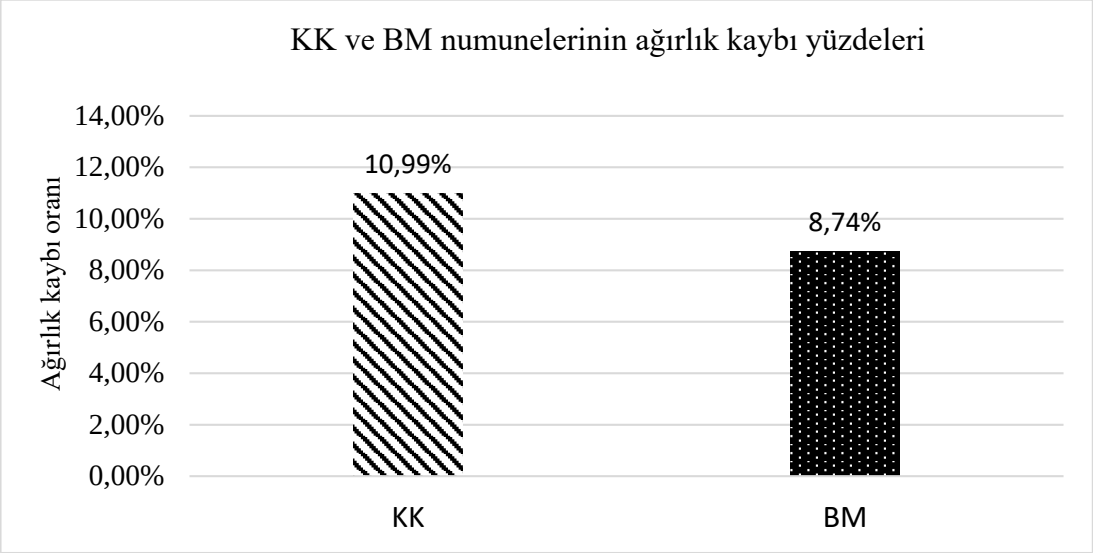
Çizelge 4.8' de numunelerin kuru ağırlıklarına ulaşıldıktan sonra asit öncesi ve sonrası ağırlıkları belirtilmiştir. Bu değerlerden yola çıkılarak asite karşı kaybettikleri kütlenin yüzdelik ağırlıkları hesaplanmıştır.

Çizelge 4.8: Asit etkisi maruz kalan numunelerin ağırlık kayıpları.

Numune Adı	İlk Ağırlık(g)	Son ağırlık(g)	Kaybedilen ağırlık (g)	Kaybedilen ağırlık (%)
KK-1	2311,8	2050,6	261,2	11,30
KK-2	2281,4	2037,7	243,7	10,68
KK-3	2304,9	2051,3	253,6	11,00
BM-1	2329,0	2115,2	213,8	9,18
BM-2	2356,0	2172,2	183,8	7,80
BM-3	2322,6	2108,1	214,5	9,24

Şekil 4.19'da görüldüğü üzere BM numuneleri %8,74 oranında ağırlık kaybederken KK numuneleri ağırlıklarının %10,99 unu kaybetmiştir. Bu değerler betonun kendi ağırlığı içinde oransal değerler olduğu için durabilite açısından büyük önem taşır. Bakterinin numuneler üzerindeki etkisi açıkça görülmektedir. BM numuneleri KK

numunelerine göre %20,47 oranında dış etkilere karşı daha dayanıklı hale gelmiştir. $CaCO_3$ yapısının oluşumu beton yüzeyinde daha dolu ve daha geçirimsiz bir tabaka yaratarak asidin çimento harcıyla tepkimeye girmesini önlemiş ve harcı çözmesini engellemiştir. Daha önce bakterili beton üzerinde asit deneyi yapılan çalışmalarda da bakteri sonucu kalsit oluşumunun aside karşı durabilite değerlerini arttırdığı ve ağırlık kayıplarının azalttığı sonuçlarına varılmıştır (Andalib ve diğ. 2014; Ridha ve diğ. 2018).



Şekil 4.19 : KK ve BM numunelerinin ağırlık kaybı yüzdeleri.

Numunelerin ağırlık kayıpları ölçüldükten sonra basınç dayanım değerlerini belirlemek amacıyla preste kırılmıştır. Çizelge 4.9' da verilen asit testinden sonraki ulaşılan değerlerde bakteri sayesinde oluşturulan $CaCO_3$'ın betona kattığı durabilite ve geçirimsizlik etkisi görülebilir.

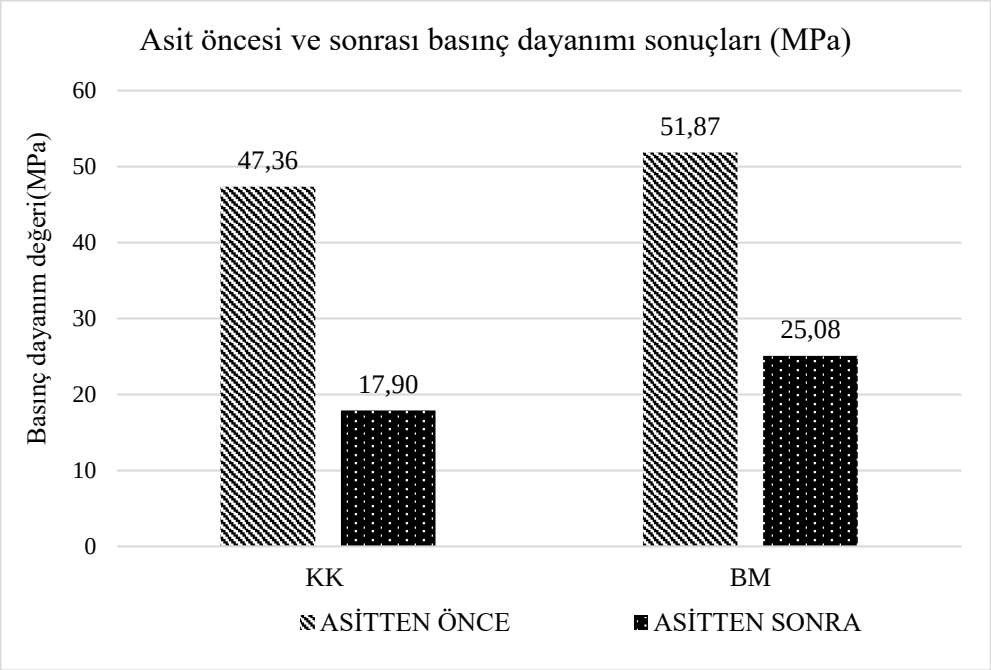
Çizelge 4.9 : KK ve BM numunelerinin asit deneyinden sonraki basınç dayanımları.

Numune Adı	KK (MPa)	BM (MPa)
1	19,85	24,44
2	17,74	22,35
3	16,10	28,45
Ortalama	17,90	25,08

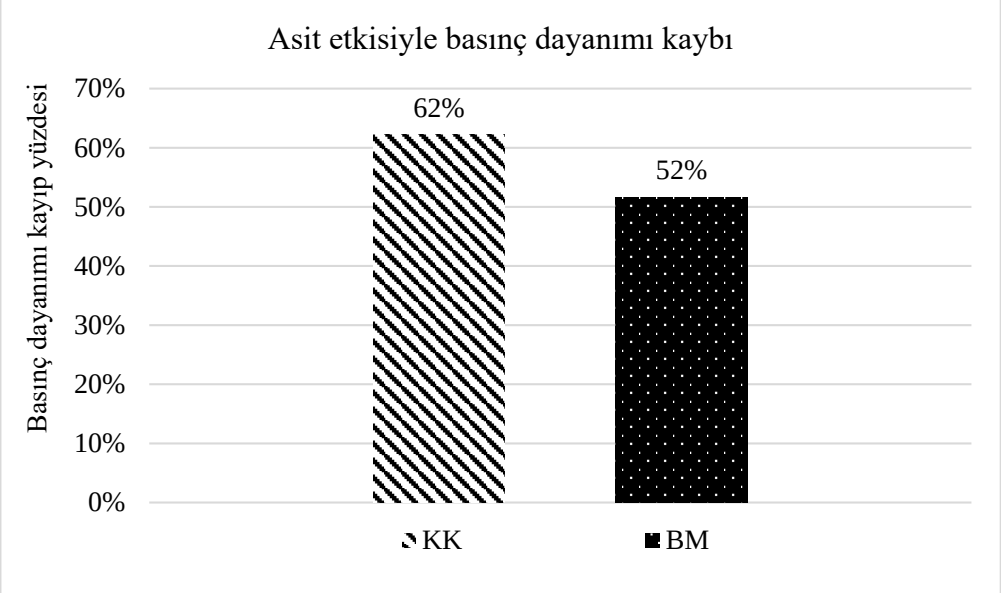
Şekil 4.20 de görüldüğü üzere ilk dayanım değeri 47,36 MPa olan KK numuneleri %62 azalma göstererek 17,90 MPa değerine düşmüştür. BM numuneleri ise %52 oranında azalma göstermiştir. Bakteri katkılı betonlar asidin beton içyapısına geçmesini

engelleyerek betonun dayanımını korumasını sağlamıştır. BM numunesinin basınç dayanımı değeri KK numunesine oranla %40.11 daha yüksek çıkmıştır. Diğer bakterinin asit karşısında basınç dayanımı değerleri inceleyen çalışmalarda da bakterili numunelerin basınç dayanımı değerleri yüksek çıkmıştır (Andalib ve diğ. 2014; Ridha ve diğ. 2018).

Şekil 4.21'de ise BM numunelerinin aside karşı daha az kayıp yaşadığı görülmektedir.



Şekil 4.20 : KK ve BM numunelerinin basınç dayanımlarına asit etkisi.



Şekil 4.21: KK ve BM numunelerindeki asit etkisiyle basınç dayanımı düşüşü.

4.6.Mikrobiyal Kalsitleşme Etkisiyle Beton Çatlaklarının Kapatılması

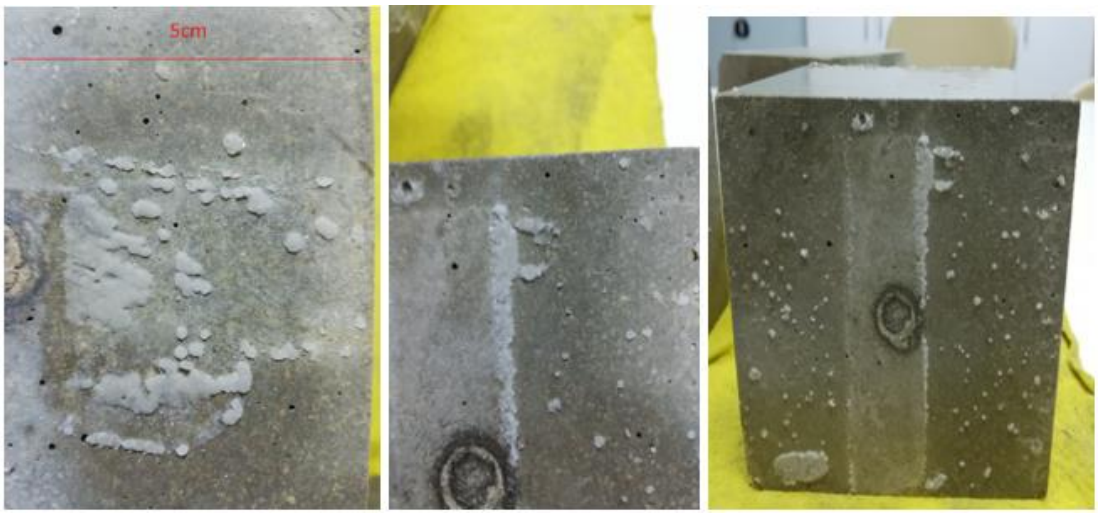
Bölüm 1.1' de MICP süreci anlatılmıştır. Bu süreç sonunda oluşan $CaCO_3$ 'ın oldukça geniş bir kullanım alanı vardır. Bu kullanım alanlarından en efektif olanlarından biri beton çatlaklarını kapamaktır. Beton çatlaklarının günümüzde büyük sorunlar oluşturduğu düşünülürse MICP süreciyle çatlak kapamanın önemi daha net anlaşılabilir. Dünya üzerindeki inşa edilmiş yapıların %80'i betonarme yapıdır. Çatlakların oluşması bu sebeple betonarme çeliğinin korozyona uğramaması açısından da önemlidir (Josh ve diğ. 2017).

0.2 mm altındaki çatlakların hali hazırda beton dayanımına herhangi bir olumsuz etkisi yoktur. Ancak geçirimlilik ve durabilite gibi özelliklere olumsuz etkisi vardır. Belirgin şekilde belli olan çatlakların olumsuz etkilerini önlemek amacıyla tamir işlemi acilen uygulanmalıdır.

Silva ve diğ. (2015), yaptığı çalışma da Amerika'da piyasasında çatlak onarımı işleminin 1 m^3 beton için 147 dolara denk geldiğini, aynı bölgede 1 m^3 beton üretiminin 65 dolarla 85 dolar arasında olduğunu belirtilmiştir.

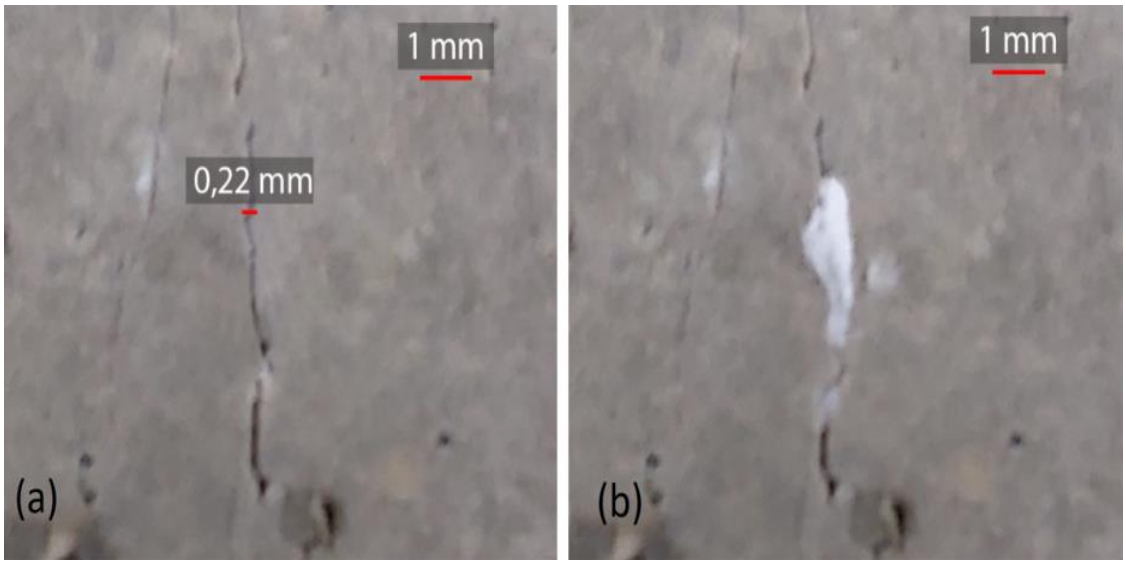
7 gün kür işlemine tabi tutulan bakterili numuneler basınç dayanım presi yardımıyla mikro çatlak oluşturacak şekilde kırılmıştır. Çatlakların boyutları ortalama 0.1 mm-0.40 mm arasındadır. Çatlaklar oluşturulduktan sonra bakteri ve besi içeren suya geri bırakılarak 28 gün boyunca beklenilmiştir. Bu sırada hiç çatlak oluşturulmamış numunelerde aynı besiyer içerisine bırakılmıştır. Bu betonların yüzeyinde $CaCO_3$ oluşumu gözlemlenmesi ve çatlakların bu yapıyla kapanmasını görmek amaç edinilmiştir.

Şekil 4.22 incelendiği takdirde görülecektir ki beton yüzeyinde çok sayıda ve miktarda kalsit yapıları oluşmuştur. Oluşan bu yapılar oldukça sert yapılı olup, elle verilen küçük tahribatlara karşı dahi yüzeyden ayrılmamıştır. Oluşumlar çıplak gözle gözlenebilir düzeydedir.

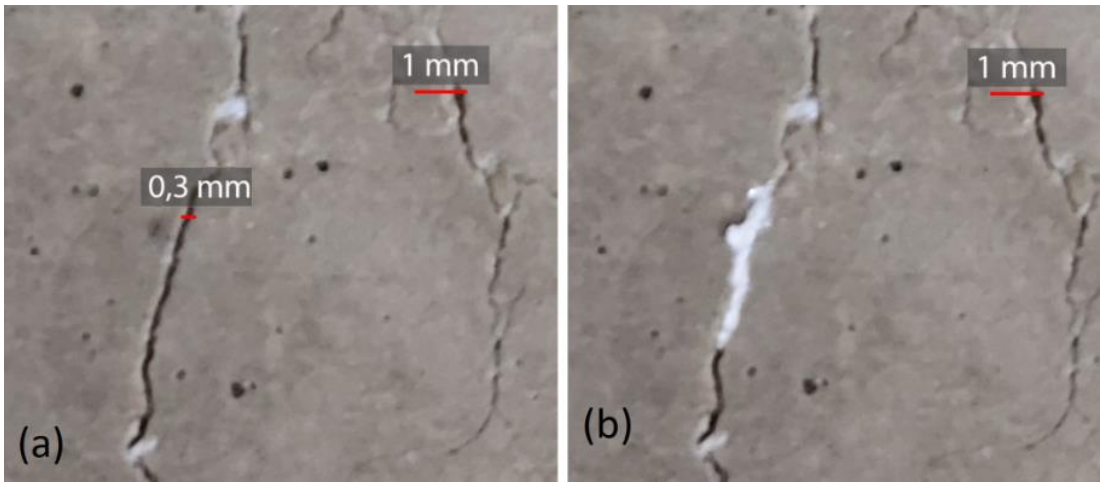


Şekil 4.22 : Beton yüzeyindeki $CaCO_3$ oluşumları.

Çatlak kapaması sürecinde ise başarılı sonuçlar elde edilmiştir. Bakterilerin maksimum 0.22 mm ve 0.30 mm genişliğindeki çatlakları kapadığı görülmüştür. Şekil 4.23 ve Şekil 4.24' de çatlak kapamasının ardından sıradan bir fotoğraf makinesiyle çekilmiş görüntüleri verilmiştir. İki şekilde de (a) şıkları bakteri etkisinden önceki hallerini, (b) şıkları 28 gün bakteri etkisine maruz kalmış çatlakların son hallerini temsil eder. Daha önce yapılan çalışmalarda da benzer sonuçlar elde edilmiştir. Sonuçlar bakteri türüne göre değişse de yakın değerlerdir. Xu J ve Yao W (2014), yaptıkları çalışmada bakteri sayesinde 0.1 -0.4 mm arasında çatlaklar iyileştirilmiştir. Wiktor ve Jonkers (2011), 0.18 mm ye kadar çatlakları bakteri katkısıyla kapamayı başarmışlardır.



Şekil 4.23 : 0,22 mm genişliğindeki çatlağın $CaCO_3$ ile kapatılması.



Şekil 4.24 : 0,3 mm genişliğindeki çatlağın $CaCO_3$ ile kapatılması.

Bu tezde de bu bilgilerle çok yakın doğrultuda sonuçlar elde edilmiştir. $CaCO_3$ maddesi çatlaklarda daha fazla oluşma eğilimi göstermiştir.

Bakterilerin öncelikli olarak neden çatlaklarda oluştuğu da önemli bir meseledir. Jonkers ve diğ. (2010), yaptıkları çalışmada H_2O (su) ve O_2 (oksijen molekülü) 'nin oluşan çatlaklardan kapiler yolla daha iyi ilerlediğini ve bu sayede buradaki bakteriler için daha iyi şartlar oluştuğunu belirlemişlerdir. Bu daha iyi şartlar sayesinde buradaki bakteriler mikrobiyal enzimlerini kullanarak $CaCO_3$ oluşturdukları sonucuna varmışlardır.

5.SONUÇ VE ÖNERİLER

5.1 Deneysel Süreç Sonunda Ulaşılan Sonuçlar

Bu tez boyunca, ulaşılan sonuçlar aşağıda verilmiştir.

Basınç dayanımı deneylerinde 7 gün sonunda BM numuneleri KK numunelerine kıyasla %5.07 artış göstermiştir. 28 gün sonundaki artış miktarı ise %9.54'dür. 28 günlük basınç dayanımı deneyinde KK, BM, CB olmak üzere 3 tip beton numunesi hazırlanmıştır. 28 gün basınç dayanımı deney sonucunda bakteri katkılı olan numune %9.54 daha fazla dayanım göstererek en yüksek dayanımı göstermiştir. Sadece bakterili suda kürlenen katkısız numune CB ise kontrol numunelerine kıyasla %3.01 daha fazla dayanım göstermiştir. Bu sonuçlardan yola çıkarılarak bakterinin beton karışım suyuna karıştırılarak kullanılmasının daha efektif olduğu sonucuna varılmıştır. Beton bünyesine karıştırılan bakteri katkısı beton içinde daha düzgün yayılması sonucu daha çok boşluğu kapatarak içyapısının daha sıkı olmasını sağlamıştır. Bunun sonucunda en yüksek dayanım BM numunelerinde elde edilmiştir.

Yapılan su emme deneylerinde ilk olarak ağırlıkça su emme değeri incelenmiştir. Deneylerde KK ve BM numuneleri kullanılmıştır. KK numuneleri ağırlığının %4.87 si kadar su emerken, BM numuneleri ağırlığının %4.22 si kadar su emmiştir. Bu da göstermektedir ki beton içinde $CaCO_3$ oluşumları meydana gelip daha az su emen bir yapı oluşturmuştur. Su emme deneyinin ikinci kısmında numunelerin hacimsel olarak su emme yüzdeleri ölçülmüştür. KK numuneleri hacimlerinin %10.68'i kadar bünyelerine su alabilirken bu değer BM numunelerinde %9.41 e düşmüştür.

$CaCO_3$ oluşumlarının beton bünyesinde oluştuğu ve su emme oranlarını azalttığı görülmüştür. Bu oluşumların varlığını kanıtlamak amacıyla, beton özgül ağırlığı deneyleri de yapılmıştır. KK numunelerinin özgül ağırlığı deneyleri 2.30 bulunurken BM numunelerinin özgül ağırlığı 2.32 olarak tayin edilmiştir. Özgül ağırlık boşluksuz hacmin ağırlığı olduğu için $CaCO_3$ olduğu ağırlık olarak da kanıtlanmıştır.

Kılcallık değerlerini tayin etmek amacıyla yapılan kapiler su emme deneyinde; 5, 30, 60, 90, 135, 180, 210, 255 ve 1440 dakika periyotlarında emilen su miktarı

ölçülmüştür. Bu periyotlardaki su emme değerleri kıyaslandığında BM numunelerinin kılcallık değerinin KK numunelerine oranla %44.2 azaldığı tespit edilmiştir. Bu değer bakteri katkısının numuneleri dışarıdan gelecek sızıntılara karşı %442 daha az geçirimli yaptığı anlamına gelmektedir.

Üretilen beton numunelerinin yüksek sıcaklığa olan dayanımlarını ölçmek amacıyla yapılan deney sonucunda, 28 günlük ve yüksek sıcaklık etkisine maruz kalan KK numunelerinin 33.72 MPa, BM numunelerinin 38.36 MPa basınç dayanım değeri bulunmuştur. Bu değerler kıyaslandığında BM numunelerinin KK numunelerine kıyasla %13.78 daha yüksek basınç dayanımı değerine sahip olduğu görülmüştür. İlk dayanım değerlerine göre KK %29 azalırken, BM numuneleri ise %26 azalma göstermiştir. Deney sonucunda beton içinde kalsit oluşumunun ısıya karşı betonu daha fazla bir arada tutma yeteneğinin olduğu saptanmıştır. Oluşan $CaCO_3$ yapılarının yüksek ısı dayanımı özelliğini beton içinde gösterdiği görülmüştür.

Asit etkisi maruz bırakılmış numunelerin basınç dayanımı sonuçlarında KK numunelerinin basınç dayanımı değeri 47.36 MPa'dan %62 oranında azalma göstererek 17.90 MPa düşmüştür. BM numunelerinin asit etkisi deneyi öncesindeki ortalama basınç dayanımı 51.87 MPa' dan %52 azalma göstererek 2508 MPa 'a gerilemiştir. Deney sonunda BM numunelerinde 25.08 MPa gibi bir değer elde edilmişken KK da sadece 17.90 MPa değeri elde edilmiştir. BM numunelerinin basınç dayanım değerleri %40.11 oranında daha yüksek çıkmıştır. Yapıda oluşan $CaCO_3$ yapısı asidin betonun içyapısına sızmasını engelleyerek beton dayanımı değerlerini korumasını sağlamıştır. İçyapısına sızmasını engellemesinin yanında yüzeyinde de oluşması nedeniyle betonun asit karşısında kaybettiği ağırlık değerlerini de azaltmıştır. KK numuneleri 10 gün aside maruz kalmanın ardından ağırlığının %10.99'unu kaybetmiştir. Bu değer BM numunelerinde %8.74 olarak bulunmuştur. Asidin çimento harcını çözerek ağırlık kaybı yaşamasını engelleyen mikrobiyal kalsit oluşumu betonun durabilite özelliğini geliştirdiği sonucuna varılmıştır.

Bakteri katkısı kullanılarak $CaCO_3$ oluşturarak çatlakları kapanmasının incelenmesi için yarı çatlak hale getirilen numunelerde 28 gün sonunda iyileşmeler görülmektedir. Çeşitli genişlikte çatlaklar kapanmıştır. $CaCO_3$ oluşumuyla kapanan en geniş çatlak büyüklüğü 0.3 mm'dir. Şekil 4.25 ve şekil 4.26 'da iyileşen çatlakların görüntüleri verilmiştir. Kalsitleşme süreci sıvı içinde geçen 28 gün boyunca devam ederken kalsitleşmenin beton üzerinde oluşturulan çatlaklarda öncelikli olarak oluştuğu

gözlemlenmiştir. Çatlak olmayan numunelerde beton yüzeyinde çok sayıda kalsit yapısı oluşmuştur. Şekil 4.24' de oluşan kalsit yapılarının fotoğraf makinesiyle çekilmiş resimlerine yer verilmiştir.

5.2 Öneriler

Yapılan çalışma boyunca 10×10×10 cm boyutunda küp beton numuneleri kullanılmıştır. Bunun yanı sıra dikdörtgen prizması şeklinde numunelerde üretilerek çekme dayanımına bakteri etkisini araştırmak çatlak kapaması açısından faydalı olacaktır. Çünkü beton, çekme kuvvetlerine karşı oldukça dayanıksız ve çatlamaya müsaittir. Farklı beton sınıfları oluşturularak, kendi içlerinde bakteri etkisi kıyaslanabilir. Geçirgenlik deneyleri klor geçirgenliği gibi çeşitlendirilebilir. Bakteri katkılı şekilde betonarme numuneler üretilerek bakterinin $CaCO_3$ üretimi sonucunda korozyona olan etkisi incelenebilir. Bakterili numunelerin elastisite modülüne olan etkileri incelenebilir. İçyapıda oluşan $CaCO_3$ yapıları SEM taraması yapılarak incelenebilir. Yüksek sıcaklık deneyi daha yüksek sıcaklıklarda da uygulanarak $CaCO_3$'ın farklı sıcaklıklara verdiği tepkiler yangın dayanımı gözlemlenebilir.

KAYNAKLAR

Achal, V., Mukerjee, A., Reddy, M.S., (2013). Biogenic treatment improves the durability and remediates the cracks of concrete structures, *Construction and Building Materials, 48*, 1–5.

Achala, V., Pan, X., Özyurt, N., (2011). Improved strength and durability of fly ash-amended concrete by microbial calcite precipitation, *Ecological Engineering, 37*, 554-559.

Alazhari, M. (2017). *The effect of microbiological agents on the efficıency of bio-based repair systems for concrete*. (Doktora Tezi). Bath Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Büyük Britanya.

Andalib, R., Majıd, M.Z.A., Hussın, M.W., Ponraj, M., Keyvanfar, A., Mirza, J., Lee, H., (2016). Optimum concentration of *Bacillus megaterium* for strengthening structural concrete, *Construction and Building Materials, 118*, 180–193.

Andalib, R., Majıd, M.Z.A., Keyvanfar, A., Talaıekhozan, A., Hussın, M.W., Shafaghat, A., Zın, R.M., Lee, C.T., Fulazzaky, M.A., H., (2014). Durability improvement assessment in different high strength bacterial structural concrete grades against different types of acids, *Sadhana*, *39* (6), 1509–1522.

Anonymous. (2001). *Hazır Beton El Kitabı*. İzmir, Türkiye: Batı Beton.

Arda, T.S. & Yardımcı, N., (1995). *Çelik Yapı Elemanlarının Yangın Mukavemeti*, Ders Notları, İTÜ, İstanbul.

Bhavana, R.S., Raju, P.P, Asadi, R.R. (2014). Experimental Study on Bacterial Concrete with Partial Replacement of Cement by Fly Ash, *International Research Journal of Engineering and Technology , 8*, 201–209.

Binaların Yangından Korunması Hakkında Yönetmelik, 2018, Ankara, Türkiye.

Candoğan, T. (2015). *Üreolitik Bakteriler İle Kalsiyum Karbonat Mineralizasyonu Ve Zemin İyileştirmede Kullanımı***,** Yüksek Lisans Tezi**,** Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Denizli.

Chahal, N. & Siddique, R. (2013**).** Permeation properties of concrete made with fly ash and silica fume: Influence of ureolytic bacteria, *Construction and Building Materials, 49*, 161–174.

Chahal, N., Siddique, R., Rajor, A. (2012). Influence of bacteria on the compressive strength, water absorption and rapid chloride permeability of fly ash concrete, *Construction and Building Materials, 28*(1), 351–356.

Chithra, P. & Varghese, B., (2016). An experimental investigation on the strength properties of fly ash based bacterial concrete, *International Journal of Innovative Research in Advanced Engineering*, 3(8), 64-69.

Cura, M., Jose P., Calvo, J.P., Eza,S., (2001). Petrographic and geochemical evidence for the formation of primary bacterially induced lacustrine dolomite, *Sedimentology, 48,* 897-915.

ÇED rehberi. (2009). Ankara: T.C. Çevre ve Orman Bakanlığı.

El-Enein ,S.A., Ali, A.H., Talkhan,F., Gawwad, H.A., (2013). Application of microbial biocementation to improve the physico-mechanical properties of cement mortar. *HBRC Journal, 9,* 36–40.

Emmons, P. (2006). Vision 2020: A strategic plan for improvements to the concrete repair industry, *Unpblished lecture,* BRE Garston.

Eurocode-4 , (2012). Part 1-2 Structural Fire Design According to Eurocodes, Brussels.

European Committee for Standardization (CEN). (1993). Brussels : CEN.

Faresin, A. (2012). Architettura in calcestruzzo Soluzioni innovative e sostenibilità, Utet ScienzeTecniche, *Utet Scıenze Tecnıche*, *44*, 100-111.

Flower, D. J. M. & Sanjayan, J. G. (2007). Green house gas emissions due to concrete manufacture, *The International Journal of Life Cycle Assessment, 12*(05) , 282-288.

Ganesh, N. & Siddiraju, S. (2016), Experimental study on strength and fracture properties of self-healing concrete, *International Journal of Civil Engineering and Technolog ,7*, 398–406.

Ghosh, P., Mandal, S., Chattopadhyay, B.D., Pal, S. (2005). Use of microorganism to improve the strength of cement mortar, *Cement and Concrete Research, 35*, 1980 - 1983.

Hall-Stoodley, L., Costerton, J.W., Stoodley, P. (2004). Bacterial biofilms: from the natural environment to infectious diseases, *Nature Review Microbiology, 2*, 95-108.

Ingle, P.K., Bhagat, V.S., Shrestha, P.M., Potdar, R.D., (2017). Effect of Bacteria on Partial Replacement of Cement with Rice Husk, *International Conference On Emanations in Modern Technology and Engineering*, *5*, 40-45.

Jonkers, H.M. & Schlangen, E. (2007). Self-healing of cracked concrete: A bacterial approach, *Cement and Concrete Research, 4,* 102-108

Jonkers, H.M. & Thijssen, A. (2010). Bacteria mediated remediation of concrete structures, *In Proceedings of 2nd International Symposium on Service Life Design for Infrastructure,* 83-92, Delft : The Netherlands,.

Khaliq, W. & Ehsan, M.B. (2016). Crack healing in concrete using various bio influenced self-healing techniques, *Construction and Building Materials, 102*, 349-357.

Kızılkanat, A. B. & Yüzer, N., (2008). Yüksek Sıcaklık Etkisindeki Harcın Basınç Dayanımı-Renk Değişimi İlişkisi, *Teknik Dergi, 92*(19), 4381 – 4392.

Krishnapriya, S. (2015). Isolation and identification of bacteria to improve the strength ofconcrete, *Microbiological Research, 174*, 48–55.

Kumar, B.G., Prabhakara, R., Pushpa, H. (2013). Effect Of Bacterial Calcite Precipitation On Compressive Strength Of Mortar Cube, *International Journal of Engineering and Advanced Technology*, *2*, 486-491.

Kurt, E.B. (2007). *Silis dumanının betonun durabilite özelliklerine etkisi*. (Yüksek lisans tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Marlowe, L. & Mansfield, D. (2002). Toward a Sustainable Cement Industry, *Health and Safety Performance Improvement, 1*, 155-210.

Meera, C.M. & Strength, S.V. (2017). Durability Assessment of Bacteria Based Self-Healing Concrete, *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering*, *1*, 01-07.

Muhammad, N.Z., Shafaghat, A., Keyvanfar, A., Majid, M.Z., Ghoshal S.K., (2016). Tests and methods of evaluating the self-healing efficiency of concrete: A review, *Construction and Building Materials*, *112*, 1123-1132.

Parmar, A., Patel, A., Shah, V., Khorasiya, S., Patel, D., (2013). Improvement on the concrete cracks by using Bacillus Pasteurii, *International Journal for Scientific Research & Development*, *1*, 82-84.

Pentalla, V. (1997). Concrete and sustainable development, *ACI Materials Journal, 94*(5),409-416.

Phillips, J. (2013). *Biofilm-induced calcium carbonate precipitatıon:application in the subsurface.* (Doktora tezi). Montana State Ünıversitesi, ABD.

Qıan, C., Luo, M., LI, R., Rong, H. (2015). Efficiency of concrete crack-healing based on biological carbonate precipitation, *Journal of Wuhan University of Technology-Mater Science*, *30*(6), 1255-1259.

Rajesh, V. & Venugopal, M. (2017). A Study On Mechanıcal Propertıes Of Bacterıal Concrete Usıng Fly Ash And Foundry Sand, *i-manager's Journal on Civil Engineering*, *71*, 21-27.

Ramachandran, S.K., Ramakrishnan, V., Bang, S.S., (2001). Remediation of Concrete Using Microorganisms, *ACI Materials Journal*, *98*(1), 3-9.

Reddy, S. & Satya. K. (2012). A Biological approach to enhance strength and durability in concrete structures, *International Journal of Advances in Engineering and Technology*, *4*(2), 392-399.

Ridha, A.S.D, Atshan, A.F., Taweel, M.H., Hussein, H.H., (2018), Evaluation of Compression Strength of Microbial Cement Mortar, *International Journal of Management Technology And Engineering*, *8*,1357-1364.

Seifan, M., Samani, M., Berenjian, A., (2016). Bioconcrete: next generation of self-healing concrete, *Application Microbiol Biotechnology*, *100*(6), 2591-2602.

Toydemir, N., Gürdal, E., Tanaçan, L. (2000). *Yapı Elemanı Tasarımında Malzeme*. İstanbul, Türkiye: Literatür Yayıncılık.

TS 3440 Betona zararlı etkileri olan su, zemin ve gazların değerlendirilmesi. (2010). Ankara, Türkiye: Türk Standartları Enstitüsü.

TS 706 EN 12620 Beton Agregaları ve deneyleri (2009)**,** Ankara: Türkiye. Türk Standartları Enstitüsü.

TS EN 12390-7, Beton - Sertleşmiş beton deneyleri - Bölüm 7: Sertleşmiş beton yoğunluğunun tayini, (2010). Ankara, Türkiye: Türk Standartları Enstitüsü.

TS EN 13501-3 Yapı mamulleri ve yapı elemanları - Yangın sınıflandırması (2009). Ankara, Türkiye: Türk Standartları Enstitüsü.

Türkel, S., Felekoğlu, B., Dulluç, S., (2007), Influence of various acids on the physico-mechanical properties of pozzolanic cement mortars, *Sadhana, 32*(6), 683-691.

Vekariya, M.S. & Pitroda, J. (2013). Bacterial Concrete: New Era For Construction Industry, *International Journal of Engineering Trends and Technology*, *4*(9), 4128-4136.

Vijay, K., Murmu, M., Deo, S., (2017). Bacteria based self healing concrete – A review, *Construction and Building Materials*, *152*, 1008–1014.

Wiktor, V. & Jonkers, H.M. (2011). Quantification of crack-healing in novel bacteria-based self-healing concrete, *Cement & Concrete Composites, 33*, 763–770.

Xu, J. & Yao, W. (2014), Multiscale mechanical quantification of selfhealing concrete incorporating non-ureolytic bacteria-based healing agent, *Cement & Concrete Composites*, *64*, 1–10.

Yıldırım, N., Gürtuğ, Y., Sesal, C., (2016). Mikrobiyal kalsiyum karbonat oluşum mekanizmaları ve uygulama alanları, *Marmara Fen Bilimleri Dergisi*, *2*, 70-80.

ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad **:** Musa YILDIRIM
Doğum Tarihi ve Yeri **:** 16.03.1993 / Osmangazi
E-posta **:** yildirim280@gmail.com

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2017, Sakarya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği bölümü