



**T.C.
BURSA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

**KAPSÜLLENMİŞ BAKTERİLER KULLANILARAK KENDİ KENDİNİ
İYİLEŞTİREBİLEN ÇİMENTO ESASLI KOMPOZİT ÜRETİMİ**

DOKTORA TEZİ

Musa YILDIRIM

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

İnşaat Mühendisliği Doktora Programı

EYLÜL 2024

**T.C.
BURSA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

**Kapsüllenmiş Bakteriler Kullanılarak Kendi Kendini
İyileştirebilen Çimento Esaslı Kompozit Üretimi**

DOKTORA TEZİ

Musa YILDIRIM

(19327470001)

ORCID: 0000-0001-7085-4819

**İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
İnşaat Mühendisliği Doktora Programı**

Danışman: Doçent Doktor, Hacer BİLİR ÖZHAN

ORCID: 0000-0003-0728-0431

EYLÜL 2024

BTÜ, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü'nün 19327470001 numaralı Doktora Öğrencisi Musa YILDIRIM, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “KAPSÜLLENMİŞ BAKTERİLER KULLANILARAK KENDİ KENDİNİ İYİLEŞTİREBİLEN ÇİMENTO ESASLI KOMPOZİT ÜRETİMİ” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

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

Jüri Üyeleri : **Dr. Öğr. Üyesi Eray YILDIRIM**
Bursa Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Tayfun UYGUNOĞLU
Afyon Kocatepe Üniversitesi

Doç. Dr. Aylin ÖZODABAŞ
Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi

Doç. Dr. Bahadır YILMAZ
Bursa Teknik Üniversitesi

Teslim Tarihi :
Savunma Tarihi : 30 Eylül 2024



20.04.2016 tarihli Resmi Gazete’de yayımlanan Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin 9/2 ve 22/2 maddeleri gereğince; Bu Lisansüstü teze, Bursa Teknik Üniversitesi’nin abonesi olduğu intihal yazılım programı kullanılarak Lisansüstü Eğitim Enstitüsü’nün belirlemiş olduğu ölçütlere uygun rapor alınmıştır.

Bu tez, 124M882 numaralı TÜBİTAK projesi ile desteklenmiştir.

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:

(Faint signature watermark)



Dr. Aydın YILDIRIM ağabeyimin anısına,

ÖNSÖZ

Doktora çalışmam boyunca akademik ve kişisel desteğini her zaman hissettiren ve tezin yapımını mümkün kılan değerli danışmanım Sayın Doç. Dr. Hacer BİLİR ÖZHAN'a teşekkürlerimi sunarım.

Doktora tez süreci boyunca bilgi ve tecrübelerini cömertçe paylaşan ve akademik gelişimime katkı sunan Sayın Prof. Dr. Tayfun UYGUNOĞLU ve Dr. Öğr. Üyesi Eray YILDIRIM'a teşekkür ederim. Tez yapımına desteklerini sunan Sayın Prof. Dr. Hatice BİLİR EKBİÇ'e teşekkürlerimi sunarım.

Doktora eğitimim boyunca 2211-A Yurt İçi Genel Doktora Burs Programı ile beni destekleyen TÜBİTAK'a teşekkürlerimi sunarım. YÖK100/2000 bursuyla desteklerini sunan YÖK'e teşekkürlerimi sunarım.

Bu çalışma, Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) tarafından 124M882 numaralı proje ile desteklenmiştir. Çalışmaya verdiği destekten ötürü TÜBİTAK'a teşekkürlerimi sunarım.

Destek ve sevgilerini hayatımın her anında hissettiren ve akademik eğitimimim boyunca hiçbir fedakarlıktan kaçınmayan annem Ayşe YILDIRIM, babam Recep Baki YILDIRIM ve kardeşim Emine YILDIRIM'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Eylül 2024

Musa YILDIRIM
İnşaat Yüksek Mühendisi

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	vii
İÇİNDEKİLER	viii
KISALTMALAR	x
SEMBOLLER	xi
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xii
ŞEKİL LİSTESİ.....	xiii
ÖZET.....	xv
SUMMARY	xvii
1. GİRİŞ	1
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	8
2.1 Fiber Kullanımının KKİ Davranışına Etkisi	8
2.2 Kendi Kendini Onarabilen Kompozitlerde Fiberlerin Bakteri Koruyucu Olarak Kullanımı.....	12
2.3 Çay Atıklarının Yapı Malzemelerinde Kullanımı	17
3. GEREÇ VE YÖNTEM.....	20
3.1 Malzemeler.....	20
3.1.1 Çimento	20
3.1.2 Agrega	20
3.1.3 Biyolojik katkı (bakteri).....	20
3.1.4 Besiyerler	21
3.1.5 Çay atıkları	21
3.2 Yöntem	22
3.2.1 Bakteri sporlarının hazırlanması	22
3.2.2 Çay atığının bakteriler üzerindeki anti-mikrobiyal etkisinin belirlenmesi	23
3.2.3 Harç karışımları ve numune üretimi	23
3.2.4 Harç numunelerin hasarlanması.....	25
3.2.5 Yayılma tablası deneyi.....	26
3.2.6 Çatlak iyileşmesi	26
3.2.7 Basınç dayanımı deneyi	26
3.2.8 Eğilme dayanımı deneyi.....	26
3.2.9 Ultrasonik ses geçiş hızı deneyi (UPV)	27
3.2.10 Su emme deneyi	27
3.2.11 Kapiller su emme deneyi.....	27
3.2.12 Görünür porozite deneyi	28
3.2.13 Yüksek sıcaklık etkisi deneyi.....	29
3.2.14 Taramalı elektron mikroskobu analizi (SEM)	30
4. BULGULAR VE TARTIŞMA.....	32
4.1 Çay Atıklarının Anti-mikrobiyal Etkisi.....	32
4.2 Yayılma Değerleri	32
4.3 Çatlak İyileşme Değerleri.....	33

4.4 Basınç Dayanımı Değerleri	37
4.5 Eğilme Dayanımı Değerleri	40
4.6 Ultrasonik Ses Geçiş Hızı (UPV) Değerleri.....	43
4.7 Su Emme Değerleri	46
4.8 Kapiller Su Emme Değerleri	49
4.9 Görünür Porozite Değerleri	51
4.10 Yüksek Sıcaklık Etkisi Deney Sonuçları	53
4.11 Taramalı Elektron Mikroskobu Analizi (SEM Analizi).....	62
5. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	66
KAYNAKLAR	70
ÖZGEÇMİŞ.....	79



KISALTMALAR

BÇA	: Bakterili ay Atığı İçeren Harç Numunesi
BH	: Bakterili Harç Numunesi
A	: ay Atığı İçeren Harç Numunesi
KH	: Kontrol Harç Numunesi
KKİ	: Kendi Kendine İyileşme
MICP	: Mikrobiyal Yolla Kalsit ökeltme Yöntemi
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskobu
UPV	: Ultrasonik Ses Geçiş Hızı

SEMBOLLER

ρ	: Görünür Porozite
$^{\circ}\text{C}$	: Santigrat Derece
L	: Mesafe
Q	: Kapilarite Katsayısı
t	: Zaman
V	: Hız
W	: Ağırlık

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 3.1 : Çimentonun kimyasal ve fiziksel özellikleri	20
Çizelge 3.2 : Kullanılan kalsiyum laktat ve ürenin genel özellikleri.....	21
Çizelge 3.3 : Çay atıklarının özellikleri.....	21
Çizelge 3.4 : Harç karışım oranları (g)	24



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1 : Bakteri üzerinde oluşan kalsitleşmenin şematik gösterimi [19].....	3
Şekil 1.2 : Bakteri içeren liflerin çatlak onarım mekanizması [45].....	6
Şekil 3.1 : Çay atıklarının görünümü.....	21
Şekil 3.2 : Çay atıklarının boyut analizi sonuçları.....	22
Şekil 3.3 : Bakteri sporlarının hazırlanma süreci.....	23
Şekil 3.4 : Su emmiş (sol) ve bakteri (sağ) solüsyonu emmiş çay atıklarının mikroskop görüntüsü.....	24
Şekil 3.5 : Bakteri sporu çözeltisinde çay atıklarının görünümü.....	25
Şekil 3.6 : UPV deney süreci.....	27
Şekil 3.7 : Kapiller su emme deneyinin şematik gösterimi.....	28
Şekil 3.8 : Arşimet terazi kullanılarak su içindeki harç ağırlık tartımı.....	29
Şekil 3.9 : Harç numunelerinin kül fırını içerisindeki görünümü.....	29
Şekil 3.10 : Yüksek sıcaklık uygulama derecelerinin ve sürelerinin grafiksel gösterimi.....	30
Şekil 4.1 : Çay atıklarının <i>B.megaterium</i> 'a karşı disk difüzyon yöntemiyle antimikrobiyal aktivitesi.....	32
Şekil 4.2 : Harç serilerinin yayılma değerleri.....	33
Şekil 4.3 : Çay atıklarının köprüleme davranışı.....	34
Şekil 4.4 : İyileşen en geniş çatlak genişlikleri.....	34
Şekil 4.5 : Çay atıklarının mikro çatlaklardaki SEM görünümü.....	35
Şekil 4.6 : 28 gün sonunda çatlakların iyileşmesi ve çay atığı üzerinde oluşan kalsit görünümü.....	36
Şekil 4.7 : BÇA yüzeyindeki çatlağın ilk (a) ve 90 gün sonraki görünümü (b).....	36
Şekil 4.8 : Harç serilerinin 28 ve 90 günlük basınç dayanımı değerleri.....	37
Şekil 4.9 : 28 ve 90 günlük ön hasarlı harçlarda hasarsız hallerine göre basınç dayanımı düşüş yüzdeleri.....	39
Şekil 4.10 : ÇA6 (sol) ve BÇA6 (sağ) harç numunelerinden alınmış parça görüntüleri.....	39
Şekil 4.11 : Eğilme dayanımı deney sonuçları.....	41
Şekil 4.12 : Eğilme dayanımı deneyi sonrası kontrol (a) ve çay atık takviyeli harçların (b) görünümü.....	42
Şekil 4.13 : UPV deneyi sonuçları.....	43
Şekil 4.14 : Harç yüzeyindeki porların bakteriyel kalsitle dolma süreci.....	44
Şekil 4.15 : UPV deneylerinde kullanılan 90 günlük harç numunelerinin yüzeyleri.....	46
Şekil 4.16 : Hasarsız harç numunelerinin su emme değerleri.....	47
Şekil 4.17 : Ön hasarlı harç numunelerinin su emme değerleri.....	48
Şekil 4.18 : Kontrol numunelerine göre su emme değerlerindeki oransal değişimler.....	49
Şekil 4.19 : Kapiller su emme deney süreci.....	50
Şekil 4.20 : Harç serilerinin kapilarite katsayı değerleri.....	50

Şekil 4.21 : Ön hasarsız harç numunelerinin porozite değerleri.....	52
Şekil 4.22 : Ön hasarlı harç numunelerinin porozite değerleri.....	53
Şekil 4.23 : Yüksek sıcaklık sonrası harç numunelerinin basınç dayanımı değerleri.	54
Şekil 4.24 : Yüksek sıcaklık sonrası çay atıklarının harç yapısı içerisindeki görünümü.	55
Şekil 4.25 : Yüksek sıcaklık sonrası KH ve ÇA6 harçlarının yüzeyleri (5cm×5cm).56	
Şekil 4.26 : Yüksek sıcaklık sonrası ön hasarlı numunelerin basınç dayanımı değerleri.....	58
Şekil 4.27 : Yüksek sıcaklık maruziyeti sonrası harç numunelerinin UPV değerleri.	59
Şekil 4.28 : Yüksek sıcaklık sonrası ön hasarlı harç numunelerinin UPV değerleri. 60	
Şekil 4.29 : Yüksek sıcaklık etkisi nedeniyle harçlarda yaşanan ağırlık kaybı oranları.	61
Şekil 4.30 : Yüksek sıcaklık etkisi nedeniyle ön hasarlı harçlarda yaşanan ağırlık kaybı oranları.....	62
Şekil 4.31 : Harç yapısı içerisinde çay liflerinin görünümü.	63
Şekil 4.32 : Kontrol (a) ve BÇA (b) harç yapısının SEM görüntüleri.	64
Şekil 4.33 : Çay atığının harç yapısı içerisindeki yüzey yapısı.	65

KAPSÜLLENMİŞ BAKTERİLER KULLANILARAK KENDİ KENDİNİ İYİLEŞTİREBİLEN ÇİMENTO ESASLI KOMPOZİT ÜRETİMİ

ÖZET

Kendi kendini onarabilen bakterili çimentolu kompozitlerde efektif bir tedavi süreci için bakterileri çimentonun yarattığı iç ortamdan ve dış etkilerden korumak gereklidir. Bu sebeple bakterileri bir koruyucu kapsül içerisine alarak bu zararlı etkilerden koruma yöntemleri geliştirilmektedir. Ancak bu koruyucu kapsüllerin üretiminde kullanılan kimyasallar genellikle beton üretimi için oldukça pahalıdır ve bu kapsülleme işlemleri genellikle üstün teknik işlemler ve laboratuvar imkanları gerektirmektedir. Böylece ek maliyet ve kimyasal kullanımları yüzünden çevreye de zararlı bir etkisi olmaktadır. Oysaki bakteriyel iyileşmenin öne çıkan yanlarından biri doğal ve çevre dostu bir iyileşme yöntemi olmasıdır. Bu nedenle doğal fiberler kullanılarak daha kolay bir bakteri koruma sistemi geliştirilmiştir. Bu yöntemde doğal fiber içerisine bakteri sporları emdirilerek kullanılmaktadır. Böylece ilave bir kapsülleme işlemi ve malzeme kullanımı olmadan daha üstün bir yöntem geliştirilmiştir.

Bu tez çalışmasında çay atıklarını bakteri için bir koruyucu çeper ve doğal fiber olarak kullanılması amaçlanmıştır. Çay atıkları dünya çapında çokça açığa çıkan bir atık olup, yüksek su emme oranına sahip fiber formunda bir atık tipidir. Çay atıklarının bu fiber formunun ve su emme özelliğinin bakteri emdirme yöntemi ile üretilmiş bakterili kompozitlerdeki efektifliği araştırılmıştır. Çay atığı içerisine *Bacillus megaterium* sporları emdirilmiştir ve harç karışımlarına %0,2, %0,4 ve %0,6 olmak üzere üç farklı oranda fiber olarak ikame edilmiştir. Kontrol harçları, bakterilerin direkt olarak karışıma eklendiği harçlar, bakterisiz çay atıklarının eklendiği harçlar ve bakterili çay atığı içeren seriler dahil olmak üzere toplam sekiz harç tipi üretilmiştir. Üretilen bu harçların bir kısmı üzerinde basınç yüklemeleri yapılarak ön hasarlı hale getirilmiştir. Ardından tüm numuneler 28 gün ve 90 gün boyunca su tankında kürlenmiştir. Bu ön hasarlı ve hasarsız harç numuneleri kullanılarak bakteri, çay atığı ve bakterili çay atıklarının harçların fiziksel, mekanik ve durabilite özelliklerine olan etkisi araştırılmıştır. Bu kapsamda yayılma, çatlak iyileşme, basınç dayanımı, eğilme dayanımı, ultrasonik ses geçiş hızı (UPV), su emme, kapiller yolla su emme, görünür porozite ve yüksek sıcaklık etkisi deneyleri yürütülmüştür. Son olarak taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılarak alınan görüntülerde çay atığı ve bakteri ürünleri incelenmiştir.

Elde edilen sonuçlar incelendiğinde, çay atıklarının başarılı bir şekilde bakterileri emerek muhafaza edebildiği ve bir arada kullanımlarının bakteriyel tedavi sisteminin etkinliğini ve süresini arttırdığı saptanmıştır. Çay atıkları doğal fiber etkileri sayesinde çatlakları kısıtlamıştır. Bu kısıtlanan çatlaklarda bakteriler daha etkin bir onarım sunarak 0,68 mm genişliğine kadar çatlak iyileştirmeyi başarmıştır. Bakterili çay atıkları harçların basınç ve eğilme dayanımlarını da arttırmıştır. Çay atıklarının fiber ve koruma etkisi ile bakterilerin kalsit üretme efektifliğini ve süresini uzatması

sayesinde bakterili çay atığı içeren harçlar kontrol numunelerine göre %26,50 oranında daha yüksek basınç dayanımları ve %8,04 oranına varan daha yüksek eğilme dayanımları sergilemiştir. ay atıklarının sağladığı ekstra su, bakteriler için daha uygun bir ortam ve i krleme etkisi yaratmıştır. Böylece daha yüksek miktarda kalsit oluşarak yapıdaki boşluklar doldurulmuştur. Bu yoğun yapı sayesinde bakterili çay atığı içeren harçlarda daha yüksek UPV değerleri, daha düşük su emme, kapilarite ve porozite değerleri saptanmıştır. Bakteri ürünü bu kalsitlerin ve çay atıklarının yüksek sıcaklık etkisi karşısında da harçlara dayanıklılık sağladığı saptanmıştır. ay atıklarının sıcaklık tahliye özelliği ve bakterilerin yarattığı iyileşme sayesinde harçlarda oluşan çatlakları onarak yüksek sıcaklık karşısında da %101,98' e varan oranda daha yüksek artık basınç dayanımı değerleri sunmuştur. Ek olarak bakterili çay atığı içeren harçlar yüksek sıcaklık etkisi sonrası daha az ağırlık kaybı oranı görülürken, daha yüksek UPV değerleri sergilemiştir. SEM altında incelenen numunelerde çay atıkları etrafında kalsit oluşumlarının yoğunlaştığı grlmştir. Bu da çay atıklarının bakterilere sağladığı olumlu şartları gstermiştir.

Anahtar kelimeler: ay atıkları, Bakterili har, Kendi kendine iyileşme, çatlak iyileşme, Durabilite.

PRODUCTION OF SELF-HEALING CEMENT BASED COMPOSITES USING CAPSULATED BACTERIA

SUMMARY

In bacterial self-healing cementitious composites, protecting the bacteria from the harsh internal environment created by the cement and external factors is crucial for an effective healing process. Therefore, methods are being developed to shield the bacteria from these harmful effects by encapsulating them in protective capsules. However, the chemicals used in the production of these protective capsules are generally expensive for concrete production, and the encapsulation processes often require advanced technical procedures and laboratory facilities. This results in additional costs and environmental impacts due to extra chemicals and techniques. However, one of the prominent advantages of bacterial healing is that it is a natural and environmentally friendly method. Therefore, an easier bacterial protection system has been developed using natural fibers. In this method, bacterial spores are absorbed into natural fibers and used without the need for additional encapsulation processes or materials, providing a more efficient method.

This doctoral thesis aims to use tea waste as a natural fiber and protective material for bacteria. Tea waste is widely generated waste globally, and it is a fibrous waste type with a high water absorption rate. The effectiveness of the fiber form and water absorption properties of tea waste in bacterial cementitious composites produced through bacterial absorption methods has been investigated. *Bacillus megaterium* spores were absorbed into the tea waste and incorporated into mortar mixtures at three different ratios: 0.2%, 0.4%, and 0.6%. A total of eight different types of mortar were produced, including control mortars, mortars with bacteria directly added to the mix, mortars with tea waste (non-bacterial), and mortars containing bacterial tea waste. Some parts of these mortars were pre-damaged by applying compressive loads. All samples were then cured in water tanks for 28 days and 90 days. Using these pre-damaged and undamaged samples, the effects of bacteria, tea waste, and bacterial tea waste on the physical, mechanical, and durability properties of the mortars were examined. Tests conducted in this context include flow table, crack healing, compressive strength, flexural strength, ultrasonic pulse velocity (UPV), water absorption, capillary water absorption, apparent porosity, and high-temperature effect. Additionally, tea waste and bacterial products were analyzed through images taken using scanning electron microscopy (SEM).

The results indicated that tea waste successfully absorbed and preserved the bacteria, and their combined usage enhanced the effectiveness and duration of the bacterial healing system. Tea waste, due to its natural fiber properties, restricted crack formation. In these restricted cracks, the bacteria provided more effective healing, achieving crack healing of up to 0.68 mm. The bacterial tea waste also improved the compressive and flexural strengths of the mortars. Mortars containing bacterial tea waste exhibited 26.50% higher compressive strength and 8.04% higher flexural

strength compared to control samples. Tea waste extended the bacteria's calcite production efficiency and duration through its fiber and protective effects. The additional water provided by the tea waste created a more favorable environment for bacteria, promoting internal curing. More calcite formed as a result, filling the voids in the structure. Due to this denser structure, mortars containing bacterial tea waste showed higher UPV values, lower water absorption, capillarity, and apparent porosity values. The calcite produced by the bacteria and the tea waste were also found to contribute to resistance against high temperatures. Thanks to the temperature dissipation properties of the tea waste and the healing effect of the bacteria, the mortars were able to repair cracks and exhibited up to 101.98% higher residual compressive strength under high temperatures. Additionally, mortars containing bacterial tea waste showed less weight loss and higher UPV values after exposure to high temperatures. SEM analysis of the samples revealed that calcite formation cumulated around the tea waste, indicating the favorable conditions that tea waste provided for the bacteria.

Keywords: Tea waste, Bacterial mortar, Self-healing, Crack healing, Durability.



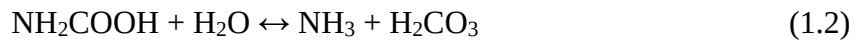
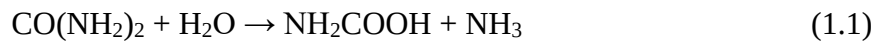
1. GİRİŞ

Beton, inşaat sektöründen en yaygın kullanılan yapı malzemesidir. Sahip olduğu üstün dayanım ve dayanıklılık özellikleri sayesinde oldukça geniş bir kullanım alanına sahiptir. Yıllık 15 milyar m³ betonun kullanıldığı ve giderek bu miktarın arttığı bilinmektedir [1]. Ancak çimentolu kompozitler sahip oldukları birçok üstün özelliğine karşın, gevrek yapıları yüzünden çatlamaya oldukça müsait yapılardır. Çatlakların oluşumu çoğunlukla yüklemeler, sıcaklık değişimleri, aşınma, sızıntılar ve kimyasal saldırılar gibi çeşitli faktörlerden kaynaklanır. Özellikle suyun çatlaklardan betonun içine sızması, yapısal elemanların korozyonuna neden olur. Bu durum, zamanla betonun dayanıklılığını azalmasına ve uzun dönemde yapının çökmesine yol açabilecek ciddi problemlere yol açabilir. Böylece beton yapısında oluşan çeşitli boyutlardaki çatlaklar betonun servis ömrünün kısalmasına neden olur. Beton yapısındaki çatlaklarla durabilite özellikleri doğrudan bir ilişki olduğu bilinmektedir [2–4].

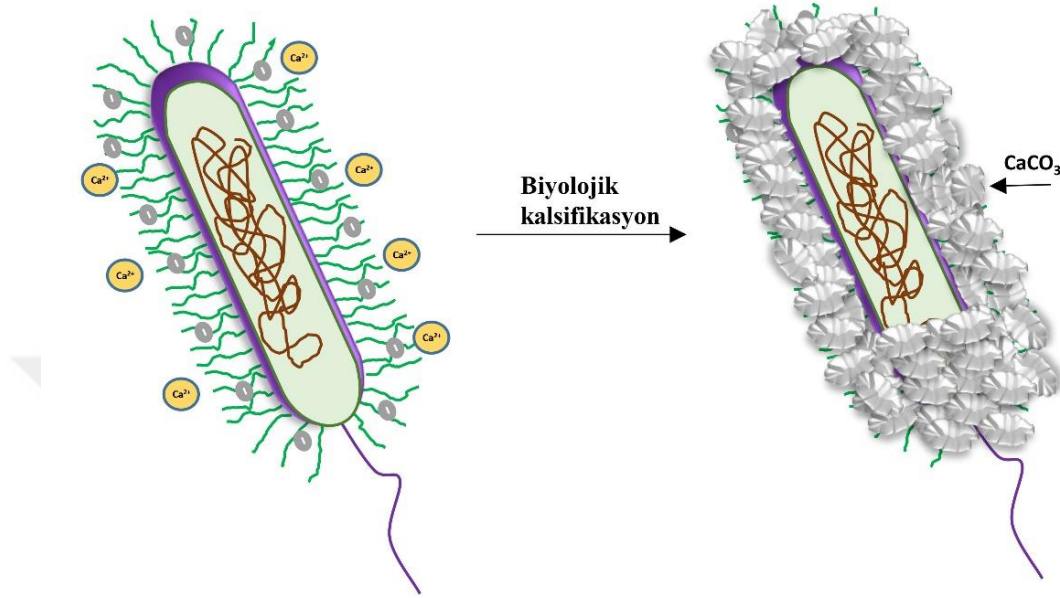
Kompozit yapısında oluşan bu çatlakların tamiri sağlıklı bir kompozit yapısı ve servis süresinin tamamlanması adına elzemdir. Ancak bu çatlakları sonradan tamir etmek oldukça zor ve masraflıdır. Örneğin Avrupa onarım işlemleri için toplam inşaat bütçesinin yaklaşık yarısını harcamaktadır [5]. Üstelik bu onarım işlerinde genellikle çimento bazlı malzemeler, polimer bazlı malzemeler ve kimyasal katkıları gibi yüksek maliyetli ve çevreye zararlı malzemeler kullanılmaktadır [6,7]. Çimento üretimi halihazırda toplam CO₂ salınımının %8-9'undan sorumlu olduğu bilinmektedir [8]. Bu sebeple çimentolu kompozit üretiminin ardından bir de tamiri için çevreye ekstra CO₂ salacak ve ekstra maliyet doğuracak malzemeler inşaat sektörünün karbon nötr hedefleriyle uyuşmamaktadır [6,7]. Üstelik bu malzemelerle yapılan onarım sistemleri çoğunlukla çatlakları dışarıdan kapatarak iç yapıda etkisiz olmaktadır. Bu sebeple çatlakların tamiri değil, tasarım sürecinde kendi kendine iyileşme özelliğinde kompozitler üretmek önemlidir.

Çimentolu kompozitler esasen otojen bir iyileşme özelliğine sahiptir. Hidrate olmayan çimento parçacıkları, yabancı maddelerin birikmesi ve kireç oluşumu gibi nedenlerle

çimentolu sistemlerdeki çatlaklar kapanabilir. Ancak bu iyileşen çatlaklar genişlikleri 0,2 mm altında kaldığı için mekanik olarak bir katkısı oldukça kısıtlıdır [9]. Üstelik bu çatlakların kapanması çimentonun kimyasal kompozisyonu gibi değişkenlere bağlı olarak çok uzun süreler alabilir. Bu sebeple araştırmacılar daha etkin bir iyileşme yöntemleri arayışına girmişlerdir. Böylece otojen olarak kendi kendine iyileşebilen kompozitler (KKİ) üretilmiştir. KKİ'ler çatlakların oluşumundan sonra ilave bir işlem ve malzeme kullanmadan çatlakların onarılmasını sağlamaktadır. Bu özellikteki kompozitler ilk üretim maliyetinin daha yüksek olmasına rağmen uzun vadede daha ekonomik bir çözümdür [10]. Böylece uzun vadede oluşacak onarım engellenerek daha ekonomik ve çevreci yapılar meydana getirilmektedir. KKİ arasında en dikkat çekici yöntemlerden biri bakterilerin kullanılmasıdır. Mikrobiyal kalsit çökeltme sistemi (MICP) olarak da isimlendirilen bu onarım sisteminin, diğer onarım sistemlerine göre daha ekonomik, daha çevreci ve daha doğal bir yöntem olduğu raporlanmıştır [11–13]. Bakteriler zaten doğada halihazırda biyo-mineralizasyon denen bu süreci yaratmaktadırlar. Bu sürecin çimentolu sistemlerde uygulandığı yöntem ise mikrobiyal kalsit indüklemeye (MICP) yöntemi olarak bilinmektedir [14,15]. Kalsit mineralizasyonu doğada yaygınca görülen bir mekanizmadır. Sert kabuklu deniz canlıları, mercanların büyümesi, istiridye ve midye kabukları gibi bu mekanizmaları sayesinde kalsit üreterek yaşamlarını sürdürürler. Bu kalsitleşme doğrudan bakterilerin metabolik aktivitesiyle ilişkilidir [16]. Doğada birçok bakteri kalsitleşme yapma yeteneğine sahiptir. Özellikle üreaz enzimine sahip bakteriler üreyi hidrolize ederek kalsit üretir. Üreaz enzimi ve bakteri sporlarının varlığında kalsitleşme kimyasal oluşum süreci aşağıda Denklem 1.1 ile Denklem 1.6 arasında gösterilmiştir [17].



Denklem 1.6 sonucunda bakteri yapısı etrafında kalsitler oluşur. Bu süreç şematik olarak Şekil 1.1’de gösterilmektedir. Oluşan bu kalsitler giderek artarak bakteriyi tamamen kaplar ve kalsit yapısının boyutu giderek artar. Üstelik oluşan bu kalsitin yüksek saflıkta olduğu bilinmektedir [18].



Şekil 1.1 : Bakteri üzerinde oluşan kalsitleşmenin şematik gösterimi [19].

Bakterilerin ürettiği bu kalsiyum karbonat, beton veya harç yapısı içerisindeki boşluk ve çatlakları doldurarak daha yüksek dayanımlı ve daha yüksek durabilite özelliklerine sahip bir yapı meydana getirir. Beton uzun servis ömrüne bir sahip bir malzemedir. Bu sebeple bakterilerin kompozit içerisindeki yaşam süresi de önemlidir. Özellikle bacillus cinsi bakteriler dormant aşama da 200 yıla kadar ömre sahiptir. Bu sayede betonun servis ömrü boyunca otonom bir iyileşme sunma şansı vardır [20].

Bakteriler kompozit yapısına göre farklı şekillerde ilave edilirler. Bu yöntemler spreyleme, enjeksiyon ve direkt karışıma katma olarak üçe ayrılabilir. Ancak bu yöntemlerin tedavi etkinliği açısından en efektif olanı direkt karışıma kattığı saptanmıştır [21]. Direkt olarak karışıma katılan bakteriler dışarıdan oksijen ve nem aldığı koşullarda bakteri uygun besiyer eşliğinde kalsit üretmeye başlar. Ürettiği bu kalsit çatlakları doldurarak onarır. Sadece çatlakları değil, boşlukları doldurur ancak çatlaklardan aldığı oksijen ve ekstra nem nedeniyle bakteriler çatlaklarda kalsit oluşturma eğilimindedir [19]. Bu daha dolu hacimli kompozit ise daha yüksek basınç ve eğilme dayanımları, daha üstün durabilite özellikleri sunar. Bu da bakteri ürünü kalsitin, çimentolu yapıyla olan üstün uyumunu kanıtlamaktadır [22].

Ancak bakterileri direkt karışıma katma yöntemi en etkili yöntem olmasına rağmen hala bazı sorunları barındırmaktadır. Çimentolu kompozit içerisindeki yüksek pH, üretim esnasında maruz kalınan mekanik darbeler ve diğer zorlu dış etkenler bakterileri ve dolayısıyla bakteriyel iyileşme sistemini olumsuz etkilemektedir [23]. Beton içerisine katılan bakterilerin %99,8'nin 22 gün sonunda canlılığını yitirmektedir [24]. Beton yaşı arttıkça olumsuz koşullardan daha çok etkilenen bakteri yapısı yüzünden, ilk bir-iki ayın sonunda bakteriyel aktivite tamamen son bulmaktadır [25,26]. Oysaki özellikle *bacillus* cinsi bakteriler dormant aşamasındaki uzun ömrü düşünüldüğünde, betonun içerisinde çok daha uzun süre kalabilmesi teorik olarak mümkündür. Üstelik bakteriyel tedavi sistemi ne kadar etkin tutularsa, onarım masrafları da o kadar ötelenebilecektir [27]. Bakterileri olumsuz koşullardan korumak ve kendi kendine iyileşme süresini uzatmak amacıyla bir koruyucuya ihtiyaç duyulmaktadır. Bu nedenle araştırmacılar bakteriye çeşitli koruyucular geliştirmişlerdir. Bu koruma yöntemleri enkapsülleme ve emdirme (immobilize) yöntemleridir.

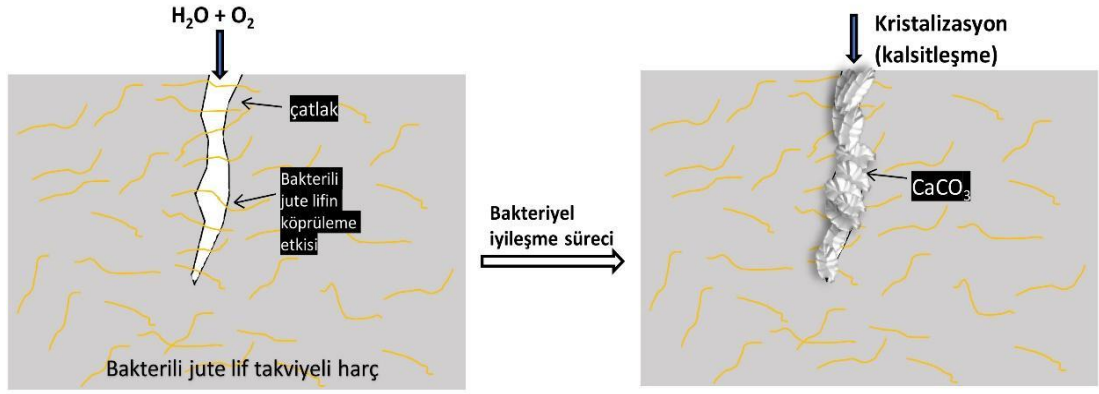
Enkapsülleme yönteminde bakteri sporları bir kabuk formu içerisinde kapsüllenenek dış ortamdan korunur. Ancak bu yöntemin etkinlik sorunları vardır. Çünkü kompozit yapısı içerisinde dağılan kapsüllerin az bir kısmı çatlak ve tedaviye katkı sunar, geri kalan kısım ise kompozit içinde etkisizce beklemektedir [28,29]. Hareketsizce bekleyen bu bakterili kapsüllerin ise kompozite herhangi bir olumlu etkisi bulunmamaktadır. Üstelik bu kapsüller genellikle küresel ve silindirik şekildedir. Bu şekil yapısı nedeniyle kapsül ile matriks arasında uyum sorunu ortaya çıkarak çimentolu kompozitte dayanım kayıplarına neden olabilir. Ayrıca bu kapsüller hasar anında oluşacak çatlaklarla beraber çatlaması adına agregalardan daha düşük dayanıma sahip olarak tasarlanırlar. Böylece etkili bir onarım sağlanabilir. Ancak kapsülün tasarlanan bu düşük dayanımı kompozitin dayanımını olumsuz etkiler [30,31]. Ek olarak bu kapsülün üretiminde kullanılan çeşitli kimyasal malzemeler kullanılmaktadır. Bu kimyasal kapsül malzemeleri ve kapsülleme sürecinde kullanılan gelişkin teknikler ekstra maliyete neden olmaktadır.

İkinci en yaygın bakteri koruma yöntemi ise emdirme yöntemidir. Hafif ve poroz agregalar, diatomlu toprak, genleştirilmiş kil gibi yüksek boşluk oranına sahip malzemeler içerisine bakteri emdirilir [32–34]. Bakteriyi emen boşluklu yapıya sahip malzeme beton yapımında kullanılarak, uygun şartlar oluştuğunda kalsit üretmesi

sağlanır. Böylelikle ekstra bir teknik işlem ve maliyet gerekmeksizin bakteri korumaya alınmış olunur. Ancak boşluklu malzemelerin özellikle poroz agregaların daha düşük dayanımlara sahip olması nedeniyle kompozitin dayanımı düşer [35,36]. Bu da bu yöntemin en büyük dezavantajıdır. Bu sebeple bakteri koruyucu malzemesinin fiziksel, kimyasal ve dayanım özellikleri oldukça önemlidir [37]. Böylece kompozitin mevcut dayanım ve dayanıklılık performansını düşürmeden MICP sistemi entegre edilebilir. Bu bağlamda kompozitin yapısını olumsuz yönde etkileyen bu yüksek boşluk oranlarına sahip malzemeler yerine, fiberleri korucuyu olarak kullanma yöntemi geliştirilmiştir.

Fiberler çimentolu kompozitlerde yaygın olarak kullanılan bir takviyedir. Fiberler sahip olduğu yüksek çekme dayanımı özellikleri sayesinde kompozitlerin dayanım ve durabilite özelliklerini geliştirir. Köprüleme etkileri sayesinde ise çatlak genişliklerini kısıtlar [38,39]. Herhangi bir bakteri takviyesi olmadan da Homma vd. [40] çalışması fiber takviyeli kompozitlerde çatlak genişlikleri kısıtlandığı için betonların kendi kendine otojen olarak iyileşme kapasitelerinin daha üstün olduğunu göstermiştir. Üstelik Özhan vd. [19] çalışmasında MICP sisteminin kısıtlı çatlak aralıklarında daha etkin olduğunu göstermiştir. Bu da fiberlerin bakterili KKI kompozitlerdeki fiberlerin önemini göstermektedir.

Fiberlerin büyük bir çoğunluğu emme özelliğine sahip olmamasına karşın, özellikle doğal bazlı fiberler yüksek su emme kapasitesine sahiptir. Öyle ki ağırlıklarından çok daha fazla miktarda su emerler. Bu özelliklerini öne çıkaran araştırmacılar, yüksek su emme oranına sahip liflere bakteri sporlarını emdirerek fiberleri bakteriye koruyucu bir kalkan kullanmıştır. Öte yandan, bu fiberlerin diğer bakteri koruyucu malzemeler gibi kompozit yapısına zarar vermemektedir ve zaten halihazırda yaygın kullanım alanlarına sahiptirler [41–44]. Bu fibere emdirilmiş bakteri içeren çimentolu kompozitlerin iyileşme davranışının şekilsel gösterimi Şekil 1.2’de gösterilmiştir.



Şekil 1.2 : Bakteri içeren liflerin çatlak onarım mekanizması [45].

Bu kapsamda sisal, jüt, keten, selüloz fiber gibi yaygınca kullanılan doğal fiber kullanılarak bakteriye koruyuculuk sağlamışlardır. Ancak daha önce yüksek su emme oranına sahip biyolojik bir atık olan çay atıkları bu kapsamda değerlendirilmemiştir. Çay atıklarının ise doğal fiber olarak kullanımı da çevre açısından önemlidir. Çünkü çay, dünya genelinde sudan sonra en çok tüketilen içecektir [46]. Bu sebeple ardından devasa miktarda atık bırakır. Giderek artan çay tüketimi yüzünden ortaya çıkan devasa miktardaki bu atıklar çevresel stresse neden olmaktadır. Yaş çay yaprakları işlenerek nihai çay formuna dönüştürülürken ortaya lif ve parçacıklardan oluşan çay atıkları ortaya çıkar [47,48]. Kullanılan bu çay yapraklarının ağırlıkça %4'ü lif ve sap formundaki atıklardır. Dünya çapındaki çay kullanımının popülerliği düşünüldüğünde bu %4'lük üretim atığının bile ciddi sorunlara neden olduğu aşikardır [49]. Ortaya çıkan bu atık yapısının lif formunda olması yapı malzemelerinde de kullanılmasına imkân vermektedir. Ancak çay atıklarının çimentolu kompozitlerde kullanımını inceleyen kısıtlı sayıda çalışma bulunmaktadır. Çay atıkları beton ve harç içerisinde kullanılan çalışmalarda kürleme ajanı ve fiber takviye olarak kullanılabileceği saptanmıştır [50–52]. Üstelik bu çay atıklarının bu çalışma kapsamında yüksek su tutma kapasitesine sahip olduğu saptanmıştır.

Doğal fiber kullanımlarının yanında, bu çay atıkları yüksek su emme özelliklerine sahip atıklardır [52]. Bu yüksek su emme özellikleri ve lif şeklindeki yapısı çay atıklarını bakteri koruyucu olarak kullanabilirliğini araştırmaya değer kılmaktadır. Daha önce doğal bazlı fiberler bakteri koruyucu olarak kullanılarak üstün sonuçlar elde edilse de henüz biyolojik bazlı bir atığın bu amaçla kullanıldığı bir çalışma yayınlanmamıştır. Oysaki bir atık malzemenin kendi kendine iyileşebilen kompozitlerde değerlendirilmesi MICP sisteminin çevreci ve doğal yapısıyla

örtüşmektedir [53]. Bu amaçla çay üretiminde meydana çıkan bu atıkların bakteri koruyucu olarak ve doğal fiber olarak kullanımının KKİ üzerinde etkisi araştırılmıştır. Bu tez çalışması kapsamında araştırılması hedeflenen kıstaslar aşağıda maddelendirilmiştir.

1. Çimentolu kompozitlerde kullanımı hakkında oldukça kısıtlı çalışma bulunan çay atıklarının, harçların mekanik ve durabilite özelliklerine olan etkisinin belirlenmesi.
2. Bakterili kompozitlerde çay atığı kullanımının bakterilere uygun bir koruma sağlayarak bakteri-koruyucu olarak kullanılabilirliğinin araştırılması.
3. Harç yapısında meydana gelecek bakteriyel kalsitin gözlemlenmesi.
4. Bakteri ürünü kalsitin harçların çatlak iyileşme, basınç dayanımı, su emme oranı, kapiller su emme miktarı ve UPV gibi deney parametrelerine etkisi.
5. Çay atıklarının ve bakteriyel kalsitin yüksek sıcaklık etkisi karşısında harçların dayanıklılığına etkisinin incelenmesi.
6. Bakteri çay atığı içeren harç yapılarının mikroskop analizleriyle incelenmesi.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Bu tez kapsamında literatür araştırması aşağıdaki üç başlık altında incelenmiştir.

1. Fiber kullanımının KKİ davranışına etkisi
2. Kendi kendini onarabilen kompozitlerde fiberlerin bakteri koruyucu olarak kullanımı
3. Çay atıklarının yapı malzemelerinde kullanımı

2.1 Fiber Kullanımın KKİ Davranışına Etkisi

Fiberler çimentolu kompozitlerde en sık kullanılan takviyelerdendir. Fiberler sahip olduğu yüksek çekme dayanımı özellikleri sayesinde kompozitlerin dayanım ve durabilite özelliklerini geliştirir. Sahip oldukları yüksek uzunluk/çap oranları sayesinde betonun dayanım ve dayanıklılıklarını geliştirirler [38,39]. Üstelik fiberler betonu dış hasarlara karşı daha korunaklı hale getirir. Bu bağlamda fiber takviyeli kompozitlerde oluşan çatlaklar arasında fiberler köprüleme etkisi göstererek çatlak gelişimlerini kısıtlar ve öteler. Böylece daha yüksek miktarda gerilme hasarı karşısında daha kısıtlı çatlak aralıkları sunar [38]. Bakteriyel kendi kendine iyileşme davranışının kısıtlı çatlak aralıklarında daha etkin olduğu bilinmektedir [19]. Bu sebeple araştırmacılar bakterili kompozitlere fiber ekleyerek KKİ için daha uygun bir matriks yaratmayı amaçlamışlardır.

Homma vd. [40] bakteri olmadan kendi kendine iyileşme özelliğinin dahi (otojen iyileşme) fiberler varlığında daha üstün olduğunu göstermiştir. Çalışmasında çelik ve polietilen fiberler kullanarak harçlar üretmiştir. Bu harçlarda çatlak oluşturarak KKİ davranışını incelemiştir. Polietilen liflerin sahip olduğu yüksek boy/çap oranı sayesinde üstün bir köprüleme davranışı sergilediğini ve bu köprüleme davranışının KKİ'yi desteklediğini saptamıştır. Fiber barındıran çatlaklar arasında kalsit oluşumları birikmiştir ve fiberler tarafından kısıtlanan bu çatlaklar kalsitle daha hızlı şekilde doldurulmuştur. Kapanan bu çatlaklar sayesinde hasarlı harçlar, fibersiz serilere göre

daha düşük su emme oranları sergilerken daha yüksek artık eğilme dayanımları sağlamıştır.

Otojen iyileşmede dahi fiberlerin varlığı çatlak iyileşmesinde önemli bir faktörken bakteriyel KKI'de daha da önem kazanmaktadır. Çünkü MICP onarım yönteminde en önemli etkenlerden biri çatlak genişlik miktarıdır. Yamasamit vd. [54] çalışmasında ilk 28 günlük iyileşme sürecinde 0,5 mm genişlik miktarına kadar çatlaklar %80 oranında iyileştiğini, ancak bu çatlak genişliklerinin 1 mm düzeyine çıktığında iyileşme oranının %60'a düştüğünü göstermiştir. Böylece çatlak genişliği ile MICP onarım etkinliği arasındaki bağlantıyı vurgulamıştır.

Luo vd. [55] farklı çatlak genişliklerinin ilk 20 günlük bakteriyel tedavi sistemi sayesinde iyileşme miktarlarını araştırmıştır. 0,3 mm ve üzerindeki çatlak genişliklerinin 20 gün sonunda tamamen iyileşemediğini ve çatlak genişliği arttıkça çatlak iyileşme oranının da azaldığını saptamıştır. Böylece çatlak kısıtlanmasının önemi bakteriyel tedavi sistemi için önemi gösterilmiştir.

Özhan vd. [19] çalışmasında ise MICP sisteminin önceki çalışmalara paralel olarak daha kısıtlı aralıklarda daha etkin olduğunu saptamıştır. Bunun yanı sıra çatlak genişlikleri azaldığında MICP sisteminin daha uzun çatlakları da tamamen kapattığı raporlanmıştır. Bunun da toplam iyileşen hasar miktarı için önemini vurgulayarak, bu tipte bakterili betonların daha yüksek fiziksel ve mekanik özellikler sergilediği belirlenmiştir.

Feng vd. [56] bakterili kompozitlerde polipropilen (PP) ve polivinilalkol (PVA) lif kullanarak MICP etkinliğini arttırmayı başarmıştır. Liflerin bakterilerin canlılığı üzerinde önemsenecek bir etkisini olmadığını gösterirken, kompozite sağladığı fayda sayesinde kalsit oluşumlarını desteklediğini raporlamıştır. Fiber takviyeli kompozit yapısında fiberlerin köprüleme etkisinin pozitif etkileri yine gözlemlenmiştir. Ancak bu mekanizmanın ötesinde farklı bir fayda PVA lif kullanımında keşfedilmiştir. PVA liflerin, meydana gelen çatlak oluşumu esnasında çapındaki küçülme yüzünden lif etrafında minimal bir boşluk oluşmaktadır. Ancak bu boşluk MICP sistemine faydalı olmuştur. Çünkü matriksten kalsiyum iyonları bu boşluklarda birikmiştir ve bu kalsiyum iyonları bakteriler tarafından kullanılarak kalsite dönüştürüldüğü saptanmıştır. Kalsitlerin böylesine çatlak yüzeyindeki PVA boşluklarında oluşması ise üstün bir MICP tedavisi sunmuştur.

Vijay vd. [57] bakterili betonlara bazalt fiber eklenerek MICP sistemine etkisini incelemiştir. Çalışmada bazalt fiber takviyesinin bakterili betonlarla üstün bir uyum sergilediğini saptamıştır. Bu uyum sayesinde bazalt ve bakteri içeren betonlar basınç ve eğilme değerlerinde ciddi artışlar söz konusu olmuştur. Bazalt lif etkisi sayesinde, meydana gelen çatlaklarda bakteriler tarafından üretilen kalsit net şekilde SEM ve XRD analizleri kullanılarak tespit edilmiştir.

Vijay vd. [58] diğer bir çalışmada ise bazalt fiber ve bakteri birlikteliğinin betonun durabilite özellikleri üzerinde de yüksek bir korunum sağladığını kanıtlamıştır. Bazalt fiberin sahip olduğu yüksek kimyasal ve fiziksel dayanıklılığı sayesinde dış etkilere karşı betonun daha az hasar almasını sağlamıştır. Daha az hasar, dolayısıyla daha az çatlak ve boşluk barındıran betonlarda bakterilerin sağladığı kalsit oluşumları betonun dayanım özelliklerini geri kazanmasında daha etkin olmuştur. Bu daha düşük oranda hasarlanma ve yüksek oranda geri kazanım sayesinde bazalt fiber ve bakteri içeren numuneler karbonatlaşma derinliği deneyinde en düşük miktarı göstermiştir.

Hu vd. [59] volkanik kayaç parçalarına bakteri emdirerek ürettiği bakterili kompozitlere PVA fiber ekleyerek fiberler ile MICP arasındaki sinerjistik etkiyi araştırmıştır. Çalışma sonucunda PVA fiber eklenmesinin bakteriyel tedavi etkinliğini oldukça artırdığını ve 400 mikron genişliğinin altındaki çatlakları tamamen onarıldığı saptanmıştır. PVA fiberlerin kalsit oluşumlarını tetiklediği ve oluşan bu kalsit kristal yapıları fiber üzerinde oluşumları gelişkin mikroskop sistemleriyle görüntülenmiştir.

Kua vd. [60] çalışmalarında betonlara döngüsel şekilde gerilme yükleyerek betonda hasar oluşmasını sağlamıştır. Betonun servis ömrü boyunca birçok çoklu hasara maruz kalabileceği düşünüldüğünde bakterilerin bu hasarlara karşı vereceği tepkinin önemi vurgulanmıştır. Hasarlı bu betonlarda bakterilerin ve fiberlerin etkinliğini araştırmıştır. Fiber tipi olarak PVA ve çelik hibrit olarak kullanılmıştır. Hibrit fiberler tekrarlı yüklere karşı betonun bir arada kalma kabiliyetini artırarak daha çok enerjiyi yutmuştur ve betonun fiziksel hasar alma seviyesini azaltmıştır. Hibrit fiberlerin çatlak iyileşmesinde otojen iyileşmeye de faydalı olduğunu raporlansa da mikro düzeyden sonra bu etkinliğin azaldığını saptamıştır. Ancak bu düzeyden sonrada bakteriler ile fiberler arasındaki uyum sayesinde fiber kullanımının çatlak iyileşme üzerinde etkisinin hasar seviyesi arttıkça yükseldiği saptanmıştır. Çatlaklarda oluşan bu fiber ve bakteri iş birlikteliği sayesinde betonun hasar sonrasında basınç dayanımı ve elastisite modülü geri kazanımının da arttığı raporlanmıştır. Mekanik özelliklerde meydana

gelen bu iyileşmenin yanı sıra permeabilite özelliklerinin de bakteriyel kalsitleşme ve fiberin hasar azaltıcı etkisi sayesinde onarıldığı saptanmıştır.

Karimi vd. [61] *Bacillus subtilis* cinsi bakteriler kullandığı betonlara PP, çelik ve sentetik tipte fiberler ekleyerek betonunun durabilite özelliklerine etkisini incelenmiştir. Fiber ilavesi ve bakterilerin betonun porozitesine bağlı özelliklerini geliştirdiği raporlanmıştır. Öyle ki bakteri ve lif içeren numunelerde su, CO₂ ve klorür iyonu penetrasyon derinliklerinin sırasıyla %64,75, %39,77 ve %27,4'lük azaldığı raporlanmıştır.

Salmasi vd. [62] hafif agrega kullanılan bakterili betonlarda çelik fiber etkisini araştırmıştır. Bu çalışma sonucunda çelik fiberin hem beton özelliklerine hem de MICP özelliklerine pozitif etkisi kanıtlanmıştır. Çelik fiber takviyeli bakterili betonların, normal betonlara kıyasla, su emme değerleri, klorür penetrasyonu, karbonatlaşma derinliği ve su işleme derinliği değerleri sırasıyla %3,1, %20,5, %27,2 ve %44,3 oranında daha düşük tespit edilmiştir. Bu da bakterili kompozitler ile çelik fiber arasında yüksek uyumu göstermiştir.

Kumar vd. [63] cam ve çelik fiber ekleyerek farklı tipte fiber takviyeli bakterili betonlar üretmiştir. Bu betonlara yorulma gerilmeleri yükleyerek hasar vermiştir. Bu hasar üzerinde bakterilerin kalsit üretme yetenekleri ve mekanik özelliklere etkisi incelenmiştir. Çalışma sonucunda fibersiz kontrol numunelerine göre fiber takviyeli betonların çok daha yüksek korunumlar sergilediği saptanmıştır. Daha az hasar bu numunelerin bakteriyel tedaviye daha uygun olduğu ve daha üstün iyileşme oranları sergilediği anlaşılmıştır. Çalışma sonunda özellikle çelik fiberin yorulma karşısında etkili olduğu ve bunda bu hasar tipinde bakterili betonlar için önemli bir avantaj sağladığı kanıtlanmıştır.

Manojkumar vd. [64] ise çalışmasında cam fiberli ve fibersiz olmak üzere iki tipte bakterili beton üretmişlerdir. Ürettikleri betonların basınç dayanımlarını kıyasladıklarında cam fiberlerin, bakteri betonların basınç dayanımlarını %11,44 oranında arttırdığını saptamışlardır. Bu artış C20 dayanım sınıfında betonda cam fiberlerin daha dolu bir hacim oluşturmaya atfedilmiştir.

Zhang vd. [65] ultra yüksek performanslı betonlarda kullanılan çelik fiberlerin performansını MICP yöntemi kullanarak arttırmıştır. Çelik fiberlere MICP tedavisi uygulayarak fiber yüzeyinde kalsit oluşmasını sağlamıştır. Bu kalsitler çelik fiberlerin

yüzeyini daha pürüzlü ve hidrofilik hale getirmiştir. Oluşan bu yüzey sayesinde çelik fiberler beton yapısıyla daha sıkı bir bağ kurmuştur. Bu sıkı bağ sayesinde çelik fiberler ultra yüksek performanslı betonlara daha yüksek mekanik katkı sunabilmiştir. Öyle ki MICP sistemi sayesinde üretilen kalsitler ve çelik fiberler betonun basınç dayanımını %16, eğilme dayanımını ise yaklaşık olarak %50 oranında arttırmıştır.

Su vd. [66] *Bacillus alkalophilus* türü bakteri içeren harçlarda polipropilen lif kullanımının etkisini araştırmıştır. Bakterilerin, çatlak boşluğunda yer polipropilen fiberler üzerinde tutunmaya meyilli olduğunu göstermiştir. PP lifler üzerinde yer alan bu bakteriler kalsit üreterek çatlakların hızlı bir şekilde kapanmasını sağlamıştır. PP lif ve bakteri işbirliği sayesinde en yüksek fiziksel iyileşme oranları elde edilmiştir. Bu fiziksel iyileşme mekanik özelliklere yansımıştır ve PP lif varlığında bakterili harçlar en yüksek artık dayanımları sergilemiştir. PP lif ve bakteri etkisini arttırmak amacıyla bakteriyel hücre dışı polimerik maddeler (EPS) eklenmiştir. Bu EPS ilavesi sonrasında bakterilerin PP lif üzerinde malzeme özelliği gereğince bakterilerin daha sıkı tutunmasını sağlamış ve bakterilere kalsit üretimi için daha uygun koşullar sağlamıştır. EPS maddesi harç içeriğindeki çözünmüş katyonları emebilen yüklü makromolekül içerir ve böylece liflerin yakınında kalsiyum karbonat birikmesi için uygun bir ortam yaratılabilir. Bunun sonucu olarak PP lif ve EPS'nin KKİ kompozitlerdeki önemi saptanmıştır.

2.2 Kendi Kendini Onarabilen Kompozitlerde Fiberlerin Bakteri Koruyucu Olarak Kullanımı

Fiberlerin bakterili betonlarda kullanımı KKİ davranışına katkı sağlasa da bu katkı beton yapısına sağladığı faydayla ilişkilidir. Fiberlerin bakterinin canlılığı ve kalsit üretme yeteneğine doğrudan bir etkisi bulunmamaktadır. Bu sebeple araştırmacılar su emme kapasitesine sahip fiberlere bakteri emdirerek hem fiber davranışından faydalanılması hem de bakterilerin kalsit üretimi için canlılığının korunmasını sağlamıştır.

Singh vd. [41] çalışmasında kapsüllemenin bakterili beton için ne kadar meşakkatli ve pahalı bir yöntem olduğuna dem vurmuştur. Bu sebeple yeni bir yöntem olarak selüloz fiberleri bakteri koruyucu olarak kullanmayı keşfetmiştir. Selüloz fibere bakterileri basitçe emdirerek harç karışımlarına eklemiştir. Bu yöntemin beş tane ana amaç ve faydasının olduğu vurgulanmıştır. Bunlardan ilki selüloz fiberin sahip olduğu yüksek

porozite oranı sayesinde bakteri için yeterli alanı sağladığı ve aynı zamanda yeteri miktarda su ve oksijen tutabildiğidir. Böylece bakteri için uygun bir yaşam ve kalsit üretim alanı yaratıldığı raporlanmıştır. İkinci olarak, selüloz fiberin çatlaklar arasında köprü görevi görmesi ve dolayısıyla bu köprüde bulunan bakteri çokluğu nedeniyle (fiber içine emdirilmiş halde) kalsitin çatlaklarda hızlıca onarılmasını sağlamasıdır. Üçüncü etki ise fiberin harcın gevrekliğini azaltarak dış etkilere daha az ve kısıtlı genişlikte çatlak oluşturarak KKI efektifliğini artırmasıdır. Yöntemin dördüncü öne çıkarılan yönü ise oldukça basit bir şekilde solüsyon şeklinde emdirilen bakterilerin, selüloz fiber sayesinde çok daha uzun süre nemli kalabilmesi ve bunun ekstra bir masraf ve teknik uygulanmadan yapılabilmesidir. Yazarlar beşinci olarak yöntemlerinin öne çıkan yönünün selüloz fiberin yüksek hacimli beton üretimleri için bile uygun olduğunu, melamin ve hidrojel gibi diğer bakteri kapsülleme malzemeleri gibi bakterisiz beton üretiminde kullanılmayan malzemeler gibi olmadığına dikkat çekmiştir. Çalışmanın deneysel çalışma kısmı selüloz fiberler 1.3×10^7 bakteri hücresi/cm³ derişiminde olacak şekilde bakteriyel solüsyonda bekletilerek emmesi sağlanmıştır. Bu bakterili selüloz fiberler kullanılarak harçlar üretilmiştir. Üretilen bu harçlara 14 ve 28 günlük kür sonunda ön hasar verilerek yarı çatlak hale getirilmiştir. Ardından bakterilerin onarım özellikleri araştırılmıştır. Bakterili fiber içeren harç serileri %12 oranında daha fazla fiziksel iyileşme sergilemiştir. Üstelik hasar derecesi arttıkça lif etkisi sayesinde bakterili harçların kontrol numunelerine göre daha yüksek iyileşmeler gösterdiği saptanmıştır. Ancak basınç dayanımlarında ise besiyer ve diğer etkenler nedeniyle düşüşler görülmüştür ve yazarlar bunun dikkat edilmesi gereken değişkenler olduğunu göstermiştir. Çalışma sonucunda selüloz fibere emdirme yönteminin diğer kapsülleme yöntemlerinin yaklaşık olarak %7'si kadar bir maliyete sahip olduğunu göstermiştir. Buna karşın oldukça efektif olduğunu raporlamışlardır.

Rauf vd. [42] fibere bakteri emdirme yönteminin etkinliğini üç farklı bakteri türü ve üç farklı doğal fiber türü kullanarak araştırmıştır. Bakteri türü olarak *Bacillus subtilis*, *Bacillus cohnii* ve *Bacillus sphaericus* kullanılırken doğal fiber olarak Hindistan cevizi lifi, keten ve jüt kullanılmıştır. Bu lifler bakterili solüsyonda bekletilerek bakterileri emmesi sağlanmıştır. Bakteri emmiş bu lifler kullanılarak beton numuneleri üretilmiştir. Üretilen bu betonlara 7 gün ve 28 gün sonunda basınç yüklemeleri uygulanarak hasar oluşturulmuştur. Ardından bu hasarlı betonlardaki liflerin ve bakterilerin MICP iyileşmesine olan etkisi araştırılmıştır. Kullanılan tüm doğal lif

türünün de bakterileri başarılı bir şekilde tutabildiği ve kalsit oluşumu için desteklediği saptanmıştır. Erken yaşta hasarlanmanın KKİ etkinliğinin daha efektif olduğu belirlenmiştir. 7 günde verilen hasar sonrası hem otojen hem otonom bir iyileşme söz konusu olması ve bakterilerin oldukça aktif olması sayesinde 56 günlük kür sonrasında *Bacillus sphaericus* türü bakteri içeren harçlar 0,8 mm genişliğine kadar çatlakları kalsitle doldurarak kapamıştır. UPV deneyi sonucunda bakteri ve lif birlikteliği etkisini göstererek daha etkin ve daha uzun süren bir iyileşme sağlandığını kanıtlamıştır. Ketenin üstün hidrofilik özelliği sayesinde bakterileri üstün tutma kabiliyeti olduğunu ve bu sayesinde en yüksek UPV değerlerinin bakterili keten fiberli betonlarda tespit edildiği yazarlar vurgulamıştır. Basınç dayanımı değerlerinde ise en yüksek katkıyı bakterisiz durumda Hindistan cevizi lifleri sağlamıştır. Hindistan cevizinin keten ve jüt life göre sahip olduğu daha yüksek mekanik özellikler sayesinde betonlarında dayanımları artmıştır. Ancak en yüksek iyileşme oranları yine *Bacillus sphaericus* ve keten lif birlikteliğinde elde edilmiştir. Bu da kullanılan fiberin su emme ve tutma kapasitesinin KKİ için önemini vurgulamaktadır.

Anbazhagan vd. [67] jüt fiberin sahip olduğu yüksek miktardaki hemiselüloz sayesinde yüksek su emme kapasitesine sahip olduğunu belirtmiştir ve beton karışım suyunda bakteri bulunması halinde bu bakteriler için sağladığı ekstra nem ve tutuculuk sayesinde MICP mekanizmasına faydalı olduğunu saptamıştır. İki farklı kür yöntemi kullanarak, jüt fiberin farklı kür ortamlarında etkisi incelenmiştir. *Bacillus tropicus* ve *Bacillus paramycoides* türü bakteri ve jüt lif kullanarak ürettiği harçları su kürü ve ıslak örtü altında bekletme şeklinde kürlemiştir. Islak örtüleme yönteminin jüt fiberin varlığında daha etkili olduğunu ve daha yüksek oranda bakteriyel bir iyileşme sağlandığını raporlamıştır. Bu bağlamda jüt fiber ve bakteri içeren harçlar ıslak örtü altında %34 daha yüksek basınç dayanımı sağlarken, %92 oranında bir çatlak iyileşme oranı sağlamıştır. Mikro analizlerde ise jüt fiber etrafında ve üzerinde oluşan MICP ürünleri net olarak görüntülenmiştir.

Yıldırım vd. [45] çalışmasında *Bacillus megaterium* türü bakteri kullanarak ürettiği bakteriyel solüsyonu jüt fibere emdirerek kullanmıştır. Bakteri emmiş jüt fiberler ile üretilen harçlar üzerinde çatlak iyileşme ve basınç dayanımı değerleri incelenmiştir. Çalışmada jüt fiberlerin bakterilere üstün bir koruyuculuk sağladığını ve bu sayede 0,62 mm genişliğine kadar çatlakların kalsitle bakteriler tarafından onarılabildiği saptanmıştır. Jüt fiber takviyeli harçlar, kontrol harçlarına göre %3,4 oranında daha

yüksek basınç dayanımı sunmuştur. Ancak bakterili jüt fiberler kullanıldığında bu artış oranı %17,23'e çıkmıştır. Bu oransal artış jüt fiberin bakteriye sağladığı koruyuculuk ve olumlu şartları kanıtlamıştır.

Guo vd. [68] çalışmasında sisal fiberi bakteri koruyucu kullanmıştır. Sisal fibere vakum yöntemiyle *Bacillus pasteurii* türü emdirmiştir. Emdirdiği bu bakterili sisal fiberleri kullanarak betonlar üretmiştir. Ürettiği betonlar üzerinde alansal iyileşme, dayanım testleri, klor iyon geçirgenliği testi ve içyapı analizleri uygulanmıştır. Çatlak genişlikler incelendiğinde sisal fiber koruyuculuğunun etkisi açıkça gözlemlenmiştir. Fibersiz bakterili beton serilerinde 1,4 mm genişliğindeki çatlaklar yalnızca %20 düzeyinde iyileşirken, sisal fiberli bakterili serilerde bu oran %80 düzeyine çıkmıştır. Bu da yöntemin efektifliğini kanıtlamıştır. Sisal fiber varlığında çatlak ve boşluklarda daha yoğun meydana gelen bu kalsit oluşumları yarmada çekme dayanımlarını %28,7 arttırırken, basınç dayanımlarını %21,8 oranında arttırmıştır. Sisal fiberin sadece sahip olduğu boşluklu yapısı yüzünden betonun geçirgenliğini arttırdığı tespit edilmiştir. İç yapı analizlerinde bakteri ürünü olan kalsitin görünümleri ve sisal fiberle olan uyumu görüntülenmiştir.

Amjad vd. [69] sisal fibere *Bacillus subtilis* türü bakteri emdirerek beton üretmiştir. Bu betonları birbirini takip eden iki hasar döngüsüne maruz bırakarak numuneler üzerinde çatlaklar oluşmasını sağlamışlardır. Bu çatlak ve hasarın betonlar üzerindeki etkisini ve bakteri içeren sisal fiberler etkisini incelemiştir. Deney sonuçları incelendiğinde hasarsız hallerde dahi bu bakterili sisal fiber kullanımının betonun basınç dayanımlarını %13,96, çekme dayanımlarını %36,82 oranında arttırmıştır. Böylece sisal fiberin bakteriye sağladığı koruyuculuğun mekanik özellikler üzerinde etkisi gösterilmiştir. Ayrıca bakterilerin ürettiği kalsitin kılcallığa da olumlu etkisini saptamışlardır. Sisal fiber ilavesi kılcallık seviyesini sahip olduğu su emme kapasitesi sayesinde arttırmıştır. Ancak sisal fibere bakteri emdirilmesi sonucu, bu sisal fiberin olumsuz etkisinin giderildiği kanıtlanmıştır. Bakterili sisal fiber içeren kompozitler, fibersiz bakterili kompozitlerin kılcallık değerlerine yakın bir kılcallık değeri sergilemiştir. Çatlak iyileşme oranlarında da sisal fiber eklenmesi bakteriyel iyileşme sistemine ciddi faydalar sağlamıştır ve en yüksek iyileşme oranları bakterili sisal fiber içeren kompozitlerde saptanmıştır. İyileşen numunelerde sisal ve bakteri birlikteliği basınç dayanımı geri kazanımında %82,65, UPV değerlerinde ise %29,02'ye varan artışa neden olmuştur. Bakteri sporlarının sisal fiber içerisindeki dış ortamdan

korunum KKI süresini de uzatarak daha geniş çatlakların kapanmasını sağlamıştır. Kalsitin prizmatik şekli ve sisal fiberin fiziksel koruyuculuğu SEM altında görüntülenmiştir.

Amjad vd. [44] bakteri emdirilmiş sisal fiber takviyeli betonlarda durabilite özelliklerini incelemiştir. Bu kapsamda basınç, yarma, eğilme ve kesme dayanımlarını ölçmüştür. Ardından büzülme, su emme ve klor iyon geçirimliliği ve asit atak olmak üzere durabilite testlerini yürütmüştür. Tüm dayanım özelliklerinde bakterili sisal fiber içeren betonların en yüksek değerleri sağladığı raporlanmıştır. Bu yüksek değerlerin sadece sisal fiberin MICP sistemine sağladığı koruyuculuktan kaynaklanmadığı, bunun yanı sıra oluşan kalsitlerin sisal fiberin beton yapısına daha sıkı tutunmasını sağladığı belirtilmiştir. Matrikse daha sıkı tutunan sisal fiberlerin betonun daha yüksek enerji emebilmesini sağlamıştır ve tüm dayanım değerlerini arttırmıştır. Büzülme değerleri incelendiğinde bakteriler olmadan da sisal fiberlerin büzülme değerlerini %41,3 azalttığı görülmüştür. Bu azalma sisal fiberin büzülme nedeniyle meydana gelen mikro çatlakları kısıtlamasına ve iç kürleme etkisine atfedilmiştir. Bakteri sporlarının da devreye girmesiyle bu büzülme azalması kontrol numunelerine göre %58,9 azalmıştır. Sisal fiberin yüksek su emme özelliği nedeniyle fiber takviyeli betonların su emme değerleri, kontrol numunelerine göre daha yüksek tespit edilmiştir. Ancak bakterilerin ürettiği kalsitlerin yüksek oranda su emen yapıyı bu bloklamıştır ve en düşük su emme oranlarına ulaşılmıştır. Bu su emme değerlerine paralel olarak klor iyon geçirimliliğinde de benzer bir davranış saptanmıştır. Bakterilerin ürettiği kalsit mikro yol ve porları tıkayarak iyon geçirimliliğini azaltmıştır. 56 gün sonunda kontrol numunelerinin klor iyon geçirimlilik değerlerinde %10'luk bir artış gözlemlenirken, bakterili sisal fiber içeren betonlarda %24'lük bir azalma saptanmıştır. Asit atağı testlerinde sisal fiberin olumsuz bir etki yaptığı görülmüştür. Organik yapısı yüzünden asit karşısından çözünerek ekstra kayba neden olmuştur. Ancak bakterili numunelerin asit atağına karşı %23,2 oranında daha dirençli olduğu belirlenmiştir.

Igbokwe vd. [70] polimer bir kalıbı 3D yazıcı da üreterek MICP yönteminin mukavemet etkisini araştırmıştır. Kullandığı *Lysinibacillus Sphaericus* türü bakteri sporlarını farklı oranlarda selüloz fiberlerle kullanarak fiberin bakteriyel tedavi üzerindeki etkisini araştırmıştır. En yüksek basınç ve yarmada çekme dayanımlarının bakterili selüloz fiber içeren betonlarda olduğu tespit edilmiştir. Islak koşullarda

bakterili selüloz fiber içeren betonların 2,5 mm' e kadar çatlakları onarabildiği gösterilmiştir. Bu onarımın durabilite özelliklerine de pozitif yansıdığı belirtilmiştir. Yüksek sıcaklık ve asit etkisi sonucunda bakterili selüloz fiber içeren betonlar, bakterinin ve fiberin beton yapısında gösterdiği gelişim sayesinde daha üstün değerler sağlamıştır. Kontrol betonları yüksek sıcaklık sonrası dayanımlarının yaklaşık %30'unu kaybederken, bakterili selüloz fiber içeren seriler sadece %5 dayanım kaybı yaşamıştır. Bu da selüloz fiberin bakterili çimentolu kompozitlerde koruyucu olarak kullanımının etkinliğini göstermiştir.

Thakare vd. [53] çalışmasında ise ilk kez bir atık malzemenin bakteriyel koruyucu olarak kullanılmıştır. Çalışmada atık araç lastiklerinden türetilen kauçuklar fiber işlevi ile kullanılmıştır. Su emme yeteneğine sahip bu kauçuk atıklara bakteri sporu emdirilerek KKI davranılı gösteren harçlar üretilmiştir. Harçlar üzerinde yapılan deneyler sonucunda bu atık malzemenin bakterilere koruyuculuk sağladığı ispatlanmıştır. Bu atığın çimento ve beton arasında sağladığı zayıf bağın bakterilerin ürettiği kalsit sayesinde kuvvetlendirildiği SEM analizleriyle belirlenmiştir. Böylece sadece KKI davranışının değil, bakterilerin bir atık malzemenin kullanımını da teşvik edebileceğini göstermiştir.

Tüm bu çalışmalardan bakterilerin yüksek su emme kapasitesine ve fiber özelliğine sahip malzemeler kullanılarak üretilen bakterili kompozitlerin daha üstün KKI davranışı sergilediği sonucu çıkarılmıştır. Ancak bu tekniğin son 4 yıl içerisinde ortaya çıkması ve henüz yeterli sayıda araştırma olmaması nedeniyle bu alanda yapılacak çalışmalar oldukça kıymetlidir. Bu tez çalışması da bu amaçla yürütülmüştür ve çay atıklarının bu tekniğe uygunluğu araştırılmıştır.

2.3 Çay Atıklarının Yapı Malzemelerinde Kullanımı

Çay üretim sürecinde ortaya çıkan atıklar toplam çay miktarının %4'üne denk gelmektedir. Çayın dünya genelinde yaygın üretimi düşünüldüğünde devasa miktarda çay atığı ortaya çıkmaktadır. Bu çay üretim atıklarını betonda kullanmak çay atıklarının bertarafına yardımcı olabilir. Bu sebeple araştırmacılar fiber formundaki bu çay üretim atıklarının betona yararlı olacak özelliklerini araştırmak amacıyla çalışmalar yürütmüştür.

Cao vd. [50] çay üretim atıklarını doğal fiber olarak kullanmış ve beton numuneleri üretmiştir. rettiği bu numuneler üzerinde mekanik deneyler yrtmştir. Yürütülen bu deneyler sonucunda, uygun oranda kullanıldığında çay atıklarının doğal fiber olarak işlev gördüğünü ve betonun basınç ve eğilme dayanımlarını arttırdığını saptamıştır. Üstelik ay atıklarının erken hidrasyonu ötelediğini ve böylece hidrasyon ısısını düşürdüğünü belirlenmiştir. Böylece ay atıklarının erken yaş dayanımlarını düşürse de uzun dönemde daha etkili bir katkı verdiği gösterilmiştir.

Caronge vd. [51] çay atıklarını kl hale getirerek içeriğinin çimentolu kompozitlerle olan uyumunu araştırmıştır. Dört farklı oranda ikameli olarak beton karışımlarına eklenen çay atıklarının beton özelliklerine olumlu özellikler sunduğu grlmştir. Betonların kme değerlerini olumsuz etkilese de yine de kullanılabilir aralıklarda olduğu belirtilmiştir. Çalışmada ay atığı küllerinin puzolanik etkiye sahip olduğunu ve bu sayede ikincil hidrasyon ürünleri ile tepkime girerek dayanım değerlerini yükselttiğini saptamışlardır. ay atığı kl içeren betonlar kontrol numunelerine göre 90 gün sonunda %4,57 oranında daha fazla basınç dayanımı değeri göstermiştir. ay atıklarının sahip olduğu bu puzolanik etki sayesinde betonların porozite değerleri azalmıştır ve buna bağlı olarak betonların klor iyon geçirgenliği azalmıştır. ay atığı ilavesinin daha sıkı bir CSH jel ve içyapı yarattığı SEM analizleri ile görüntülenmiştir.

Jakhrani vd. [52] çay atığı kullanımının otojen bzlmeye olan etkisini gözlemlemek adına çay atığı, silis dumanı ve perlit içeren farklı harçlar üretmiştir. En yüksek büzülme değerleri kontrol numunelerinde tespit edilirken, en düşük büzülme değerleri çay atığı takviyeli harçlarda belirlenmiştir. ay atıklarının sağladığı bu faydanın sahip olduğu su tutma kapasitesi ve sağladığı nem sayesinde olduğu belirtilmiştir. Erken yaşlarda çay atıklarının ve perlit kullanımının dayanım değerlerini azalttığı görülsede, ilerleyen yaşlarda harçların dayanımları yükselmiştir. Bu da çay atıklarının i krleme etkisiyle bağdaştırılmıştır. ay atıklarının UPV değerlerini boşluklu yapıları yüzünden olumsuz etkilediği saptanmıştır. Ancak ay atığı ve perlite kullanımının silis dumanı ikamesiyle bertaraf edilebileceğini ve çay atıklarının sağladığı faydalardan yararlanabileceği raporlanmıştır.

Al biajawi vd. [71] çalışmasında çay atıklarını yakarak ve gerekli kimyasal süreçten geçirerek karbon nanotüp üretmiştir. Bu şekilde kullanıldığında da harçların basınç dayanımını ve içyapı özelliklerini geliştirdiği sonucu bulunmuştur. Böylece imentonun CO₂ salınımının çay atıkları kullanılarak azaltılabileceği raporlanmıştır.

Horma vd. [72] kullanılmış çay yapraklarını kullanarak beton numuneleri üretmiştir. ay atıklarının ilavesiyle birlikte beton numunelerinin termal iletkenlik ve termal geçirgenliğin %35'e varan oranlarda azaldığı grlmştr. ay atıklarının hafifliği sayesinde betonların yoğunluk değerlerinin azaldığı saptanmıştır. Ancak dayanım değerlerinde azalmalar yaşandığı ve bu sebeple çay atığı ilavesi oranlarının %2,5 ile sınırlandırılması gerektiği raporlanmıştır.

Hussain çalışmasında [73] atık çay partikülleri kullanarak imento harçları üretmiştir. Bu ay atıklarının büzülme engelleyici ve i krleme ajanı olarak kullanımını araştırmıştır. Yaş halde ve erken yaşta yapılan deneyler sonucunda çay atıklarının hidrasyon ısısını yaklaşık 17 derece azalttığını ve böylece otojen büzülme değerlerine olumlu etkiler sağladığı saptanmıştır. Ancak ay atığı kullanımının harçların boşluk ve su emme değerlerini arttırdığı grlmştr. ay atığı parçacıkları basınç dayanım değerlerinde düşüşe sebep olsa da, bu düşüşler beton yaşının artmasıyla ve silis dumanı kullanımıyla telafi edilmiştir. Bu da i krleme etkisiyle ilişkilendirilmiştir. Asit atağı testlerinde ise çay atıklarının çözünebilir yapısı yüzünden çay atığı içeren harçlar daha yüksek kayıplar yaşamıştır.

Jakhrani vd. [74] yüksek dayanımlı imento harlarındaki yüksek hidrasyon ısısının zararlı hasarlarını önlemek için çay atıklarını kullanmıştır. İki parça boyutta çay atığı kullanılan çalışmada harç numuneleri üretilmiştir. Hidrasyonu geciktirmek ve daha düşük ısıların ortaya çıkmasını sağlamada iri parçacıkların daha etkili olduğunu saptamıştır. Harçların birim ağırlıklarının özellikle iri parçalı çay atığı kullanımıyla azaldığı grlmştr. Ancak boşluk özellikleriyle bağdaşan UPV ve su emme özellikleri ise çay atıkların ikamesi ile azalmıştır. ay atıklarının poroz yapısı yüzünden bu tip azalışların yaşandığı vurgulanmıştır.

Literatür araştırması sonucunda çay atık tipinin ve kullanım biçiminin çimentolu kompozit üzerindeki etkisinde önemli bir rol oynadığını göstermiştir. Özellikle ay üretim atıklarının ve lifsi yapısının doğal lif olarak kullanımının mümkün olduğu grlmştr. Ancak bu konu üzerindeki çalışmaların arttırılması, bu devasa miktardaki çay üretim atıklarının bertarafı için önemlidir.

3. GEREÇ VE YÖNTEM

3.1 Malzemeler

Tüm deney sürecinde kullanılmak üzere çimento harçları üretilmiştir. Bu harçlarda kullanılan malzemelerin özellikleri ilgili başlıkları altında verilmiştir.

3.1.1 Çimento

Harç karışımlarında CEM I 42.5R tipi EN 197-1 standardına [75] uygun Portland çimento bağlayıcı olarak kullanılmıştır. Çimento içeriği Çizelge 3.1’de verilmiştir.

Çizelge 3.1 : Çimentonun kimyasal ve fiziksel özellikleri.

Bileşen /özellik	İçerik değeri
CaO (%)	62,38
SiO ₂ (%)	20,12
Al ₂ O ₃ (%)	5,88
Fe ₂ O ₃ (%)	2,40
MgO (%)	1,87
SO ₃ (%)	3,28
Na ₂ O (%)	0,38
K ₂ O (%)	0,93
Kızdırma kaybı (%)	1,82
Özgül ağırlık (g/cm ³)	3,11
Blaine değeri (cm ² /gr)	3800

3.1.2 Agregat

Harç karışımlarında TS EN 196-1 [76] standardına uygun CEN standart kumu kullanılmıştır.

3.1.3 Biyolojik katkı (bakteri)

Çalışmada biyolojik katkı olarak kullanılmak üzere Ankara Refik Saydam Hıfzısıhha Enstitüsünden *Bacillus megaterium* türü bakteri temin edilmiştir.

3.1.4 Besiyerler

Çalışmada harç karışımlarına bakteri besiyeri olarak Kalsiyum laktat ve üre kullanılmıştır. Kalsiyum laktat ve ürenin özellikleri Çizelge 3.2'te verilmiştir.

Çizelge 3.2 : Kullanılan kalsiyum laktat ve ürenin genel özellikleri.

Özellik	Üre	Kalsiyum laktat
Kimyasal formül	$\text{CH}_4\text{N}_2\text{O}$	$\text{C}_6\text{H}_{10}\text{CaO}_6 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$
Renk	Beyaz	Beyaz
Moleküler ağırlık	60,06 g/mol	308,29 g/mol
pH	8-9	7 (20 °C, 50 g/L in H_2O)

3.1.5 Çay atıkları

Çalışmada bakteri koruyucu olarak çay atıkları kullanılmıştır. Bu amaçla çay üretim tesisinden kompost halde çay atıkları temin edilmiştir. Çay atıklarının fiziksel özellikleri ve kimyasal özellikleri Çizelge 3.3'te verilmiştir. Çay atıkları ilk olarak nemden arındırmak amacıyla 45°C sıcaklıkta sabit ağırlığa gelene dek etüvde bekletilmiştir. Ardından çay atığı liflerin boyut analizi yapılmıştır. Boyut analizi sonucunda bakteriyi emebilecek çapa ve uzunluğa sahip olduğu saptanmıştır. Kalınlık değeri, bakterileri emme açısından kritiktir. Çünkü bazı poroz materyaller bakterilerden küçük olması nedeniyle bakteri sporlarını ememezler [20].

Çizelge 3.3 : Çay atıklarının özellikleri

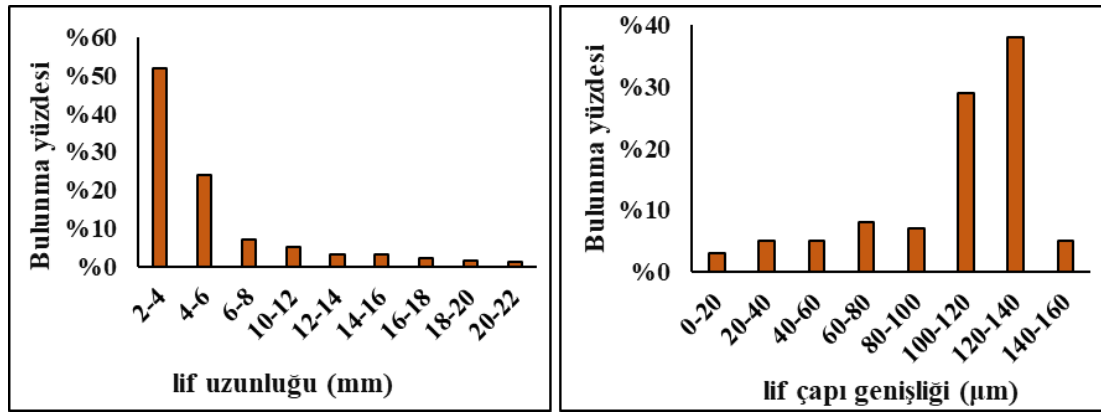
Özellikler	Çay atığı
Uzunluk (mm)	2-22 (ortalama 5,71 mm)
Çap (μm)	5-160 (ortalama 105 μm)
Su emme kapasitesi (%)	380%
Yoğunluk (g/cm^3)	1,45

Çay atıklarının fiber formu ve görüntüsü Şekil 3.1'de gösterilmiştir.



Şekil 3.1 : Çay atıklarının görünümü

Çay atıklarının boyut analizi sonuçları grafiksel olarak Şekil 3.2’de verilmiştir.

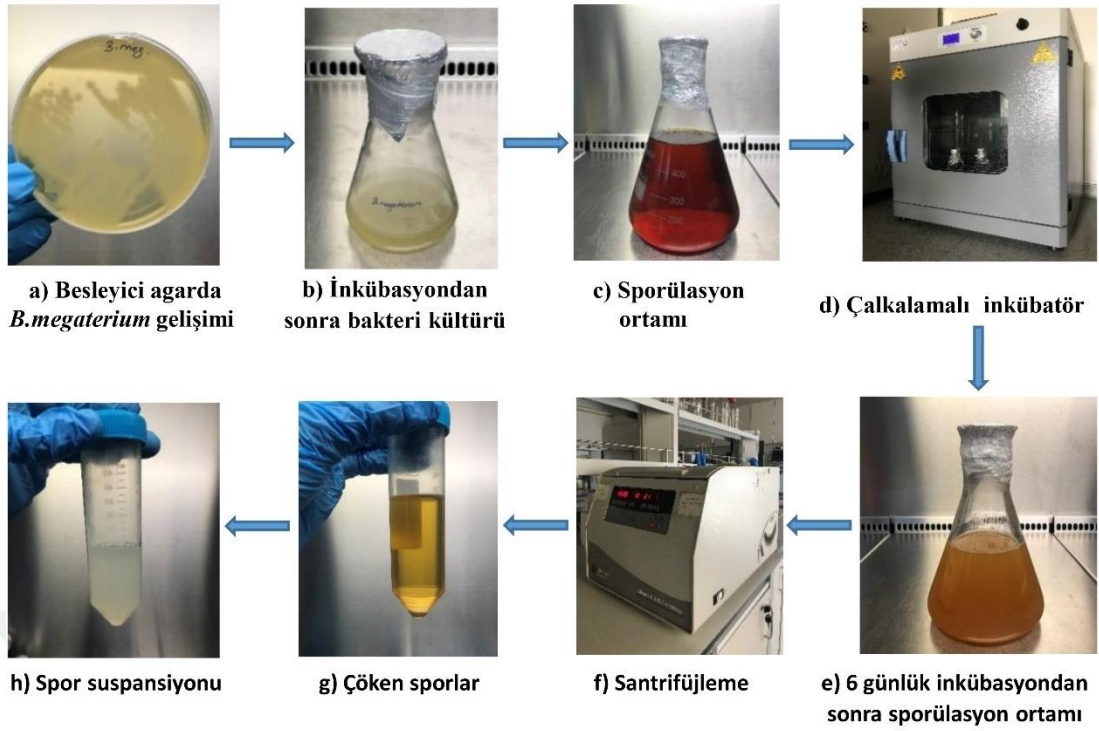


Şekil 3.2 : Çay atıklarının boyut analizi sonuçları

3.2 Yöntem

3.2.1 Bakteri sporlarının hazırlanması

Araştırmada bakteri türü olarak Ankara Hıfzısıhha'dan temin edilen *Bacillus megaterium* kullanılmıştır. *B.megaterium* sterilize edilmiş nutrient sıvı besiyerinde 30 °C’de, 150 rpm çalkalama hızında 24 saat süreyle inkübe edilmiştir. Bakteri sporlarının hazırlanması için sporülasyon ortamı ($MgSO_4 \cdot 7H_2O$ 1,01 mM, KCl 13,4 mM, $FeSO_4$ 0,001 mm, $Ca(NO_3)_2$ 1,0 mM, $MnCl_2$ 0,01 mM) hazırlanmıştır (pH 7,2) ve 121 °C’de 15 dakika boyunca otoklavlayarak sterilize edilmiştir. 500 mL sporülasyon ortamı %1 (v/v) *B.megaterium* kültürü ile aşılansın 30 °C ve 150 rpm çalkalama hızında 6 gün süreyle inkübe edilmiştir. İnkübasyon sonunda spor oluşumu için 85 °C’de 15 dakika bekletilmiştir. Sporülasyonu belirlemek için pastörizasyondan önce ve sonra bakteri sayımları yapılmıştır. Bu amaçla kültür seyreltilerek besin agarına aşılansın ve 30 °C’de 24 saat inkübasyona bırakılmıştır. Sporlar, 4 °C’de, 5000 rpm’de 15 dakika süreyle santrifüjleme yoluyla toplanmıştır. Süpernatantın uzaklaştırılmasından sonra kalan materyal, deiyonize su kullanılarak üç kez iyice temizlenmiştir. Sporlar steril damıtılmış su içinde süspanse edilip hücre yoğunluğu McFarland Standard 5’e ayarlanmıştır. Bu değer, yaklaşık $1,5 \times 10^9$ koloni oluşturan birim (CFU)/mL içeren bulanıklığa eşdeğerdir. Süspansiyon daha sonra kullanılmak üzere 4 °C’de saklanmıştır [77,78]. Bakteriyel spor hazırlama prosedürü Şekil 3.3’te verilmiştir.



Şekil 3.3 : Bakteri sporlarının hazırlanma süreci.

3.2.2 Çay atığının bakteriler üzerindeki anti-mikrobiyal etkisinin belirlenmesi

Çay atıkları kullanılmadan önce deneyde kullanılan bakterilerle uyumluluğu da araştırılmıştır. Çay atıkları biyolojik bir atık olduğundan bakteriyel enzim aktivitesine etkisi önemlidir. Bu nedenle antimikrobiyal test uygulanmıştır. Antimikrobiyal aktivitenin belirlenmesi için *B.megaterium* besin besiyerinde 30 °C'de, 150 rpm çalkalama hızında 24 saat inkübe edildi. Bakteri kültürü 0,5 McFarland bulanıklık standardına ayarlandı ve besin agar plakasına aşılandı. Öğütülmüş ve sterilize edilmiş çay atığı lifleri aşılınmış agar plakalarına yerleştirildi. Ortam, 30 °C'de 24 saat inkübe edildikten sonra bir inhibisyon bölgesinin varlığı açısından değerlendirilmiştir.

3.2.3 Harç karışımları ve numune üretimi

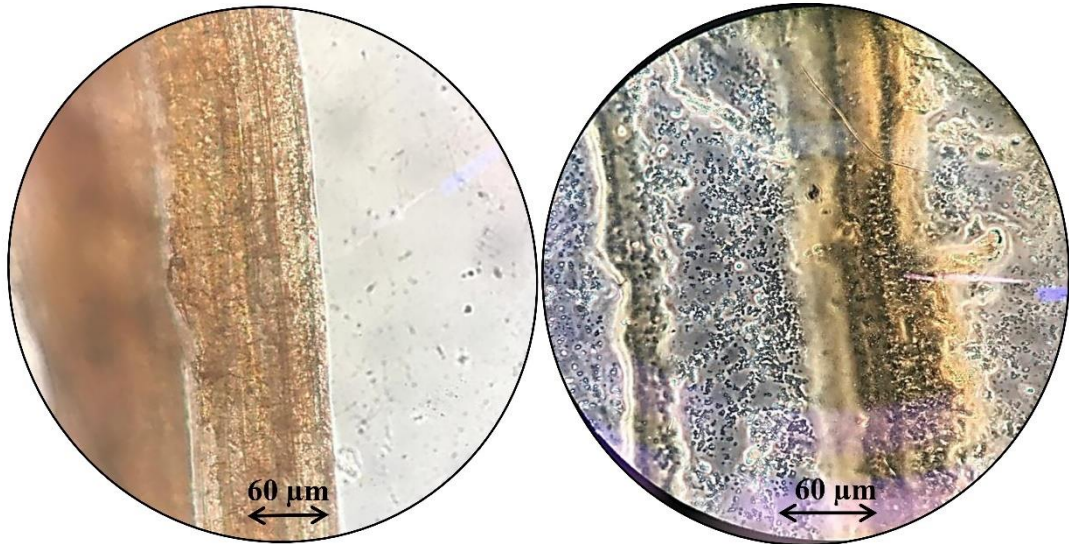
Çalışma da küp ve prizmatik harç numuneleri üretilmiştir. Çizelge 3.4' de verilen miktarlar kullanılarak sekiz farklı tip harç üretilmiştir. Kontrol numuneleri KH, bakteri sporlu numuneler BH, çay atık takviyeli numuneler ÇA, bakteri sporu emdirilmiş çay atık takviyeli numuneler BÇA olarak adlandırılmıştır. Harç karışımlarına çimento ağırlığına göre %0,2, %0,4 ve %0,6 oranında çay atığı eklenmiştir. Böylelikle atık kullanım oranının hem harç özelliklerine hem de bakteriyel kendi kendine iyileşmeye etkisinin incelenmesi amaçlanmıştır. Besiyerler çimentolu kompozit dayanımlarını etkileyen bileşenlerdir [79]. Bu sebeple literatürde belirlenen optimum dozajlar

kullanılmıştır [45,80]. Yüksek üreaz enzim kapasitene sahip olan *Bacillus megaterium* türüne [81] uygun olarak, harç karışımlarına çimento ağırlığının %2 oranında üre ve %0,5 oranında kalsiyum laktat eklenmiştir.

Çizelge 3.4 : Harç karışım oranları (g)

Numune adı	Çimento	Kum	Su	Üre	Kalsiyum laktat	Çay atığı	Bakteriyal solüsyon (hücre/ml)	Katkı (SP)
KH	500	1375	242,5	10	2,5	-	-	0,7
BH	500	1375	242,5	10	2,5	-	10^7	0,7
ÇA2	500	1375	242,5	10	2,5	%0,2	-	1,2
ÇA4	500	1375	242,5	10	2,5	%0,4	-	1,8
ÇA6	500	1375	242,5	10	2,5	%0,6	-	2,4
BÇA2	500	1375	242,5	10	2,5	%0,2	10^7	1,2
BÇA4	500	1375	242,5	10	2,5	%0,4	10^7	1,8
BÇA6	500	1375	242,5	10	2,5	%0,6	10^7	2,4

BÇA üretimlerinde kullanılan çay atıkları 20 dakika boyunca 10^7 hücre/mm derişiminde *Bacillus megaterium* sporu içeren bakteriyal solüsyon içerisinde bekletilmiştir. Böylece çay atıklarının bakteri sporlarını iyice emmesi sağlanmıştır. Bakteri sporu emmiş çay atıklarının ışık mikroskobu altındaki görüntüleri Şekil 3.4'te görülmektedir.



Şekil 3.4 : Su emmiş (sol) ve bakteri (sağ) solüsyonu emmiş çay atıklarının mikroskop görüntüsü.

Noktasal yapı olarak görülen bakteri sporlarının, çay atığı yapısına nüfuz ettiği açıkça tespit edilmiştir. Çay atıklarının bakteriyal solüsyon içerisindeki görünümü Şekil 3.5'de verilmiştir.



Şekil 3.5 : Bakteri sporu çözeltisinde çay atıklarının görünümü.

1 dakika boyunca kuru karışım yapılmış çimento, kum, üre ve kalsiyum laktat karışımının içerisine bu bakteriyel spor solüsyonu ve çay atıkları eklenmiştir ve 1 dakika boyunca 140 rpm’de karıştırılmıştır. Ardından süper akışkanlaştırıcı (SP) eklenerek 1 dakika boyunca karıştırılmaya devam edilmiştir. Yayılma değerleri 23 ± 2 cm değerinde tutularak bu değerleri sağlayacak miktarda süper akışkanlaştırıcı katkı eklenmiştir. Karışım işlemi tamamlanan harçlar kalıplara dökülmüştür ve vibrasyon işlemi uygulanarak boşluk oluşması önlenmiştir. Kalıplanmış taze harçlar 24 saat boyunca oda sıcaklığında bekletilmiştir. Kalıptan sökülen numuneler deney gününe dek oda sıcaklığındaki içme suyu içerisinde bekletilmiştir. Ardından ilgili deneylerde kullanılmışlardır.

3.2.4 Harç numunelerin hasarlanması

Tüm test metotlarında ön hasarlı ve hasarsız olmak üzere iki tip numune kullanılmıştır. Böylece bakteriyel çay atıklarının hem takviye hem de iyileşme ajanı olarak etkisi incelenmiştir. Su kürüne 14 gün boyunca maruz bırakılan küp numuneler basınç presi altında basınç dayanımlarının %90’ı kadar yükleme yapılarak yarı-çatlak hasarlı hale getirilmiştir [22]. Bu yükleme nedeniyle küp harç numuneleri üzerinde 0.1-1.2 mm aralığında çatlaklar oluşturulmuştur. Bu çatlaklar üzerinde KKI tedavisi araştırılmıştır. Ek olarak, hasarsız numune serileri de üretilerek herhangi bir hasar olmadan da bakteriyel oluşumların ve çay atıklarının etkisi incelenmiştir.

3.2.5 Yayılma tablası deneyi

Çay atıklarının lifsi yapısının ve bakteri sporlarının harçların yayılma değerlerine olan etkisini incelemek amacıyla yürütülmüş bir deney metodudur. Tüm test süreci TS EN 1015-3 (2023) standardına göre yürütülmüştür [82].

3.2.6 Çatlak iyileşmesi

Yükleme nedeniyle ön hasarlı (yarı-çatlak) haldeki numuneler yüklemenin ardından su kürüne geri bırakılarak 28 ve 90 gün boyunca kürlenmiştir. 28 ve 90 gün sonunda yükleme nedeniyle oluşan çatlak genişliklerinin kapanma miktarları ölçülmüştür. Bu deney tüm numuneler üzerinde yürütülerek çimentolu harcın otojen kapanması ile bakteriyel iyileşmesi kıyaslanmıştır ve çay atıklarının iyileşmeye olan katkısı araştırılmıştır. Çatlak tespitinde 200× büyütme kapasiteli optik mikroskop kullanılmıştır.

3.2.7 Basınç dayanımı deneyi

Küp harç numuneleri kullanılarak ASTM C109 [83] standardına uygun şekilde 28 ve 90 günlük basınç dayanımları belirlenmiştir. Ön hasarlı ve hasarsız olmak üzere toplamda 16 farklı serinin basınç dayanımları (C_n) belirlenmiştir. Hasar gününden sonra numuneler 28 ve 90 günlük küre tabi tutulmuştur. Kür sonrası tüm serilerin iyileşme sonrası basınç dayanımları (C_i) belirlenmiştir. Bu değerler Denklem 3.1 kullanılarak basınç dayanımı kaybı yüzdeleri belirlenmiştir. Her seriden 6 adet küp harç numunesi kullanılmıştır.

$$\text{Basınç dayanımı kaybı (\%)} = [(C_n - C_i)/C_n] \times 100 \quad (3.1)$$

Denklem 3.1’de görüleceği üzere C_n , nihai basınç dayanımını, C_i , iyileşme sonrası basınç dayanımını ifade eder.

3.2.8 Eğilme dayanımı deneyi

Eğilme dayanımı testleri ASTM C348 [84] standardına göre yürütülmüştür. Tek noktadan yüklemeye ile yapılan deneylerde 4 cm × 4 cm × 16 cm boyutundaki harç numuneleri kullanılmıştır. Her harç tipinden 6 adet numune kullanılmıştır.

3.2.9 Ultrasonik ses geçiş hızı deneyi (UPV)

UPV test süreci ASTM C597-9 (2009) [85] standardına göre yürütölmüştür. Denklem 3.2 kullanılarak UPV değeri belirlenmiştir. Böylece bakteriyel tedavinin ve çay atığı ikamesinin harç yapısındaki yoğunluğa ve çatlaklara etkisi incelenmiştir.

$$V = L/T \quad (3.2)$$

Denklem 3.2 göröldüğü üzere V, ses geçiş hızını (km/sn), L, verici ve alıcı arasındaki numune genişliğini (km), T, geçiş zamanını (sn) ifade etmektedir. UPV deney uygulaması Şekil 3.6’da gösterilmiştir.



Şekil 3.6 : UPV deney süreci.

3.2.10 Su emme deneyi

ay atıklarının yüksek su emme kapasitesinin ve bakterilerin ürettiği kalsit oluşumlarının betonun su emme değeriine etkisi araştırmak amacıyla yürütölmüş bir test metodudur. Su emme testleri ASTM C642 (2006) [86] standardına göre yürütölmüştür. Ön hasarlı ve hasarsız olmak üzere her seriden 6 adet küp harç numuneleri kullanılarak 28 ve 90 günlük su emme değeri belirlenmiştir.

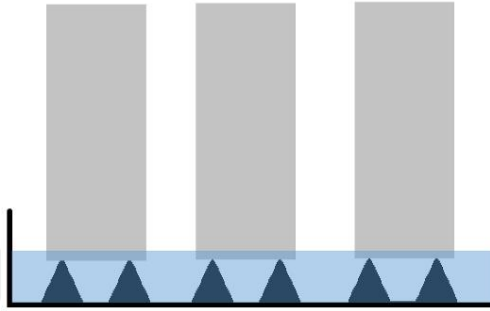
3.2.11 Kapiller su emme deneyi

Kapiller su emme testleri ASTM C1585-13 (2014) [87] standardına uygun olarak yürütölmüştür. Bakteriyel katkının ve çayın kılcal kanallarda sıvı iletimine olan etkisini araştırmak için yürütölmüştür. Deneyde 4 cm × 4 cm × 16 cm boyutunda prizmatik harç numuneleri kullanılmıştır. Numunenin yan yüzeyleri parafilmle kaplanarak su geçirmez hale getirilmiştir. Ardından 4 cm × 4 cm’lik taban yüzeyi (A)

suya 1440 dk (t) boyunca temas ettirilerek kapiller yolla emilen su miktarı (W_{su}) ölçülmüştür. Denklem 3.3 kullanılarak kapilarite katsayısı (Q) değeri belirlenmiştir. Her seriden 6 adet prizmatik harç numunesi kullanılmıştır.

$$Q = \frac{W_{su}}{A\sqrt{t}} \quad (3.3)$$

Denklem 3.3’de görüleceği üzere Q, kapilarite katsayısını, W_{su} , emilen su ağırlığını, A, numune yüzeyini, t, zamanı ifade eder. Kapiller su emme deneyinin şematik gösterimi Şekil 3.7’de gösterilmiştir.



Şekil 3.7 : Kapiller su emme deneyinin şematik gösterimi.

3.2.12 Görünür porozite deneyi

Oluşan bakteri ürünü kalsitlerin poroziteye olan etkisini ve çay atıklarının rolünü araştırmak amacıyla yürütülen bir deneydir. Deneyde 5cm ayrıtlı küp harç numuneleri kullanılmıştır. Her seriden 6 adet numune kullanılmıştır. İlk olarak numunelerin kuru yüzey doygun hal ağırlığı (W_{kydh}) belirlenmiştir. Sonrasında bu numuneler Arşimet terazisi kullanılarak su içindeki ağırlıkları (W_{su}) tartılmıştır. Arşimet terazisinde ölçüm süreci Şekil 3.8’de verilmiştir. Son olarak harç numuneleri etüvde değişmez ağırlığa gelene dek kurutulmuştur. Oda sıcaklığına gelen bu numunelerin etüv kuru ağırlıkları (W_{kuru}) ölçülmüştür. Ardında Denklem 3.4 kullanılarak görünür porozite oranı (p) belirlenmiştir.

$$p (\%) = \frac{W_{kydh} - W_{kuru}}{W_{kydh} - W_{su}} \quad (3.4)$$

Denklem 3.4’de görüleceği üzere p, görünür porozite oranını, W_{kydh} , kuru yüzey doygun hal ağırlığını, W_{kuru} , kuru ağırlığı, W_{su} , arşimet terazinde ölçülen ağırlığı ifade eder.



Şekil 3.8 : Arşimet terazi kullanılarak su içindeki harç ağırlık tartımı.

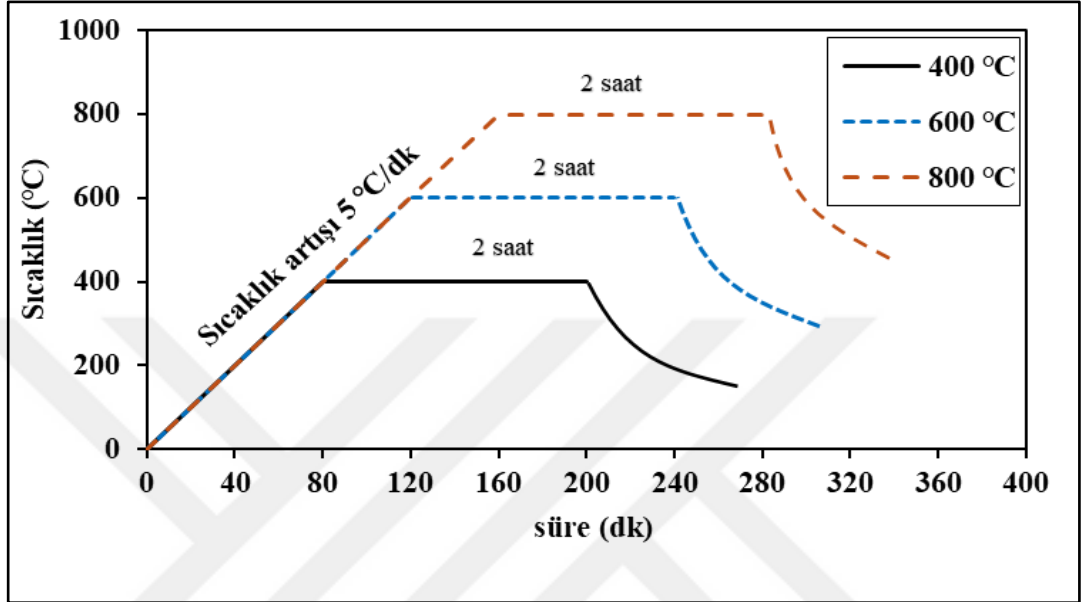
3.2.13 Yüksek sıcaklık etkisi deneyi

Bakteri ürünü olan kalsit oluşumlarının harç yapısındaki varlığının ve MICP sisteminin kapattığı çatlakların yüksek sıcaklık karşısındaki dayanıklılığa olan etkisini incelemek amacıyla yürütülmüş bir deney metodudur. Ön hasarlı ve hasarsız tipinde iki çeşit numune kullanılmıştır. 28 ve 90 günlük küp harç numuneleri üç farklı sıcaklığa maruz bırakılmıştır. 5°C/dk artış hızıyla 400 °C, 600 °C ve 800 °C'ye kül fırını kullanılarak maruz bırakılmışlardır. Harç numunelerinin kül fırını içerisindeki görünümü Şekil 3.9'da verilmiştir.



Şekil 3.9 : Harç numunelerinin kül fırını içerisindeki görünümü.

Yüksek sıcaklığa maruz bırakılma prosedürü grafiksel olarak Şekil 3.10'da gösterilmiştir. Yüksek sıcaklığa maruz bırakılan numuneler oda sıcaklığına gelince basınç dayanımları tespit edilmiştir. Her seriden 6 adet küp numune kullanılmıştır. Böylece çay atığı ve bakterilerin yüksek sıcaklık sonrası artık dayanıma olan etkisi incelenmiştir.



Şekil 3.10 : Yüksek sıcaklık uygulama derecelerinin ve sürelerinin grafiksel gösterimi.

Yüksek sıcaklığa maruz kalmış numuneler üzerinde UPV deneyleri de yürütülerek yüksek sıcaklık etkisinin harç yapısında çatlak ve hasarın sayısal olarak ölçümü yapılmıştır. Deneyde her seriden 6 adet olmak üzere küp harç numuneleri kullanılmıştır.

Yüksek sıcaklık kimyasal ve fiziksel yıkıcı etkisi nedeniyle harç numunelerinde ağırlık kayıplarına neden olmaktadır. Bu sebeple çay atıklarının ve kalsitleşmenin harçların bir arada kalma kabiliyetine etkisini incelemek amacıyla yüksek sıcaklık maruziyeti sonrası harçların ağırlık kaybı oranları ölçülmüştür. Hem hasarsız hem ön hasarlı numuneler kullanılarak yükleme hasarı ve KKİ davranışının etkisi incelenmiştir. Deneyde her seriden 6 adet olmak üzere küp harç numuneleri kullanılmıştır.

3.2.14 Taramalı elektron mikroskobu analizi (SEM)

Bakterinin ürettiği kalsit ve çay atığı yapısının ve harç yapısıyla olan uyumlarının incelenmesi amacıyla numunelerden ortalama 1 cm × 1 cm × 1 cm boyutunda örnekler alınmıştır. Bu örnekler Bursa Teknik Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarı bünyesindeki taramalı elektron mikroskobu altında incelenmiştir. Ayrıca 200×

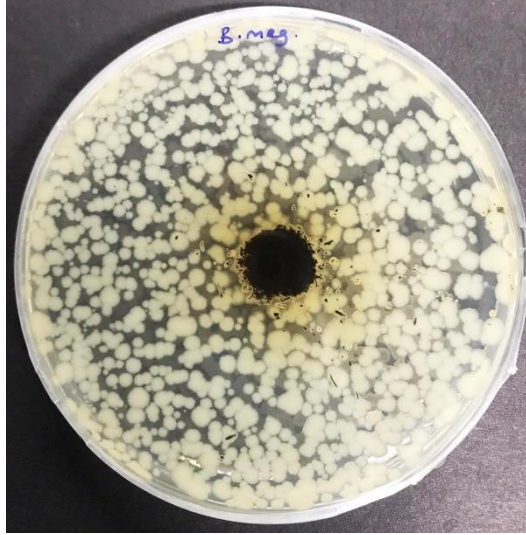
büyütme kapasiteli optik mikroskop kullanılarak numune seçimleri ve görüntüleme yapılmıştır.



4. BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1 Çay Atıklarının Anti-mikrobiyal Etkisi

Çay üretim atıkları çay yapraklarından türetilen bir atık çeşididir. Çayın sahip olduğu anti mikrobiyal etkilerin çay atıklarına karşı etkisi sağlıklı bir bakteriyel iyileşme için araştırılması önemlidir. Bu nedenle çay atıklarının *B.megaterium* türüne karşı bir antimikrobiyal etki gösterip göstermediği araştırılmıştır. Yapılan analiz sonucu bakterilerin üremesi görsel olarak incelendiğinde, çay atığı liflerinin *B.megaterium*'a karşı antimikrobiyal aktiviteye sahip olmadığı belirlenmiştir. Şekil 4.1’de petri kabının ortasında siyah çay atığı parçaları görülmektedir. Çay atıklarının hemen etrafı dahil tüm petri kabında bakterilerin kümeleşerek büyümeleri gözlemlenmiştir. Bu sonuç, *B.megaterium*'un büyüme modelini engellemeyerek, çay atığı liflerinin uyumluluğunu doğrulamıştır [88]. Böylece çay atıklarının bakterilere uygun bir koruyucu kapsül işlevi olarak kullanımının önünde biyolojik bir engel olmadığı saptanmıştır.

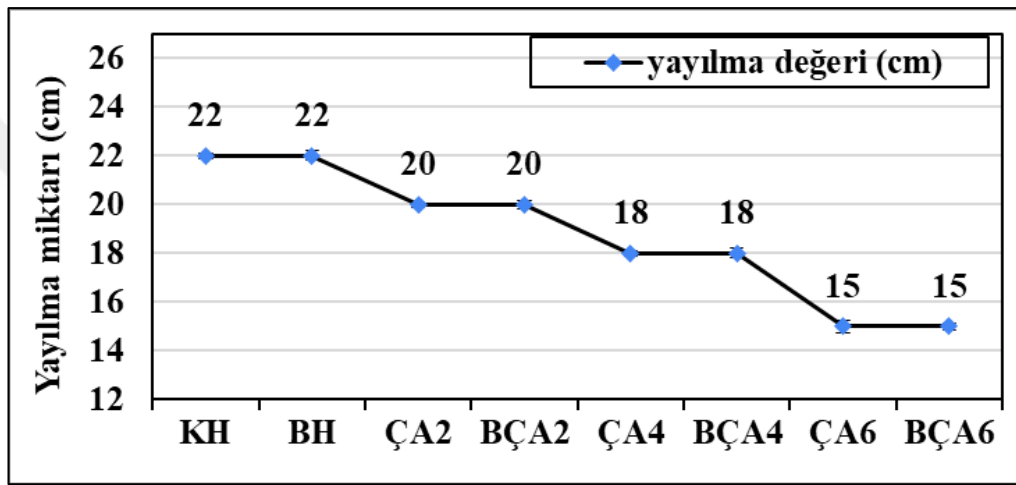


Şekil 4.1 : Çay atıklarının *B.megaterium*'a karşı disk difüzyon yöntemiyle antimikrobiyal aktivitesi.

4.2 Yayılma Değerleri

Çimentolu kompozitlerde yayılma değerleri malzemenin işlenebilirliği açısından oldukça önemlidir. Dolayısıyla malzemenin kullanabilirliğini de doğrudan

etkilemektedir. Bu amaçla atık bir malzeme olan çay üretim atıklarının ve biyolojik bir katkı olarak kullanılan bakteri sporlarının yayılma değerlerine etkisi incelenmiştir. Tüm harç serilerinde kontrol numunesiyle aynı miktarda süper akışkanlaştırıcı katkı kullanıldığında elde edilen yayılma değerleri Şekil 4.2’de verilmiştir. Çay atıklarının sahip olduğu lifsi yapısı ve su emme özelliği nedeniyle yayılma değerlerini düşürdüğü görülmüştür. Ancak bu davranış zaten halihazırda yaygınca kullanılan jüt, sisal ve diğer doğal liflerde görülen yaygın ve bilinen bir davranıştır [89]. Ancak bu değerler harç karışım tablosundaki miktarda süper akışkanlaştırıcı kullanılarak 22 cm düzeyine kolayca çekilmiştir.



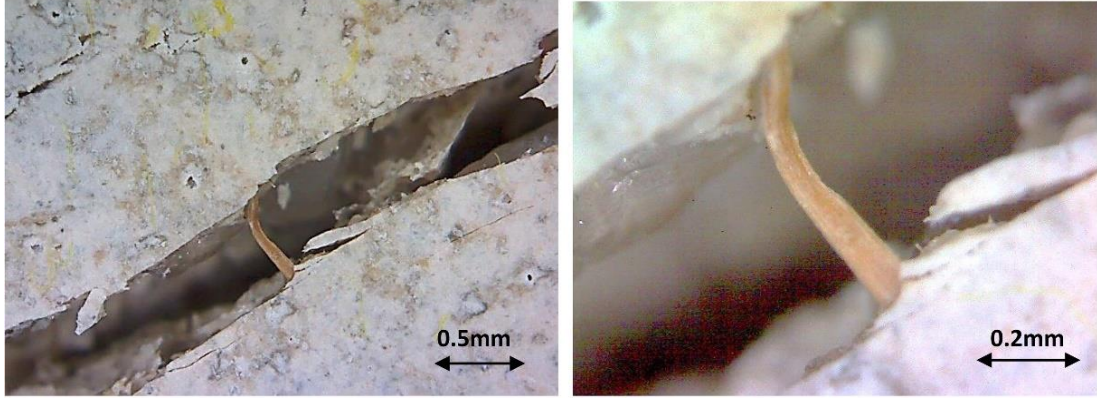
Şekil 4.2 : Harç serilerinin yayılma değerleri.

Bakterilerin çay atıksız direkt olarak eklenen BH ve diğer tüm bakterili çay atık serilerinde görüldüğü üzere, bakteri sporlarının eklenmesi yayılma değerlerinde herhangi bir değişim yaratmamıştır. Bakterilerin mikron düzeyinde organizmalar olması sebebiyle fiziksel bir etki göstermemesi ve taze haldeyken herhangi bir kimyasal tepkimeye girmemesi nedeniyle harcın kıvamı üzerinde bir etkisi bulunmamıştır. Bu da bakterili çimentolu kompozitler için bir avantajdır. Kıvama herhangi bir etkisi olmaması ekstra hesaplara ve malzeme kullanımını gerektirmeden kompozit üretiminde kullanılabilecekleri anlamına gelmektedir.

4.3 Çatlak İyileşme Değerleri

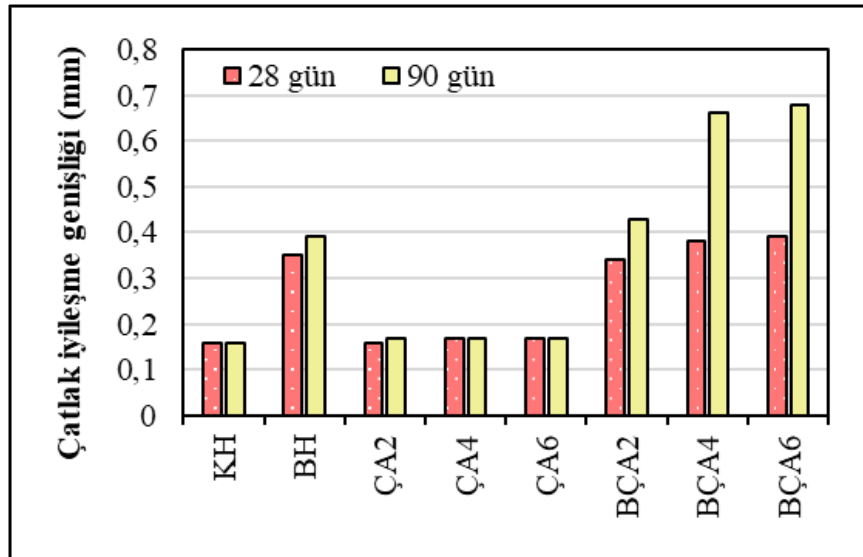
Numunelerde basınç yüklemesi nedeniyle çeşitli boyutlarda çatlaklar oluşmuştur. Tüm seriler incelendiğinde çay atığı içeren harçlarda oluşan çatlak genişliklerinin kısıtlandığı görülmüştür. Bu da fiberin temel katkılarından biri olan anti-çatlak etkisi

ile ilişkilendirilmiştir. Çay atıkları harç yüzeyinde oluşan çatlaklar arasında köprüleme davranışı sergilemiştir. Çay atıklarının sergilediği köprüleme davranışı Şekil 4.3’de görülmektedir.



Şekil 4.3 : Çay atıklarının köprüleme davranışı.

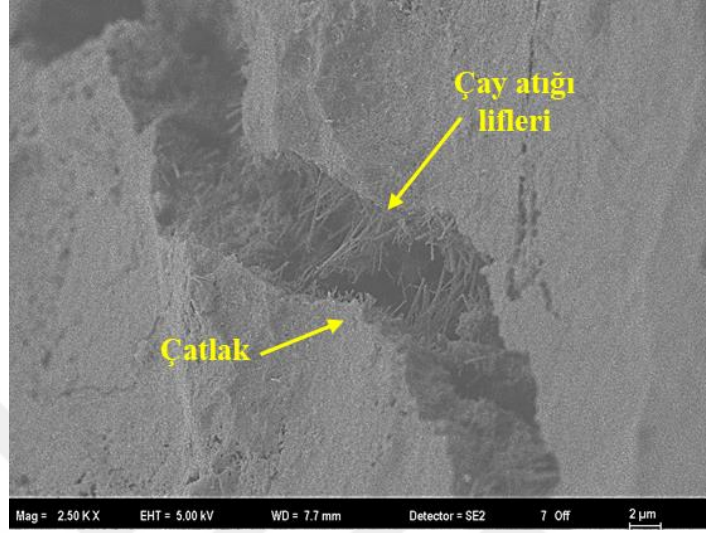
Çimentolu kompozitler, hidrate olmamış çimento parçacıklarının hidrate olarak şişmesi sebebiyle otojen iyileşme gösterebilmektedir. Ancak bu iyileşmeler genellikle 0,2 mm çatlak genişliğinin altında sınırlı kalır. Oysaki bu çatlak değerinin üstündeki çatlakların tedavi edilmesi kompozitin dayanıklılığı için çok önemlidir [90,91]. Bu çalışmadaki çatlak iyileşme miktarları Şekil 4.4’de verilmiştir. Tüm bakterisiz seriler incelendiğinde en geniş iyileşen çatlak genişliğini 0,16 mm olduğu saptanmıştır. Bu değerin üzerinde çatlakların 90 gün sonunda dahi iyileşemediği saptanmıştır.



Şekil 4.4 : İyileşen en geniş çatlak genişlikleri.

Öte yandan, çay atıklarının da maksimum çatlak iyileşme genişliklerinde kısıtlı etkisi olduğu görülmüştür. Ancak çay atıkları, çatlakları kısıtlayarak daha geniş çatlakların meydana gelmesini önlemiştir. Üstelik bunu sadece numune yüzeyinde değil harçların

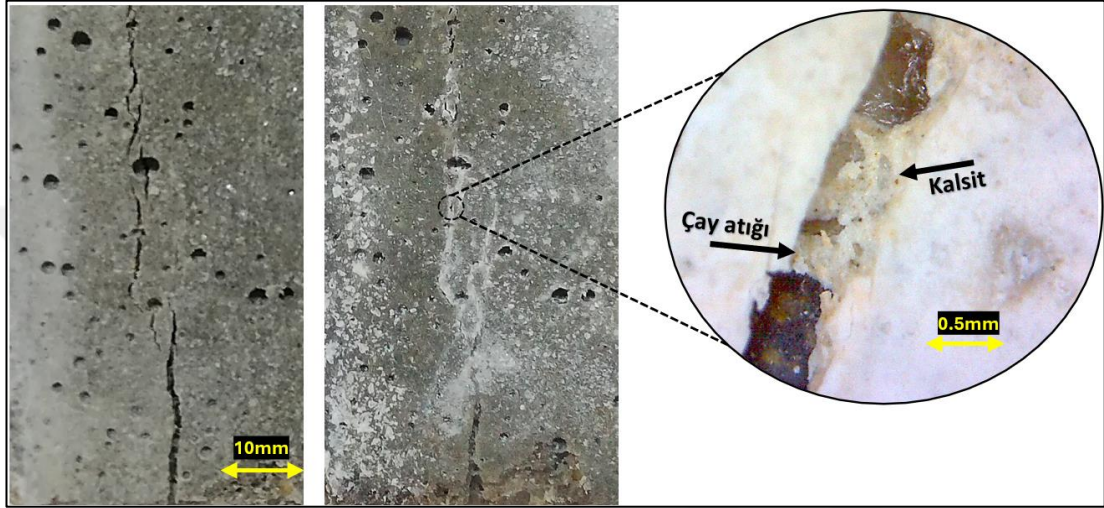
iç yapısında da yaptığı SEM analizi görüntüsünde tespit edilmiştir. Çay atıklarının içyapıdaki çatlak kısıtlayıcı davranışı Şekil 4.5'te verilmiştir. Bu davranışı mikro çatlaklarda yapması da sadece çatlak iyileşme değil harcın tüm fiziksel özelliklerini korumasına yardımcı olduğu çıkarımı yapılmıştır.



Şekil 4.5 : Çay atıklarının mikro çatlaklardaki SEM görünümü.

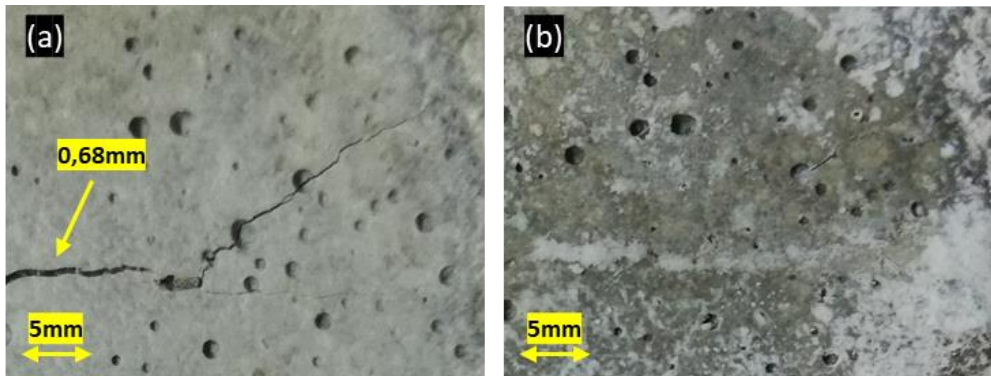
Böylece çay atıkları kontrol numunelerinden daha geniş çatlakların otojen olarak kapanmasına fayda sağlayamasa da oluşan çatlak genişliklerini kısıtlaması, bakteriyel kendi kendine iyileşme tedavisi için daha elverişli bir durum yaratmıştır. MICP tedavisinin daha kısıtlı çatlaklarda etkin olduğu Özhan vd. [19] çalışmasında raporlanmıştır. Bakterili (çay atıksız) numunelerde (BH) kapanan maksimum çatlak genişliği 0,35 mm olarak belirlenmiştir. Ancak bu miktar çay atığı kullanımıyla beraber yükselmiştir. Böylece Amjad vd. [69] çalışmasına paralel olarak bakteriler fiber-koruyucu yöntemi sayesinde çatlak iyileşme etkinliğinin henüz 28 gün sonunda dahi arttığı belirlenmiştir. Ancak asıl etkisi 90 günün sonunda saptanmıştır. 90 günlük BH serisindeki bakteri sporlarının herhangi bir koruması olmaması sebebiyle harcın içindeki zorlu koşullardan dolayı etkinliği oldukça azalmıştır. Ancak bakterili çay atıklı BÇA serilerinde iyileşen çatlak genişlikler 0,68 mm'ye ulaşmıştır. Böylece bakteriyi koruyarak 28 günden sonra bile efektif bir iyileşme tedavisi sağlanabileceği Kanwal vd. [92] çalışmasına benzer şekilde ispatlanmıştır. Bu çalışma diğer fiber-koruyucu makalelerinden farklı olarak, kullanılan koruyucu materyalinin kullanım oranına bağlı olarak kapanan çatlak miktarının değişebildiğini göstermiştir. Kullanılan çay atığı miktarı arttıkça 90 günlük çatlak iyileşme değeri miktarı artmıştır.

Çay atıkları hem çatlak kısıtlaması gören fiberler olarak hem de bakteriyi koruyan çeperler olarak işlev göstermiştir. Böylece hem MICP sistemine daha kısıtlı çatlaklar sağlamıştır hemde bakterinin daha uzun süren bir tedavi göstermesini sağlamıştır. Bu ikili katkıyı Guo vd. [68] çalışmasında sisal fiberle sağlamıştır. Bu çalışma ise sadece doğal fiberlerle değil, atık bir malzemeye de bu etkinin sağlandığını göstermiştir. Şekil 4.6'da iyileşen çatlağın görüntüsü ve çay atığı üzerinde oluşan kalsitleşmeler gösterilmiştir.



Şekil 4.6 : 28 gün sonunda çatlakların iyileşmesi ve çay atığı üzerinde oluşan kalsit görünümleri.

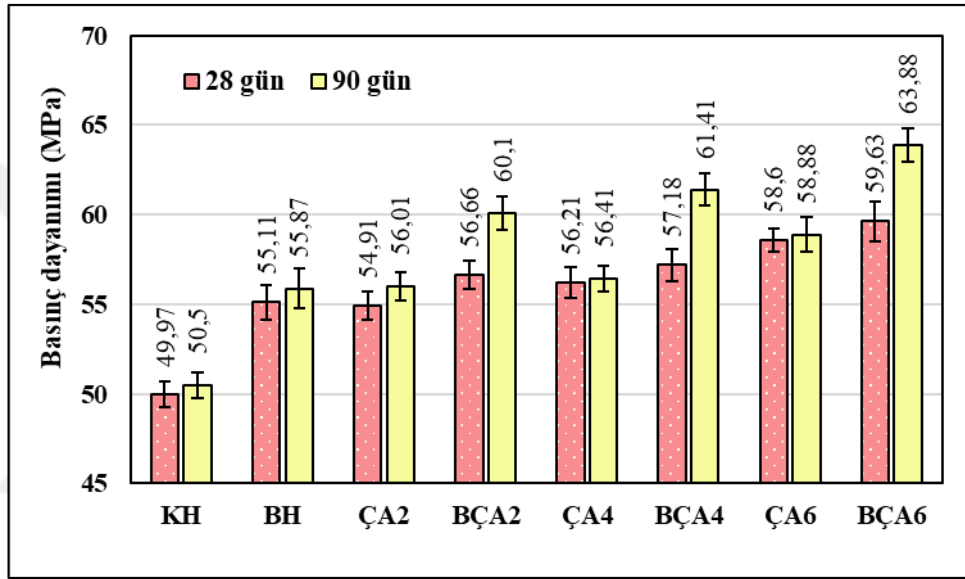
Çay atıkları sağladığı köprüleme etkisinin yanı sıra bünyesine emdiği ve yüzeyinde bulundurduğu bakteri sporlarının kalsit üretmeye devam etmesini sağlayarak 90 gün sonunda en geniş çatlak iyileşme değerlerine ulaşmasını sağlamıştır. Şekil 4.7'de bakterilerin 0,68 mm genişliğindeki çatlağı kapatma görüntüsü verilmiştir. İncelendiğinde kalsitlerin yüzeyde ciddi beyazlaşmalar ve kapanmalar oluşturduğu görülmektedir.



Şekil 4.7 : BÇA yüzeyindeki çatlağın ilk (a) ve 90 gün sonraki görünümü (b).

4.4 Basınç Dayanımı Değerleri

İlk olarak hasarsız (ön hasar verilmemiş) numunelerin basınç dayanımları belirlenmiştir ve sonuçlar Şekil 4.8’de verilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde çay atıklarının basınç dayanımına olumlu etkisi olduğu görülmüştür. Sergiledikleri fiber davranışı sayesinde harçların daha yüksek miktarda enerji emmesini ve dolayısıyla daha yüksek dayanıma sahip olmasını sağlamıştır. Böylece Cao vd. [50] çalışmasına paralel olarak çay atıklarının doğal fiber olarak kullanılmasıyla çimentolu kompozitlerin dayanım değerlerini arttırabileceği saptanmıştır.



Şekil 4.8 : Harç serilerinin 28 ve 90 günlük basınç dayanımı değerleri.

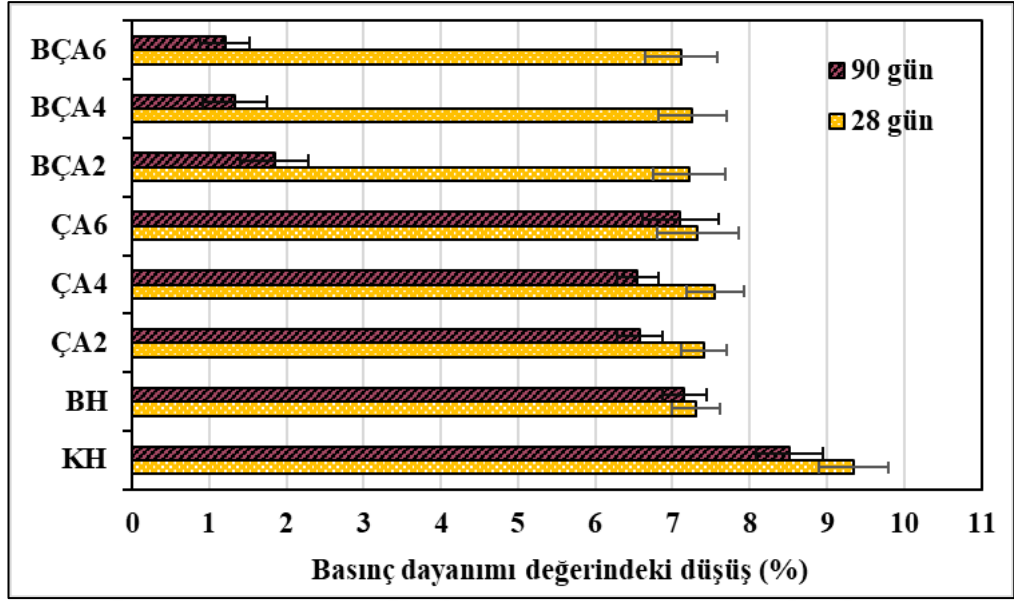
Üstelik bu çalışma kullanım oranı arttıkça çay atıklarının verdiği basınç dayanımı katkısının arttığını göstermiştir. 28 gün sonunda KH (kontrol) harç serisinin dayanımına göre, ÇA2, ÇA4 ve ÇA6 serileri sırasıyla %9,89, %12,49 ve %17,27 oranında daha yüksek basınç dayanımına sahiptir. Bu da harç çay atığının harç yapısıyla uyumlu olan yapısı ve boyutlarıyla ilişkilendirilmiştir.

BH serisinde ise ilk 28 gün sonunda kontrol serisine göre %10,29 oranında daha yüksek basınç dayanımı sergilemiştir. Bu değer *bacillus megaterium* kullanan Parashar vd. [93] ve Krishnapriya vd. [94] çalışmalarına benzerdir. Ancak 90 gün sonunda KH ile BH serileri arasındaki bu farkın yine benzer oranda olduğu görülmüştür. Bu da bakteri sporlarının herhangi bir koruma olmadan uzun dönemde efektif olmadığını ve verdiği katkının bakterinin canlı kalabildiği ilk 28 gün içerisinde gerçekleştiğini göstermiştir.

90 günün ardından kontrol ve tüm çay atığı ilaveli serilerin (ÇA2, ÇA4 ve ÇA6) basınç dayanımlarında 28 günlük dayanım değerlerine göre önemli artışlar meydana gelmediği gözlemlenmiştir. Bu da çimentonun hidratasyonun büyük ölçüsünün ilk 28 günde tamamlanmasıyla ilgilidir. Ancak çay atığının bakteriyal koruyucu olarak kullanıldığı BÇA serilerinde basınç dayanımı değerleri giderek artmıştır. Öyle ki, 90 gün sonunda BH serisinin değerlerine göre BÇA2, BÇA4 ve BÇA6 serilerinin dayanımları sırasıyla %19,01, %21,60 ve %26,50 oranında daha yüksektir. Bu çalışmayla uyumlu olarak, Bhaskar vd. [36] çalışmasında 28 günden sonra kontrol numunelerinde basınç dayanımı gelişimi oldukça yavaşlarsa da korunmuş (sabitlenmiş) bakterili numunelerin ürettiği kalsit sayesinde basınç dayanımı değerlerinin giderek arttığını raporlamıştır.

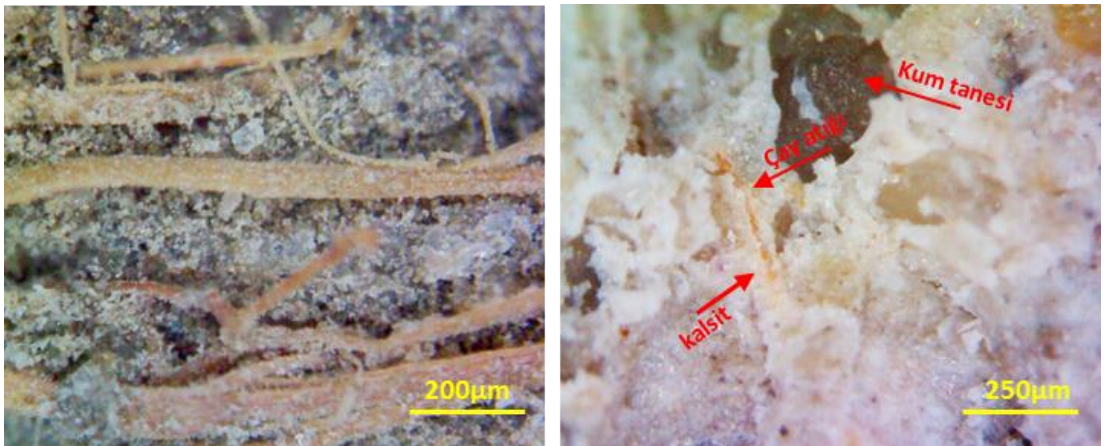
Böylece çay atıklarının bakteri sporlarına sağladığı ekstra nem ortamı ve fiziksel koruyuculuk herhangi bir hasar olmadan da pozitif etkisini göstermiştir. Dış etkilere korunmuş üreolitik bakterilere sağlanacak suyun bakteriyel tedaviyi arttırdığı Luo vd. [95]'nin çalışmasında da saptanmıştır. Üstelik çay atığının fiber yapısı sayesinde su tutma kapasitesine karşın dayanımlarda ekstra bir düşüşe neden olmadığı aksine artışa sebebiyet verdiği saptanmıştır. Kalsit sayesinde daha yoğun hale gelen yapının basınç dayanımı değerleri artmaktadır [96]. Gupta vd. [97] çalışmasında bakteri sporlarını ahşap atıklarında sabitlemiştir ve basınç dayanımlarına katkı da bulunduğu da raporlamıştır. Bu çalışma da farklı bir biyo-atık olan çay atıklarının MICP sistemi içerisine dahil edilerek basınç dayanımlarını arttırdığını kanıtlamıştır. Üstelik çay atığının bir atık madde olmasına karşın sadece bakteri koruyucu özelliğinden faydalanılmadığını, bakteri koruyucu işlevi olmaksızın da harç yapısının dayanımını azaltmadığı kanıtlanmıştır. Bu da pratikteki kullanım açısından önemli bir kriterdir. Örneğin başka bir atık maddenin bakteri koruyucu olarak kullanıldığı Xu vd. [98] çalışmasında kullanılan madde kompozitin yapısına zarar vermiştir. Çalışmada kauçuk bakteri koruyucu olarak kullanıldığında faydalı olsa da ham haliyle (bakterisiz) kullanıldığında, kompozitin basınç dayanımı değerlerini düşürmüştür.

Hasarsız hallerdeki çay atıklarının ve bakteri emdirme yönteminin oldukça olumlu sonuçlar verdiği saptanmıştır. Hasarsız numune ölçümlerinden sonra ön hasar verilmiş numunelerin 28 ve 90 günlük basınç dayanımı değerleri ölçülmüştür. Bu ön hasarlı numunelerin hasarsız hallerine göre basınç dayanımı değerlerindeki kayıp yüzdeleri Şekil 4.9'da verilmiştir.



Şekil 4.9 : 28 ve 90 günlük ön hasarlı harçlarda hasarsız hallerine göre basınç dayanımı düşüş yüzdeleri.

Çay atıklarının harç içerisindeki düzgün dağılımı ve doğal fiber etkisi sayesinde hasardan sonra dahi daha iyi bir dayanım göstermiştir. Böylece bu çalışma diğer doğal fiberlerde olduğu gibi çay atıklarının da, hasarlı bir yapıda daha yüksek artık dayanımlar sağladığını göstermiştir [99,100]. Çay atıkları bakterileri dış etkilerden koruması ve bakterilere sağladığı olumlu şartlar sayesinde kalsit oluşumunu ön hasarlı numunelerde de tetiklemiştir. En yüksek oranda çay atığı içeren ÇA6 ve BÇA6 serilerinden alınan görüntüler Şekil 4.10'da verilmiştir. Bakterili çay atıklarının yapıda yarattığı değişim açıkça görülmektedir.



Şekil 4.10 : ÇA6 (sol) ve BÇA6 (sağ) harç numunelerinden alınmış parça görüntüleri.

Çay atığı ve bakteri içermeyen harçların ön hasarlı numunelerinin 28 gün sonunda hasarsız hallerine göre basınç dayanımı değerleri %9,34 oranında daha düşükken, 90 gün sonunda hasar miktarı %8,51'e düşmüştür. Bu da su kürünün hasar tedavisi

üzerinde minimal bir etkisi olduğunu göstermiştir. Bakterili numuneler (BH) incelendiğinde, çay atığı içerisinde emdirilen bakteri sporlarının ürettiği kalsitler, hasar nedeniyle oluşan çatlaklar ve porlarda oluşarak harcın dayanımını geri kazanmasını sağladığı görülmektedir. BH numunelerinin değerleri bu sebeple daha düşüktür. Ancak bu çay atığı içermeyen bakterili numunelerde 28 günlük kürün ardından KH'ye göre daha düşük oranda dayanım kaybı görülse de bu tedavi etkinliğini 90 günlük kürün ardından arttıramamıştır. Öyle ki 28 gün sonunda %7,30 olan değer, 90 gün sonunda sadece %7,15'e gerilemiştir. Bu da bakterilerin 28 günden sonra olan etkisizliğine işaret etmektedir. Bakteriler dış ortamdan uzun periyotta etkilenecek etkinliğini kaybederek tedaviyi sürdürememiştir.

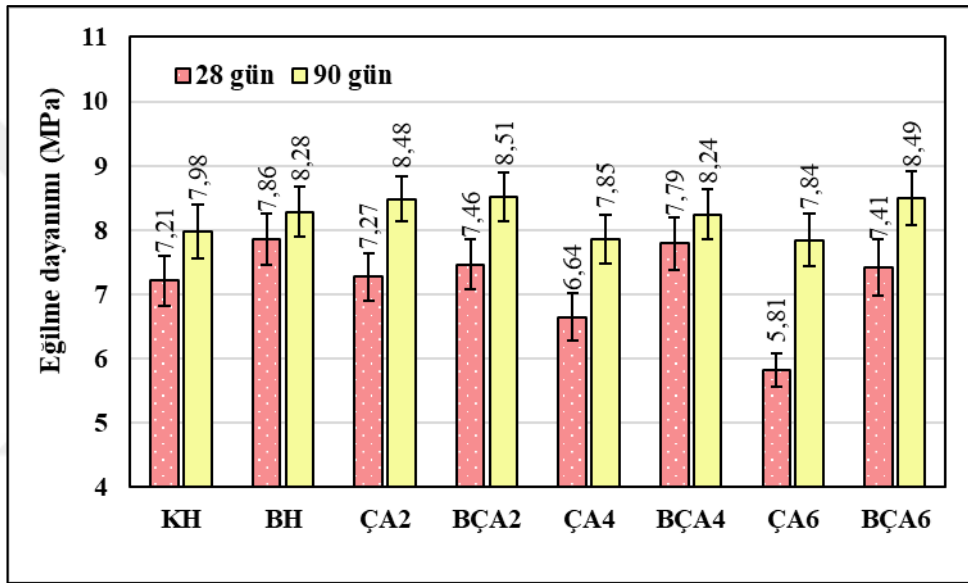
Bakterisiz çay atığı içeren ÇA2, ÇA4 ve ÇA6 serilerinde ise KH kontrol serisine göre çok daha düşük kayıplar yaşandığı görülmektedir. Bu olumlu etkinin kısıtlanan çatlaklar sayesinde daha kolay iyileşme süreci yaşanmasına atfedilmiştir. Öte yandan BÇA serileri incelendiğinde, 28 gün sonunda BH ile benzer dayanım kaybı miktarları gösterebilir de 90 günün ardından çok daha az dayanım kaybı sergilemişlerdir. En düşük oranda bakterili çay atığı içeren serileri olan BÇA2'nin 28 günün sonunda %7,22 oranında daha düşük bir dayanımı varken, bu değer 90 gün sonunda %1,84'e düşmüştür. Üstelik bu üstün değerler kullanılan bakterili çay atığı oranı arttıkça azalmıştır. 90 gün sonunda BÇA6 serisi dayanım farkı sadece %1,20 kadar tespit edilmiştir. Bu da verilen hasarın neredeyse tamamının dayanım açısından tedavi edildiğini kanıtlamaktadır. Böylece kompozitlerin tamamen iyileşmesi için bakteri koruyucu yönteminin etkinliği önceki çalışmalarla uyumlu olarak saptanmıştır [42,97]. Ek olarak, bu çalışma bu etkinin çay atıklarıyla mümkün olduğunu kanıtlamıştır.

4.5 Eğilme Dayanımı Değerleri

Basınç dayanımında sağlanan üstün değerlerden sonra çay atıklarının hem doğal fiber hem de bakteri koruyucu olarak etkisi, eğilme dayanımı değerlerinde de araştırılmıştır. 28 gün ve 90 gün sonunda ölçülen eğilme dayanımı değerleri Şekil 4.11'de verilmiştir. Bakterilerin ürettiği kalsitler henüz 28 gün sonunda etkisini göstermeye başlamıştır. Kontrol serisi 7,21 MPa değerine ulaşırken, BH serisi 7,86 MPa değerine ulaşmıştır. Bu da kalsit oluşumlarının eğilme dayanımlarına pozitif yansıdığını göstermiştir.

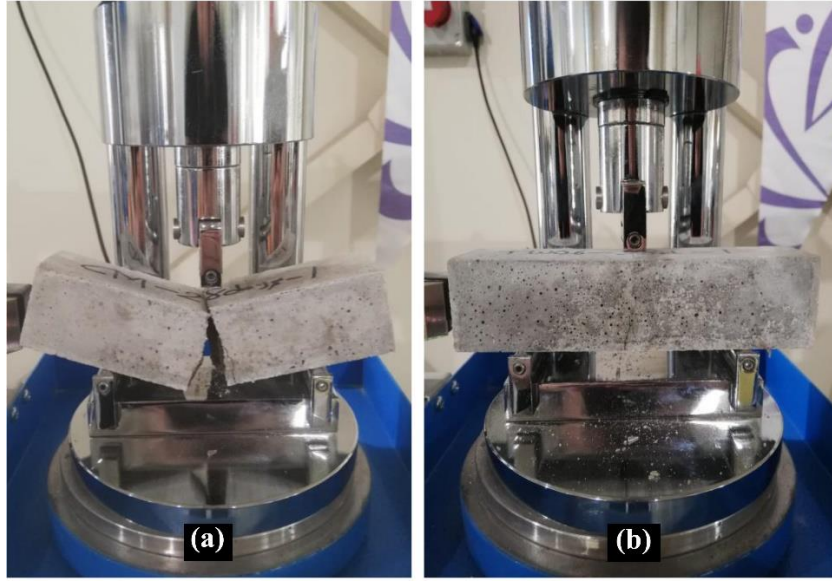
Kalsitlerin betondaki gözenekleri doldurarak daha dayanımlı bir harç meydana gelmesini sağlamıştır.

Çay atıklarının 28 gün sonunda değerleri incelendiğinde eğilme dayanımlarında belirli orana kadar etkili olduğunu göstermiştir. KH serisine göre ÇA2 serisinde artış görülürken, ÇA4 ve ÇA6 serilerinde düşüş görülmüştür. Basınç dayanımlarında çay atığı kullanımı arttıkça artan dayanımların aksine, eğilme dayanımında daha düşük oranda çay atığı kullanımının optimum değerler sağladığı görülmüştür. Bu durum fiber takviyeli harç ve betonlarda sıkça görülmektedir. Bu optimum oran fiberin uzunluğuna, türüne ve diğer çeşitli özelliklerine bağlıdır [101,102].



Şekil 4.11 : Eğilme dayanımı deney sonuçları.

Öte yandan harç kür süresi 90 güne yükselince çay atıkların daha etkin bir katkı verdiği görülmüştür. Yoğunlaşan harç yapısı sayesinde çay atıkları yapıya daha üstün bir yapışma sağlamıştır ve böylece dayanımlar yükselmiştir. Harcın yapısındaki değişim ve çay atıklarının 28 ile 90 günlük değerleri arasındaki gelişim çay atıklarının iç kürlenme etkisine atfedilmiştir. ÇA2 serisi kontrol harçlarına göre %6,26 oranında daha yüksek eğilme dayanımı göstermiştir. ÇA4 ve ÇA6 serisindeki dayanım düşüş miktarı ise azalmıştır. Böylelikle çay atıklarının doğal fiber işlevi görerek numuneleri çekme kuvveti altında daha yüksek bir arada tutabilme kapasitesini göstermiştir. Eğilme dayanımı deneyi sonucunda kontrol ve çay atıklı numunelerin son hali bunu kanıtlar niteliktedir. Eğilme dayanımı sonrası numunelerin görünümü Şekil 4.12’de verilmiştir.

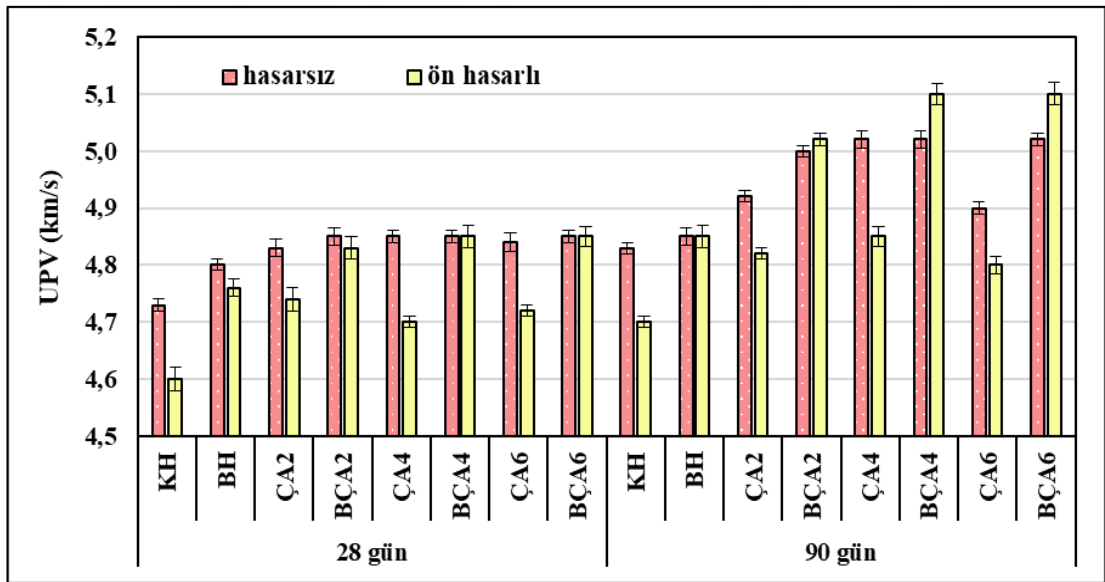


Şekil 4.12 : Eğilme dayanımı deneyi sonrası kontrol (a) ve çay atık takviyeli harçların (b) görünümü.

Bakterili çay atığı içeren BÇA harç numunelerinin eğilme dayanımları incelendiğinde, 28 günün sonunda dahi tüm ilgili ÇA serilerinden daha yüksek dayanımlar sergilendiği görülmüştür. Bu da çay atıkları ile bakteri uyumunu göstermiştir. Kontrol serinin eğilme dayanımı değerlerine BÇA2 serisi %3,47, BÇA4 serisi %8,04 ve BÇA6 serisi %2,77 oranında daha yüksek dayanım sergilemiştir. Çay atığı oranı arttıkça, eğilme dayanımlarında görülen düşüş bakteri faktörünün devreye girmesiyle tersine dönmüştür. Bu da bakterilerin çay atığının koruyuculuğuna olan ihtiyacını da göstermektedir. Çay atıklarının sergilediği daha nemli iç ortam ve çimentonun yarattığı zorlu ortamdan korunması sayesinde bakterilerin kalsit üretme kapasitesi artmıştır. Aynı zamanda kalsit üretme süresi de uzamıştır. Bu da tedavinin pratikte uygulanabilir olması açısından kritiktir. 90 gün sonunda BÇA serilerinde en yüksek eğilme dayanımı değerleri saptanmıştır. 90 gün sonrasında özellikle en düşük değere sahip olan ÇA6 serisinin bakteri takviyeli hali olan BÇA6 serisinde çarpıcı bir artış görülmüştür. ÇA6 serisi 90 gün sonunda KH serisine yakın bir değer olsa da daha düşük eğilme dayanımı sergilerken, BÇA6 serisi %6,39 daha yüksek bir eğilme dayanımına ulaşmıştır. Bu da çay atıklarının bakteri birlikteliğinin sinerjistik bir etki yaratarak kompozit dayanımını geliştirdiğini göstermiştir.

4.6 Ultrasonik Ses Geçiş Hızı (UPV) Değerleri

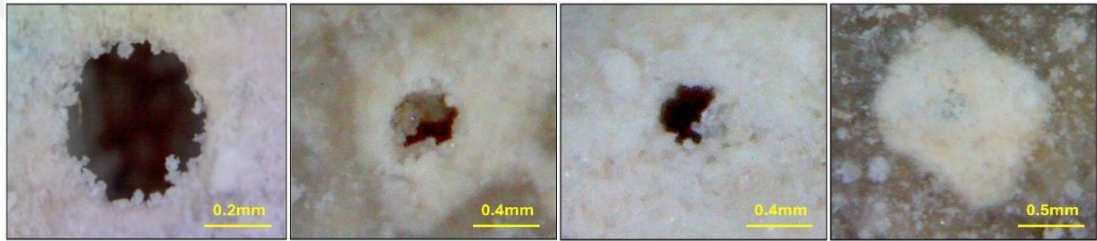
UPV testi değerleri betonun içindeki boşluk ve çatlaklar ile ilişkilidir. Bu sebeple bakteriyel tedavinin içyapıdaki etkisini incelemek için yürütülmüştür. UPV deneyi sonuçları Şekil 4.13’de verilmiştir. İlk olarak hasarsız numuneler incelendiğinde bakteri kalsitlerinin numuneleri daha yoğun hale getirerek harçların UPV değerlerini arttırdığı saptanmıştır ve bu etki ilk 28 günün sonunda dahi göstermiştir. Bu durum *Bacillus megaterium* türünün etkisini ve kalsit üretme kapasitesini kanıtlamıştır. 28 gün sonunda hasarsız ÇA serilerinin UPV değerlerinin, KH’ye göre daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Üstelik tüm çay atığı ikame serilerinde bu artış oranları görülmüştür. Çay atığının daha düşük yoğunluğa sahip olduğu ve fiber ilavesinin genellikle çimentolu harçlarda neden olduğu boşluklar göz önüne alındığında bu beklenmedik bir sonuçtur. Ancak çay atıkları bu etki harç yapısı içinde gösterdiği iç kürlenme etkisi ile ilişkilendirilmiştir [39]. Çay atıkları harç içyapısına sağladığı su iletimi ile hidrasyonu tetiklemiş ve böylece çimento partiküllerinin daha hızlı ve daha yüksek oranda hidrate olmasını sağlayarak çimento harçlarının daha yoğun bir hacim oluşmasını sağlamıştır. Bu yoğun yapı ise direkt olarak UPV değerlerine yansımıştır.



Şekil 4.13 : UPV deneyi sonuçları.

28 gün sonunda hasarsız ve bakterili çay atığı içeren seriler incelendiğinde (BÇA), hiçbir serinin ÇA serisinden daha düşük UPV değeri sergilemediği görülmüştür. Ancak yüksek oranda bir fark tespit edilmemiştir. Ancak 90 günlük seriler incelendiğinde bu farkların oluştuğu görülmüştür. İlk olarak KH ve BH serileri

incelendiğinde (hasarsız) yine BH serilerinin daha yüksek olduğu görülse de aralarındaki 28 gündeki fark miktarı azalmıştır. Bu da zaten bakterinin korumasını gerektiren durumu işaret etmektedir. Bakterilerin herhangi bir koruma olmadan 28 günden daha uzun sürelerde etkinliğinin azaldığı veya yok olduğu görülmüştür. Ancak bakteri sporlarının çay atıklarında sergilediği bu koruyucu etki 90 günlük numunelerde açıkça saptanmıştır. BH numunelerinde UPV değeri 4,82 km/s iken BÇA serileri 5,02 km/s değerine kadar yükselmiştir. Herhangi bir hasar olmasa bile başka bir deyişle görünür çatlak kapatma davranışı gözlemlenmeden böyle bir artışın olması bakterilerin doldurduğu gözeneklerle ilişkilidir. Çay atıklarının uzattığı kalsit üretim süreci harçlar üzerinde kapanan gözeneklerin daha yüksek miktarda kapanmasını sağlamıştır. Bu gözenek kapanma görüntüleri Şekil 4.14’de verilmiştir.



Şekil 4.14 : Harç yüzeyindeki porların bakteriyel kalsitle dolma süreci.

İkincil olarak ön hasarlı harç numunelerin UPV değerleri incelendiğinde, yapılan yüklemenin numunelerde ciddi hasar oluşturduğu ve bu hasarların otojen yolla tedavi edilemediği KH numunelerinin değerlerinde de görülmektedir. Bu da çimentolu kompozitlerde otojen iyileşmenin yetersizliğini ve ekstra bir iyileşme tedavisi gerekliliğini bir kez daha vurgulamıştır. Bu kapsamda bakterili BH numunelerinin 28 günlük değerleri incelendiğinde, KH serisine göre daha yüksek oranda iyileşme tespit edilmiştir. Bakteri ürünü kalsiyum karbonat boşlukları ve yükleme nedeniyle meydana gelen çatlakları tıkayarak ses dalgaları için bir patika oluşturmuştur [22]. Böylece UPV hızları artmıştır. 28 günlük kür sonrasında, çay atıklarının gösterdiği çatlak kısıtlama etkisi sayesinde ÇA2, ÇA4 ve ÇA6 serilerinde de, KH serisine göre daha yüksek UPV değerleri sağlanmıştır.

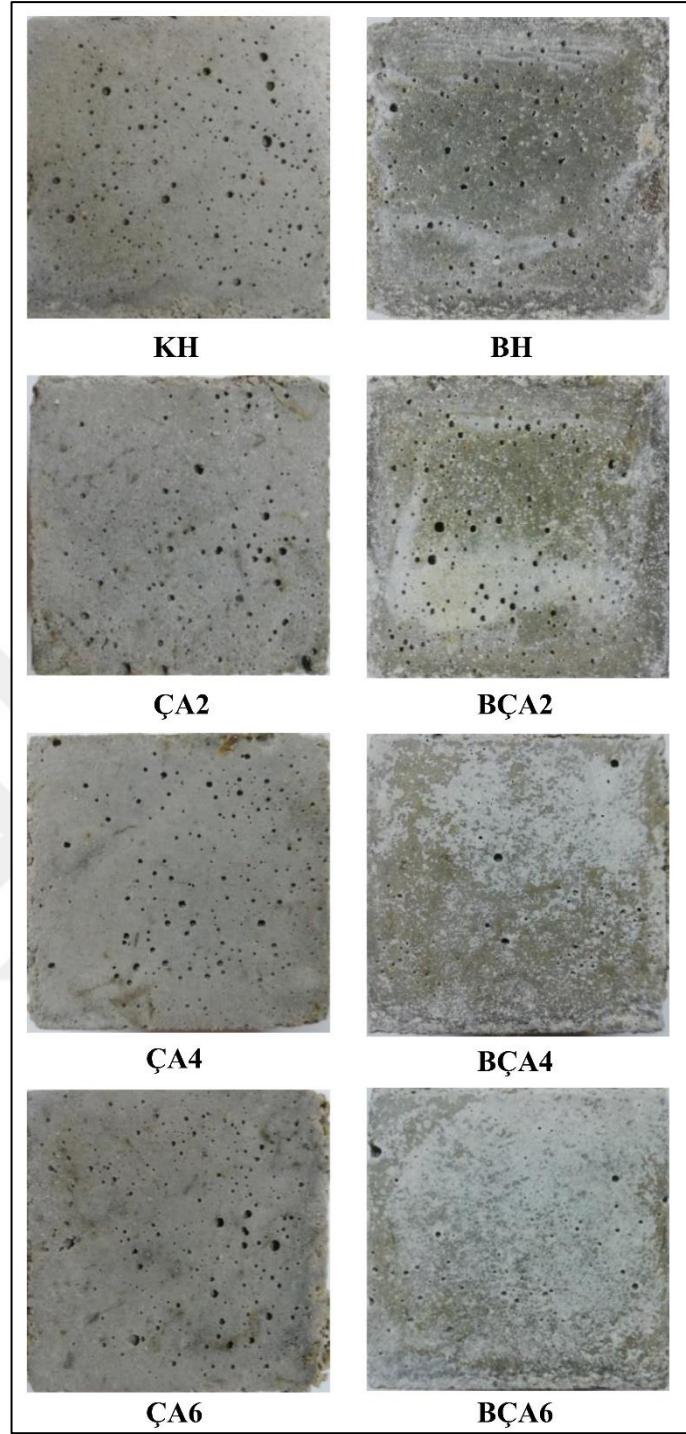
Ancak çay atıklarının asıl etkisi bakterili kullanıldığında açığa çıkmıştır. 28 gün sonunda BÇA4 ve BÇA6 serisinin UPV değerleri, hasarsız numunelerinin değerleriyle aynı olduğu saptanmıştır. Bu da çay atıklarının bakteriyel koruyucu olarak etkinliğini göstermiştir. Artan bakteriyel tedavi etkinliği sayesinde bakteriler daha çok miktarda

çatlağı ve boşluğu kalsitle tıkayarak UPV hızlarını arttırmıştır. Böylece henüz 28 günün sonunda harç numuneleri hiç hasar almamış gibi bir performans sergilemiştir.

90 günlük ön hasarlı numuneler incelendiğinde, tüm serilerde numune yaşı arttıkça UPV değerlerinde yükselmeler saptandığı görülmüştür. Ancak bakteri içermeyen hiçbir ön hasarlı numune serisi, hasarsız hallerinin UPV değerlerine ulaşamamıştır (KH ve ÇA serileri). Öte yandan tüm BÇA serilerinin ön hasarlı numunelerinin UPV değerleri, hasarsız haldeki UPV değerlerinin de üzerine çıkmıştır. Bu durum, bakteriler tarafından üretilen kalsitin saf halinden kaynaklanmıştır. Bu kalsit yapısı harç yapısından daha boşluksuz bir yapıya sahiptir. Bunun yanı sıra boşluklu ve çatlaklı bir yapıda bakterilere sağlanan üretim alanı (yükleme yüzünden oluşan çatlak ve boşluklar) sayesinde bakteriler daha çok kalsit üretmiştir. Böylece yükleme nedeniyle oluşan bu ekstra boşluklar daha yoğun bir yapıya sahip kalsitle ve sıkı bağlarla kapanmıştır. Bunların sonucunda harç yapısından daha yoğun bir hacim oluşturularak UPV hızları en yüksek seviyeye çıkmıştır.

UPV deneylerinde kullanılan farklı tipteki harçların yüzeyleri incelendiğinde de bu kalsitleşmenin etkisi beyaz renk yoğunluğundan anlaşılmaktadır. Bu yüzeyler Şekil 4.15'te görülmektedir. Yüzeylerdeki porları da tıkayan kalsitler yüzeyin beyaza dönmesini sağlamıştır. Sonuç olarak harç yapısına göre daha yoğun bir hacim oluşturulmuştur ve UPV en yüksek değerlerine erişmiştir.

Bu tez çalışmasına benzer olarak, bakterilerin çatlak haldeki kompozitlerde daha etkin olduğu Yildirim vd. [22] çalışmasında da belirtilmiştir. Kullanılan çay miktarı arttıkça bakteriyel tedavinin etkisi giderek artmış ve en yüksek geçiş hızına ulaşılmıştır. Bu da çay atığının koruyucu olarak kullanımının hem tedavi süresi hem etkinliği açısından önemini ortaya koymuştur.

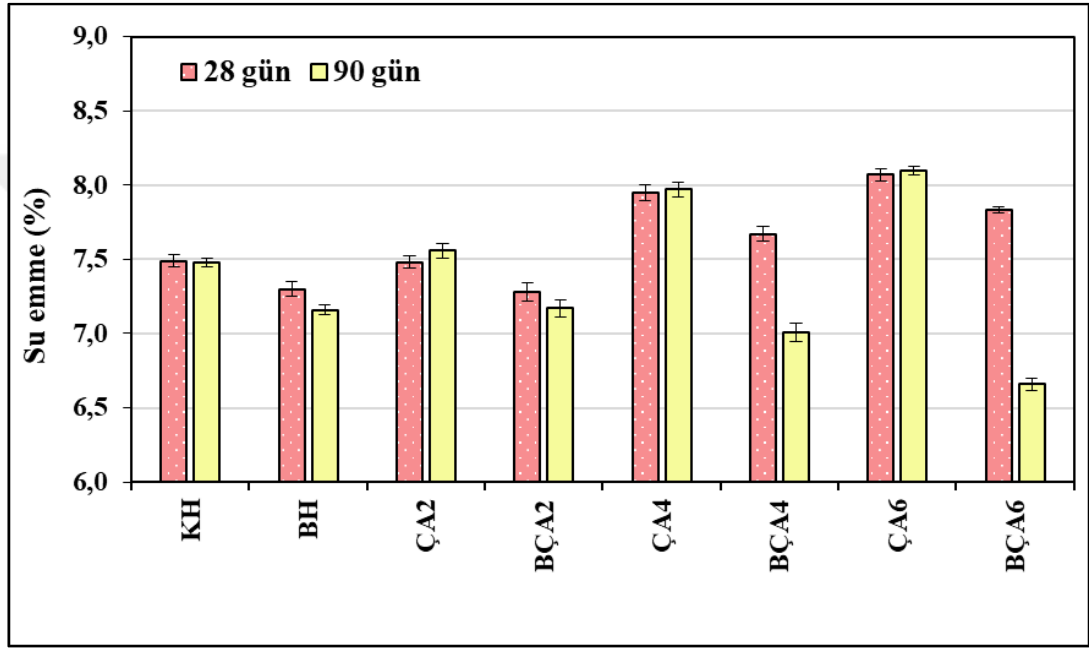


Şekil 4.15 : UPV deneylerinde kullanılan 90 günlük harç numunelerinin yüzeyleri.

4.7 Su Emme Değerleri

Ağırlıkça su emme deneyleri yürütülerek bakteri tarafından oluşturulan kalsitlerin su emme oranlarına olan etkisi incelenmiştir. İlk olarak hasarsız numuneler üzerinde su emme oranları incelenmiştir. Bu su emme değerleri Şekil 4.16'da verilmiştir. 28 günlük hasarsız numuneler incelendiğinde, BH numunelerinde su emme oranının

düştüğü görülmektedir. Bakteriler ürettikleri kalsitlerle boşlukları doldurmuştur ve bu dolu hacim sayesinde numunelerin daha az su emmesini sağlamıştır. MICP sistemi sayesinde harçların daha boşluk oranını düşürmesi sayesinde su emme değerlerinin düştüğü Siddique vd. [103] ve Chaurasia vd. [104] çalışmasında da belirlenmiştir. Kürde bekleme zamanı 90 güne çıktığında KH numunelerinde 28 gün değerlerine yakın bir su emme belirlenirken, BH'da %0,14'lük ihmal edilebilir bir azalma yaşanmıştır. Bu da bakterilerin tedavi süresinin uzatılması gerektiğini vurgulamaktadır.

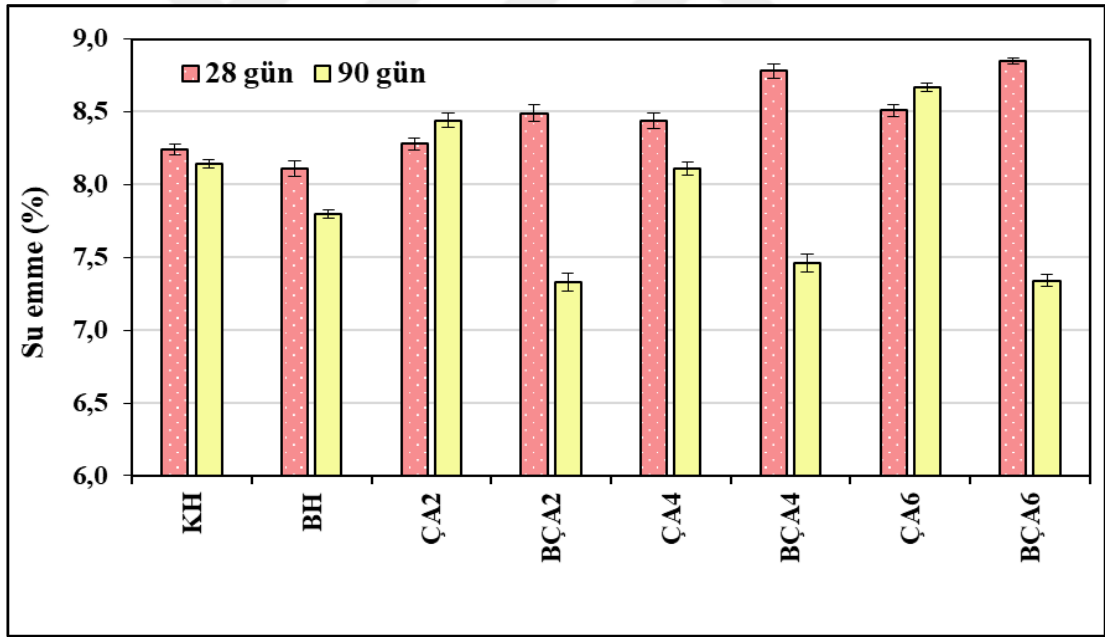


Şekil 4.16 : Hasarsız harç numunelerinin su emme değerleri.

ÇA serileri incelendiğinde, çay atıklarının sahip olduğu yüksek su emme kapasitesi yüzünden çay atığı ikamesinin harçların su emme oranını arttırdığı görülmüştür. Çay atığı ikame oranı arttıkça su emme oranları yükselmiştir. Çoğu zaman olumsuz olan bu artış, bakteriler için elverişli bir ortamın oluşmasını sağlamıştır. Bakteriyel onarım tedavisi için gerekli olan suyu ve oksijeni çay atığından temin eden bakterilerin daha çok kalsit üretmesi tetiklenmiş olmaktadır. Bu sayede bakterili çay atığı içeren BÇA serilerinde hem BH hem ÇA serilerine göre daha az su emme oranları sağlanmıştır. 28 gün sonunda en düşük oran BÇA2 serisinde saptanmıştır. BÇA4 ve BÇA6 serisinde, ÇA4 ve ÇA6 serilerine göre daha düşük su emme oranları sağlansa da, BH serisinin su emme değerlerine göre hala daha yüksek su emme değerleri sergilenmiştir. 28 gün sonunda çay atığının yüksek su emme özelliği bakteriyel oluşumlar tarafından telafi edilemese de bu durum uzun dönemde avantaj haline dönüşmüştür. Öyle ki 90 gün

sonunda BA serilerinde çay atığı ikame oranı arttıkça su emme oranları azalmıştır. En dşk su emme değeri %6,66 olarak BA6 serisinde saptanmıştır. Böylece ay atığının yarattığı dezavantaj, bakteriyel tedavi sistemi için avantaja dönüştüğü kanıtlanmıştır. Bu çalışmadakine benzer bir davranışı Amjad vd. [44] çalışmasında sisal fiberi bakteriyel koruyucu kullanarak gözlemlemiştir.

Basınç yüklemeleri ile verilen hasarlar su emme oranlarında ciddi artışlara sebebiyet vermiştir. Yükleme var olan porları birleştirerek büyümelerine ve yeni çatlakların oluşmasına neden olmuştur [105]. Böylece tüm n hasarlı numunelerde şekil 4.17’de grldğ üzere su emme oranları yükselmiştir. Hasarsız seride olduğu gibi n hasarlı da bakteriler olumlu etkisini göstermiştir. BH serisi KH serisine göre daha dşk su emme değerleri göstermiştir. Bakteri kalsitleri hasar nedeniyle oluşan çatlaklarda oluşma eğilimi doldurarak bu çatlakları kapamış ve numunelerin daha az su emmesini sağlamıştır. 90 günlük numuneler incelendiğinde otojen iyileşme ve herhangi bir koruyucu olmadan bakterilerin zayıf bir tedavi sunduğu grlmştir.

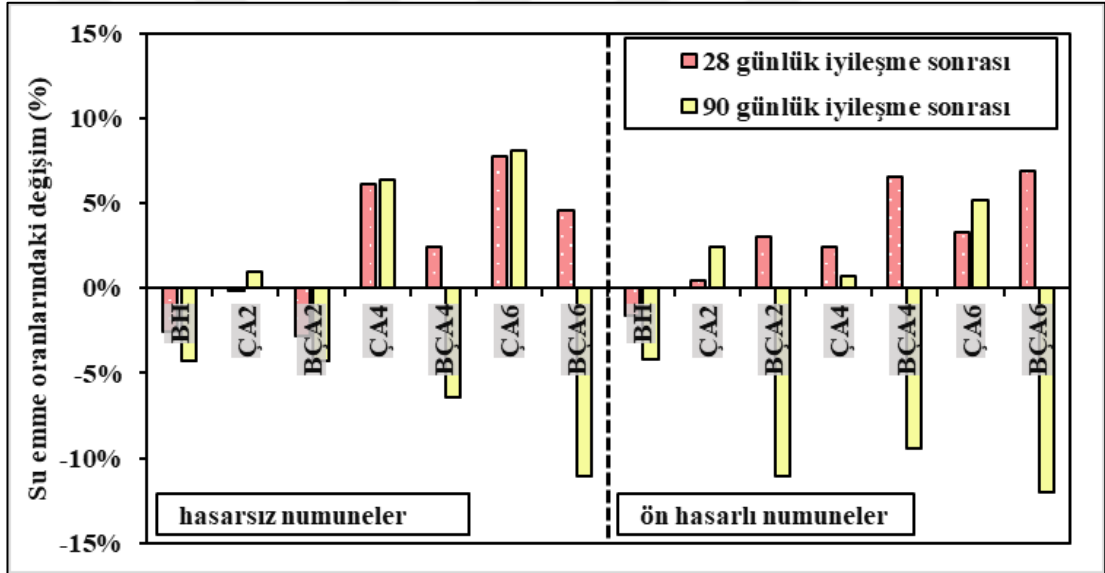


şekil 4.17 : n hasarlı harç numunelerinin su emme değerleri.

n hasarlı numunelerde de çay atıkları yine yüksek su emme özelliği nedeniyle kontrol numunelerine göre daha çok su emilmesine neden olmuştur. Ancak n hasarlı numunelerde çayın bakteri koruyucu etkisi ön plana çıkmıştır ve şekil 4.17’de grldğ üzere BA serileri 90 gün sonunda kontrol numunelerine göre daha dşk su emme oranına sahip olmuştur. Böylece ay atığının su emme üzerindeki olumsuz etkisi tersine dönerek, daha yüksek kalsit üretimi sayesinde bakterili harçların su emme

oranlarını azaltmıştır. Kontrol serisine göre su emme oranlarındaki değişim Şekil 4.18’de gösterilmiştir. Örneğin hasarsız numuneler özelinde 90 gün sonunda ÇA6 serisi kontrol serisine göre %8,14 daha yüksek su emme oranına sahipken, BÇA6 serisi %11,08 daha düşük su emme oranına sahiptir. BH numunelerinde su emme oranındaki azalma ise sadece %4,28 oranı ile sınırlı kalmıştır.

Hasarsız ve ön hasarlı numunelerdeki oranlar kıyaslandığında, çay atığının sadece koruyucu etkisi değil aynı zamanda fiber etkisinin de çatlakları kısıtlayarak ön hasarlı numunelerin yüklemeler karşısında daha az hasar almasını sağladığı görülmektedir. Örneğin kontrol serisine göre, ÇA6 serisi 28 gün sonunda %6,41 oranında daha fazla su emerken, ön hasarlı ÇA6 serisinin değeri sadece %3,28 oranında sınırlı kalmıştır. Böylece çay atığının bakteri koruyucu olarak kullanımının çimentolu kompozitlerin en temel özelliklerinden biri olan su emme oranlarına olumlu etkisi saptanmıştır.



Şekil 4.18 : Kontrol numunelerine göre su emme değerlerindeki oransal değişimler.

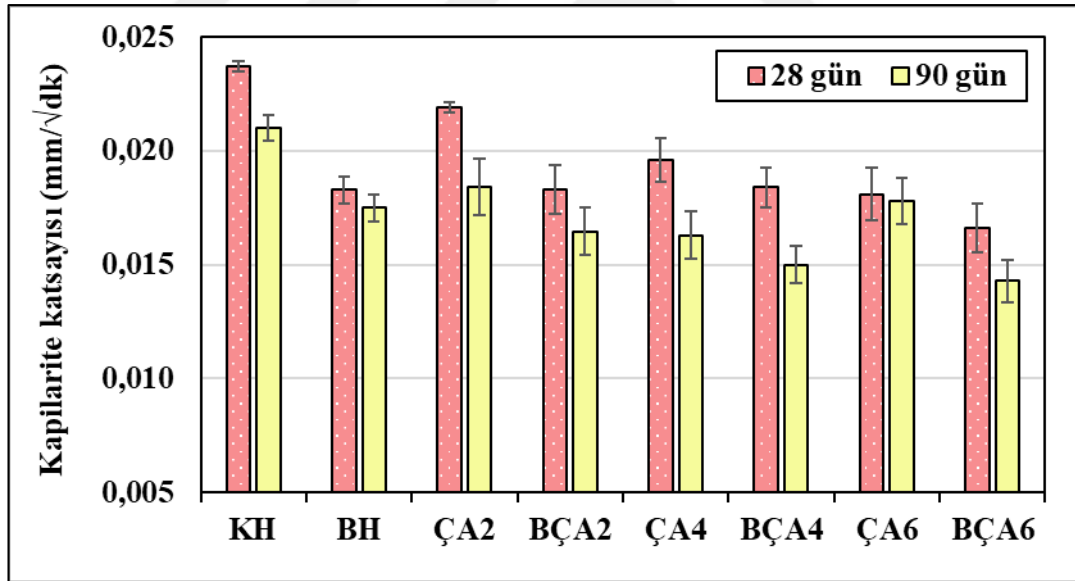
4.8 Kapiller Su Emme Değerleri

Çimentolu kompozitin sıvı iletimi durabilite ile ilişkili olan en önemli parametrelerden biridir. Harcın iç yapısındaki kılcal kanallar sayesinde kompozit dış etkilere daha savunmasız kalabilir [106,107]. Bu sebeple bakteri ürünü kalsitlerin sadece yüzeyde değil, aynı zamanda içyapıda oluşması istenmektedir. Çay atıklarının ve bakterilerin kapilarite katsayıları üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Numunelerin kapilarite deneyinden bir süreç Şekil 4.19’da belirtilmiştir.



Şekil 4.19 : Kapiller su emme deney süreci.

Deney sonucunda belirlenen katsayı değerleri Şekil 4.20’de verilmiştir. Numune yaşı arttıkça katsayının azaldığı belirlenmiştir. İlk etapta hidrate olmayan çimento ve otojen iyileşme sebebiyle kapanan kılcal yollar bu azalmaya sebebiyet vermiştir. Bu da devam eden çimento hidratasyonu nedeniyle kapanan kılcal yollarla ilişkilidir.



Şekil 4.20 : Harç serilerinin kapilarite katsayı değerleri.

BH numunelerinde ise bakterilerin ürettiği kalsitin olumlu etkisi saptanmıştır. Bakterilerin yapıda oluşturduğu kalsit daha geçirimsiz bir yapı oluşturarak kapiller yolla su emmeyi azaltmıştır. BH numuneleri 28 gün ve 90 gün sonunda kontrol harçlarına göre %22,78 ve %16,67 oranında daha düşük kapilariteye sahiptir. Geçmiş çalışmalarda olduğu gibi [13,108,109], kalsitin kapiller emilimini azalttığı görülmüştür. ÇA serileri incelendiğinde, çay atıklarının sahip olduğu su emme

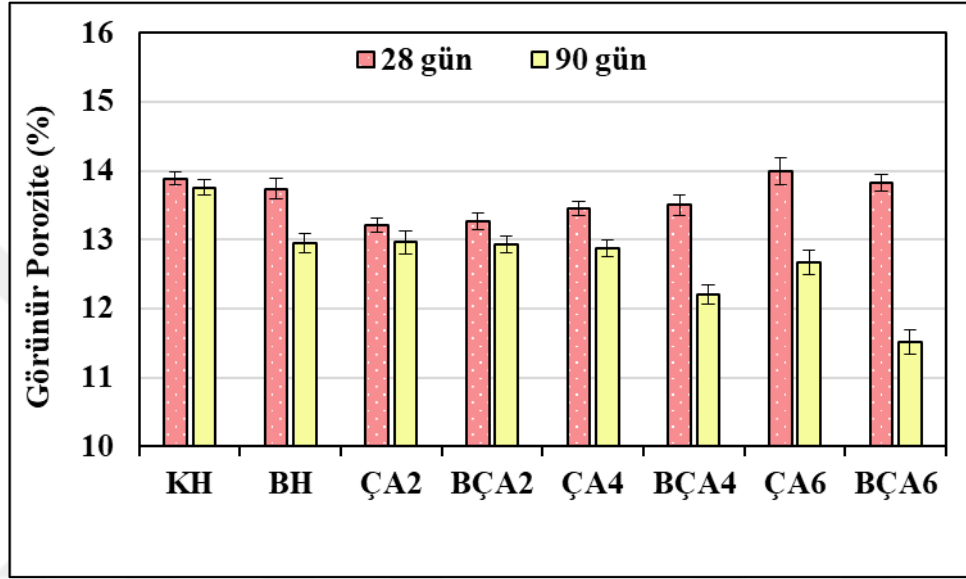
özelliğine rağmen, kılcal yolla emmeyi azalttığı görülmüştür. Bu durum süper absorbe yeteneğine sahip materyallerde olduğu gibi, çayın su emerek şişmesi ve kılcal yolu tıkanması sayesinde gerçekleştiği öngörülmektedir [110]. Üstelik sahip oldukları bu su tutma kapasitesi sayesinde kompozitin içyapısındaki bakteriler için su ve oksijen kaynağı oluşturmuştur. Böylece çay atığı ikamesinin ve bakterinin (BÇA serisi) bir arada kullanılması sayesinde kontrol numunelerine göre daha az miktarda kapiller yolla su emilmesi sağlanmıştır. Üstelik kullanılan çay atığı ikame miktarı arttıkça kapillarite katsayısı azalmıştır. En düşük katsayıya sahip olan BÇA6 serisi KH'ye göre, 28 gün sonunda %29,96, 90 gün sonunda %31,90 oranında daha düşük değer vermiştir. Böylece çay atıklarının kalsitleşme sürecini uzattığı için 90 gün sonunda en fazla katkıyı verdiği saptanmıştır. Böylece bakteriyel kendi kendine iyileşme yönteminin en sorunlu ve gelişime muhtaç yönlerinden biri olan iyileşme süreç kısıllığının çay atıklarını kullanarak uzatılabildiği saptanmıştır.

Gupta vd. [97] çalışmasında belirtildiği gibi, kalsitlerin sadece çatlakları doldurmadığı, aynı zamanda boşlukları doldurarak kompozitin daha geçirimsiz hale getirdiği saptanmıştır. Boşluk ve kapiller su emme arasındaki lineer ilişki sayesinde numuneler daha az kapiler yolla su emmeyi başarmıştır [111]. Böylece bu çalışma çay atıklarının bakterileri betonun içyapısında aktif tutarak, sadece yüzeyde değil iç yapıda da kalsitleşme sağladığını ispatlamıştır. İçyapıda ve yüzeyde meydana gelen bu kalsitler kılcal yolları ve gözenekleri kapatarak kompozitin kapiler yolla daha az su emmesini sağlamıştır.

4.9 Görünür Porozite Değerleri

Görünür porozite deneyi harç numunelerinde birçok değişken hakkında fikir veren bir deney metodudur. Çay gibi atık bir malzemenin ve bakteriyel tedavi sonrası oluşan ürünlerin poroziteye olan etkisini incelemek amacıyla yürütülmüştür. İlk olarak ön hasarsız numunelerin değerleri belirlenmiştir. Harç serilerinin görünür porozite değeri Şekil 4.21'de verilmiştir. 28 günlük serilerde en yüksek porozite değerleri KH ve ÇA6 serisinde tespit edilmiştir. Çay atıkları ÇA2 ve ÇA4 serilerinde sahip oldukları düşük ikame oranları sayesinde ekstra gözenekliliğe neden olmadığı gibi sahip olduğu iç kütleme etkisi nedeniyle poroziteyi azaltmıştır. Diğer yandan ÇA6 serisinde daha yüksek oranda bulunan çay atıkları poroziteyi arttırmıştır. Ancak 90 günün sonunda çay atıklarının sahip olduğu bu su emme özelliği pozitif bir etki göstererek KH ve tüm

serileri arasında en düşük değeri göstermiştir. Bu da çay atıklarının herhangi bir ikincil etki ve takviye olmadan dahi harç yapısının porozitesini artıracak bir malzeme olmadığını kanıtlamıştır. Bakterili seriler incelendiğinde, BH serisinin, KH serisine göre daha düşük poroziteye sahip olduğu saptanmıştır. Bu da bakteri ürünü kalsitlerin harç yapısı üzerindeki efektifliğini göstermektedir. Özhan vd. [19] çalışmasında da bakterilerin ürettiği kalsitin porozite üzerinde önemli bir etkisi olduğu ve bakteriler ne kadar aktifse porozitenin buna paralel olarak azaldığını belirtmişlerdir.

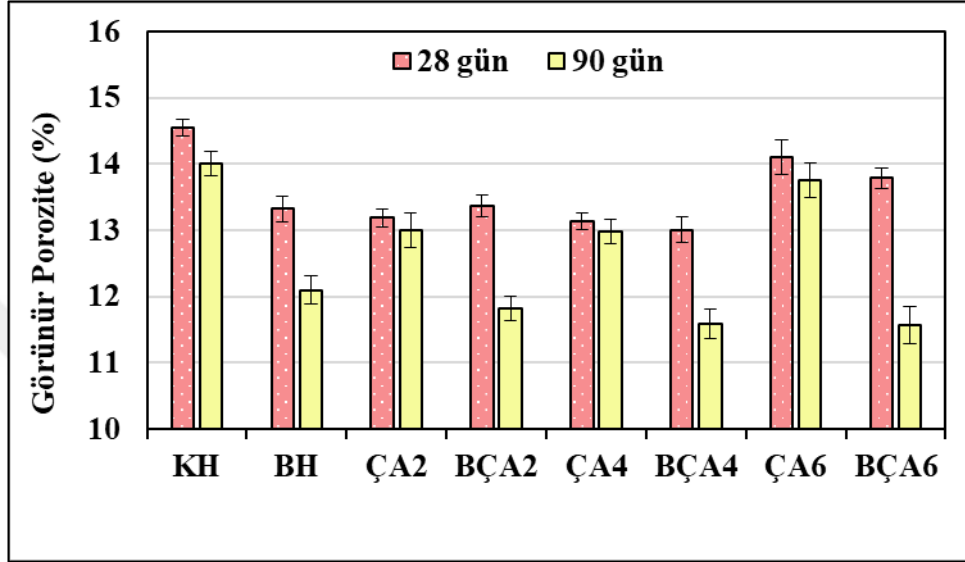


Şekil 4.21 : Ön hasarsız harç numunelerinin porozite değerleri.

En düşük oranda bakterili çay atığı içeren BÇA2 serisinin porozite değerleri, ÇA2 serisinin değerlerine benzer çıkmıştır. Bu da efektif yapı değişikliği için bakteri kullanım oranının önemini göstermiştir. Kullanılan çay atığı arttıkça bakterilerin kalsit üretme etkinlikleri artmıştır. Bunun sonunda en düşük porozite oranı BÇA6 serisinde saptanmıştır. Üstelik 28 günden sonra en sert düşüş miktarı yine BÇA6 serisinde görülmüştür. Bu da kalsit üretim süresinin dolayısıyla bakterilerin koruyucu ihtiyacını tekrar vurgulamıştır. Çay atıkları bu kalsitleşme sürecini uzatarak gün sonunda bakterili numunelerin en güçlü değerlere ulaşmasını sağlamıştır.

Porozite deneylerinde ikincil olarak ön hasarlı numunelerin değerleri belirlenmiştir ve sonuçlar Şekil 4.22’de verilmiştir. Hasarın yapıda oluşturduğu çatlaklar KH numunelerinin porozite oranlarını yükseltmiştir. BH serilerinin değerleri incelendiğinde, bakteriyel tedavinin hasarlı yapılarda daha etkin olduğu görünür porozite deneyinde de saptanmıştır. 90 gün sonunda ön hasarlı BH serisinin porozitesinin hasarsız halinden dahi daha düşük olduğu belirlenmiştir. Bu da oluşan

hasar kaynaklı çatlakların, harç yapısından yoğun bir yapıya sahip olan kalsitle dolmasıyla ilişkilidir. Böylelikle ilk halinden daha dolu gözeneksiz bir yapı elde edilmiştir. Hasarlı yapılardaki bakterilerin ve bakteri ürünü olan kalsitin yüksek etkinliğe sahip bir tedavi sunduğu bu tez çalışmasına paralel olarak Güçman vd. [112] çalışmasında bakteriyel tedavinin ve kalsitin harçların gözenekliliği üzerinde önemli bir rol oynayabildiğini raporlamıştır.



Şekil 4.22 : Ön hasarlı harç numunelerinin porozite değerleri.

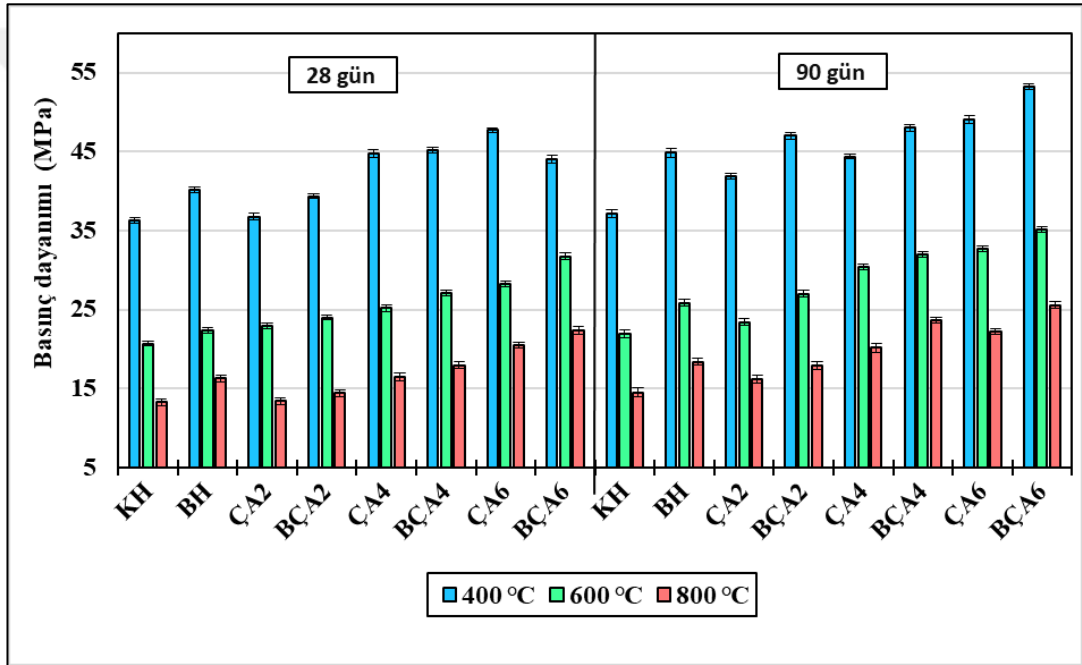
Ön hasarlı serilerde çay atığının etkisi incelendiğinde, çay atıklarının sahip olduğu fiber davranışının da devreye girdiği görülmektedir. Kısıtlanan çatlak ve hasar sayesinde ÇA2 ve ÇA4 serisi kontrol numunelerine göre daha düşük oranlara sahiptir. Yükleme karşısında daha az hasar almasını sağlayan çay atıkları bakteriler için daha uygun kalsit üretim alanları yaratmıştır. Bu sebeple tüm BÇA serilerinin 90 günün sonunda daha düşük değerler saptanmıştır. ÇA6 serisi sahip olduğu yüksek çay atığı miktarı yüzünden 28 gün sonunda en yüksek porozite oranına sahip olsa da 90 gün sonunda en düşük değere ulaşmıştır. Bu da çay atığının yüksek su emme kabiliyetinin yaratabileceği dezavantajların bakteri aktivitesi sayesinde avantaj haline gelebileceği saptanmıştır.

4.10 Yüksek Sıcaklık Etkisi Deney Sonuçları

Yüksek sıcaklık çimentolu kompozitlerde ciddi hasarlar veren bir dış etkidir. Bu etki kompozitin türüne ve içeriğine göre değişiklik gösterir. Örneğin fiberler sergiledikleri yüksek sıcaklık kaynaklı çatlakları kısıtlayabilmektedir. Bunun yanı sıra önceki

çalışmalar MICP sistemi sayesinde üretilen kalsitin, harçların yüksek sıcaklık dayanıklılığını arttırdığını göstermiştir [113,114]. Ancak bakteriyal fiberli kompozitlerin yüksek sıcaklık karşısındaki dayanıklılığını inceleyen kısıtlı çalışmalar bulunmaktadır. Bu sebeple bu çalışma çay atık fiberi içerisine emdirilmiş bakteriler içeren harç numunelerinin yüksek sıcaklık dayanıklılığını incelemiştir.

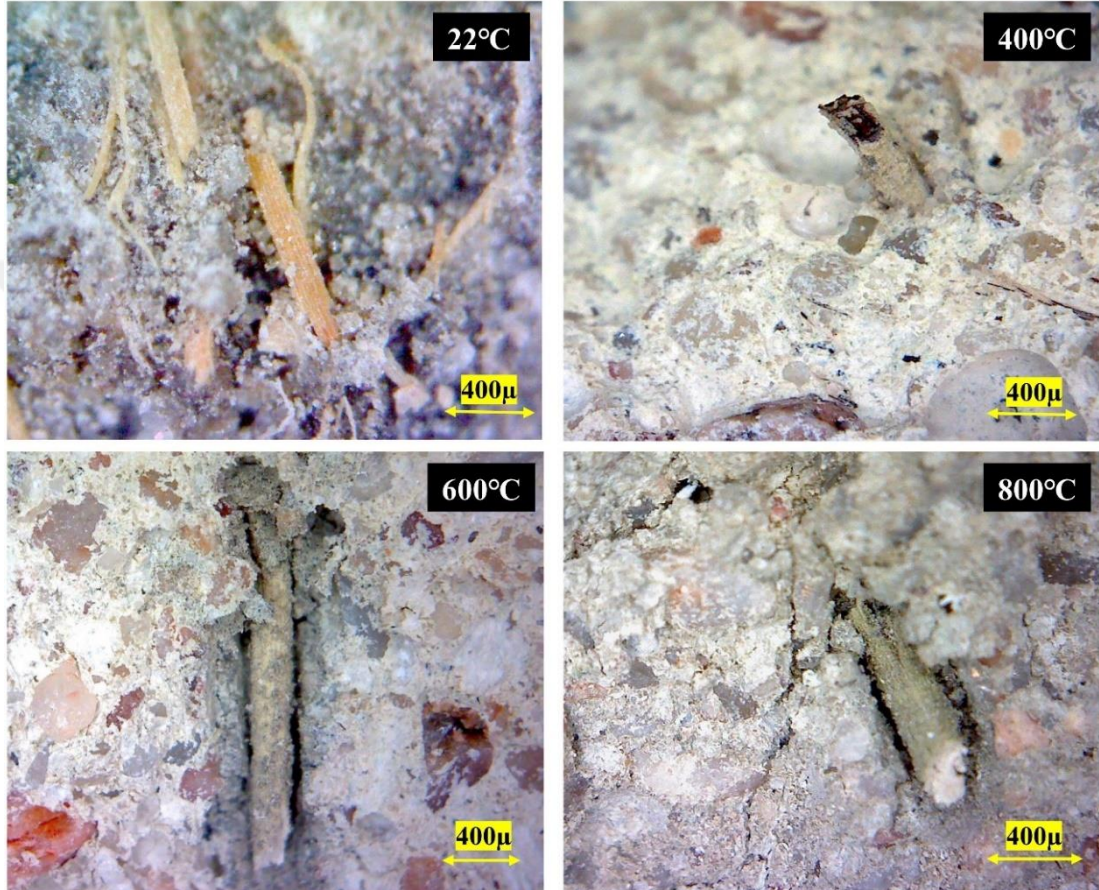
İlk olarak numunelerin basınç dayanımı değerleri incelenmiştir. Hasarsız numunelerin yüksek sıcaklık sonrası basınç dayanımı değerleri Şekil 4.23’de verilmiştir. Yüksek sıcaklığın tüm numunelerde ciddi basınç dayanımı kayıplarına neden olduğu görülmüştür. Ancak çay atıklarının bakterisiz hali ile bile harç numunelerini yüksek sıcaklığa karşı daha dayanıklı hale getirdiği görülmüştür.



Şekil 4.23 : Yüksek sıcaklık sonrası harç numunelerinin basınç dayanımı değerleri.

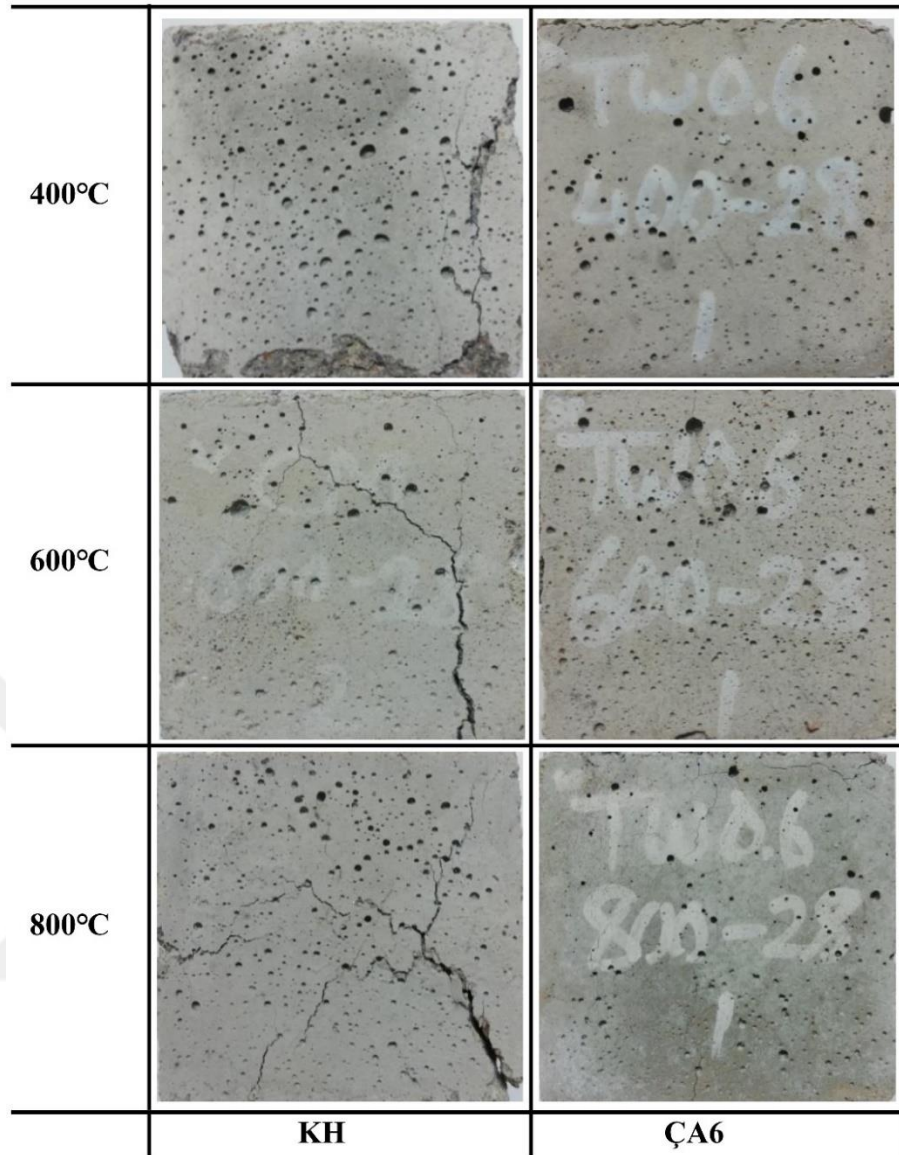
28 günlük numunelerin 400 °C maruziyet sonrası, KH serisi 36,29 MPa dayanıma sahipken, ÇA2 serisi 36,77 MPa, ÇA4 serisi 44,77 MPa, ÇA6 serisi 47,70 MPa dayanıma sahip olarak bulunmuştur. Böylece çay atığı ikame oranının arttıkça daha yüksek artık dayanımlar elde edildiği saptanmıştır. En yüksek dayanım değerlerini sağlayan ÇA6 serisi KH serisine göre 600 °C ve 800 °C sonrası da %36,7 ve %54,1 daha yüksek dayanım göstermiştir. Aradaki bu önemli fark çay atıklarının sergilediği fiber davranışı ile mümkün olmuştur. Doğal bir fiber tipi olarak kullanılan çay atıkları yüksek sıcaklık karşısında kömürleşme özellikleri sayesinde bütünlüklerini koruyabilmişlerdir. Böylece fiber davranışı göstermeye devam edebilmiştir. Yüksek

sıcaklık nedeniyle çay atığı fiberlerin etrafında meydana gelen tanjant boşluk sayesinde de buhar ve ekstra basıncı tahliye edilmiştir. Bu davranışın bir benzeri keten fiber ve sisal fiber takviyeli malzemelerde de görülmektedir [115,116]. Her üç sıcaklık maruziyeti sonrası çay atıklarının harç içerisindeki görünüşleri Şekil 4.24'te gösterilmiştir. Çay atıklarının bütünlüğünü koruduğu ve hala fiber olarak işlev yapabileceği gözlemlenmiştir.



Şekil 4.24 : Yüksek sıcaklık sonrası çay atıklarının harç yapısı içerisindeki görünümü.

90 günlük kontrol ve çay atığı takviyeli ÇA serilerinde 28 günlüklere göre önemli bir durabilite değişikliği belirlenmemiştir. Bu da çay atıklarının yüksek sıcaklık karşısındaki vereceği katkıyı 28 gün sonunda verebildiği anlamını taşımaktadır. Çay atıklarının harç serilerine sağladığı bu yüksek sıcaklık karşısında bir arada kalabilme kalma yeteneği yüksek sıcaklığa maruz kalmış numunelerde fiziksel olarak da görülmüştür. KH ve ÇA6 serilerinin yüksek sıcaklık sonrası görünüşleri Şekil 4.25'te verilmiştir. Çay atığının harçlara kattığı anti çatlak etkisi yüksek sıcaklık karşısında da kendini gösterdiği açıkça görülmüştür.



Şekil 4.25 : Yüksek sıcaklık sonrası KH ve ÇA6 harçlarının yüzeyleri (5cm×5cm).

Bakterili numunelerin yüksek sıcaklık sonrası değerleri incelendiğinde, henüz 28 gün sonunda dahi bakterilerin ürettiği kalsit etkisini gösterdiği saptanmıştır. 28 gün sonunda BH serisi KH serisine göre, 400 °C, 600 °C ve 800 °C sonrası sırasıyla %10,53, %7,97 ve %22,48 daha yüksek artık dayanım değerlerine sahiptir. 90 gün sonunda bu değerler sırasıyla %20,91, %17,75, %26,93'e yükselmiştir. Bu da bakteriyel tedavinin uzun olmasa bile üretilen kalsitler ve sağlamlaşan harç yapısında daha etkin olduğu sonucunu çıkartmıştır. Bunun yansısı kalsitleşme etkisinin en yüksek katkısı, en yüksek sıcaklık derecesi maruziyetinde verdiği görülmüştür.

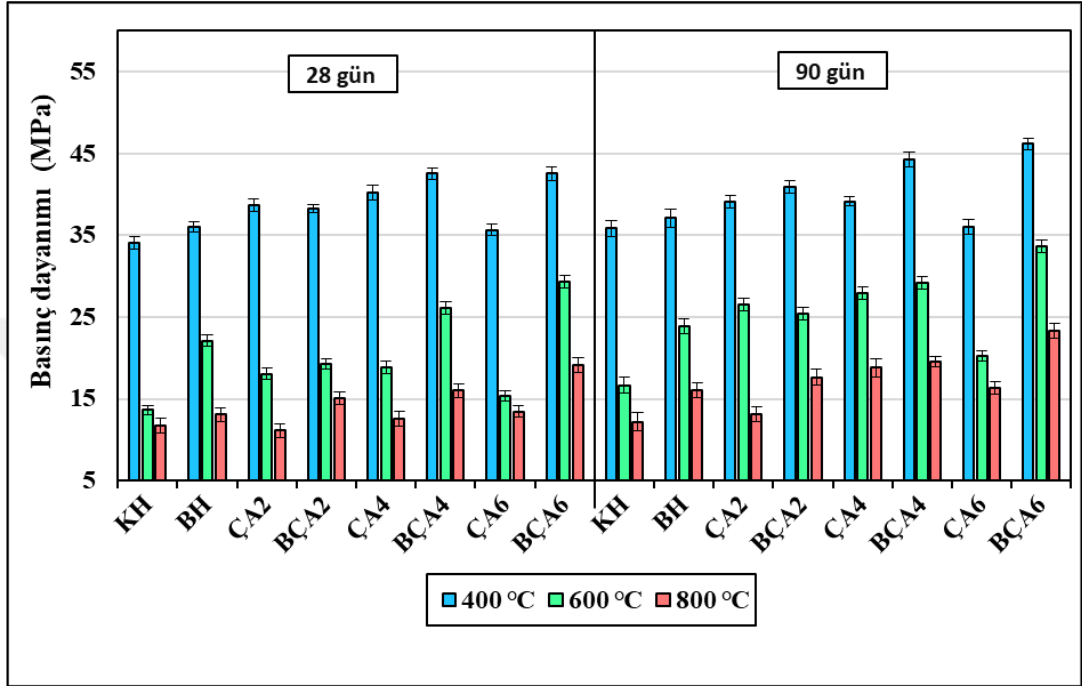
Yüksek sıcaklık karşısında en yüksek artık dayanımlar yine BÇA6 serisinde saptanmıştır. 90 günün sonunda BÇA6 serisi 400 °C, 600 °C ve 800 °C maruziyet sonrası kontrol serisine göre sırasıyla %43,30, %60,08 ve %76,10 daha yüksek artık

dayanım değeri vermiştir. Böylece çay atıkları daha yüksek oranda kalsit oluşumunu tetiklediği ve bunun sonucunda daha dolgun hale gelen harç yapısının daha yüksek durabilite özelliği sergilediği saptanmıştır. Üstelik bu dolgun yapıda sağladığı doğal fiber etkisiyle MICP tedavisi birleşince, en yüksek sıcaklık derecesinde en yüksek katkı oranını sergileyen bir kompozit meydana getirilmiştir.

İkinci olarak, hasar verilerek 28 gün ve 90 gün boyunca iyileşmesi beklenen ön hasarlı numunelerin yüksek sıcaklık sonrası basınç dayanımları incelenmiştir. Basınç dayanımı sonuçları Şekil 4.26'da verilmiştir. Basınç hasarlarının (yükleme) yüksek sıcaklık karşısında ciddi düşüşlere neden olduğu KH serisinde gözlemlenmiştir. Mevcut çatlaklar sıcaklık etkisi karşısında numuneyi daha savunmasız hale getirmiştir. Böylece çatlak tedavisinin önemi durabilite açısından önemi saptanmıştır. Çay atıklarının çatlak kısıtlama davranışı sayesinde ve doğal fiber özellikleri sayesinde ÇA serileri KH serilerine göre hasarlı numunelerde de daha yüksek artık basınç dayanımı sağlamıştır. Bakterilerin kapattığı çatlaklar ise etkisini henüz 28 günlük numunelerde dahi sergilemiştir. Yüksek sıcaklık maruziyeti sonrası BH numuneleri 28 gün sonunda KH numunelerine göre daha yüksek basınç dayanımına sahip olmuştur. Böylece Yıldırım vd. [117] çalışmasında olduğu gibi bakteriyel tedaviyle iyileşen harçların daha yüksek dayanıklılığa sahip olduğu saptanmıştır. Ancak bakteri etkisini çay atığı varlığında daha çok göstermiştir. Öyle ki, en yüksek basınç dayanımları her üç sıcaklık maruziyetinden sonra da BÇA6 serisinde belirlenmiştir. 28 gün sonunda BÇA6 serisi KH serisine göre 400 °C, 600 °C ve 800 °C maruziyet sonrası sırasıyla %19,32, %90,88 ve %41,87 daha yüksek dayanım değerine sahiptir. Bu da 800 °C gibi bir seviyenin hasarlı bir kompozitteki yıkıcılığını göstermektedir. Ancak bakteri ve çay atığı birlikteliği bu derece bir dış etki hasarına dahi dayanmıştır. Öyle ki 800 °C sonrasında dahi güçlü bir davranış sergilemiştir.

90 gün sonunda KH numunelerinin değerlerinde otojen iyileşme sebebiyle yükselmeler saptanmıştır. Bunun yanı sıra ÇA takviyeli serilerde de çay atıklarının kısıtladığı çatlak aralıkları ve iç kürlenme sayesinde otojen iyileşmeyi desteklediği görülmüştür. Bu sayede ÇA serileri de 90 günün sonunda dayanıklılığını arttırmıştır. Bunun yanı sıra çay atıkları bakteriyel kendi kendini onarım tedavisi üzerinde etkisini uzun dönemde de göstermiştir. Çay atıklarının sağladığı koruma sayesinde daha fazla kalsit ve daha yüksek oranda iyileşme sağlayan BÇA serileri en yüksek artık basınç dayanımı sergilemiştir. Çay ikame oranı ve tedavi gün sayısı arttıkça BÇA serilerinin

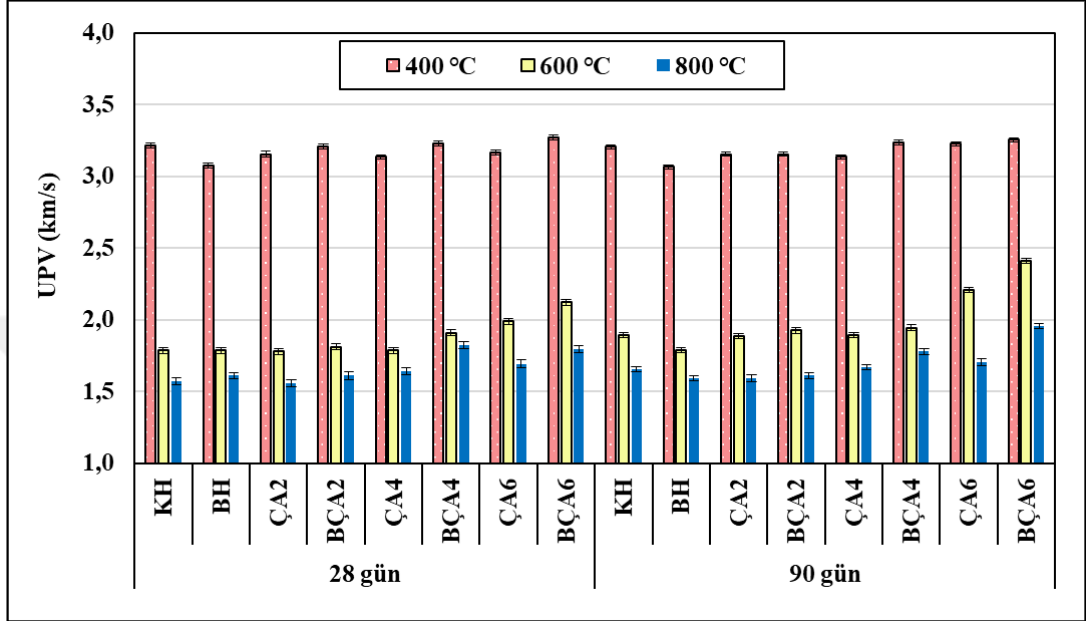
artık dayanım değerleri giderek artmıştır. 90 gün sonunda BÇA6 serisi KH serisine göre sırasıyla 400 °C, 600 °C ve 800 °C maruziyet sonrasında %28,68, %101,98 ve %91,07 daha yüksek dayanım değerine sahiptir. Böylece bu çalışma çay atığının bakteriyel harçlarda ikame olarak kullanımının yüksek sıcaklık karşısında dayanım değerlerini artıracağını belirlemiştir.



Şekil 4.26 : Yüksek sıcaklık sonrası ön hasarlı numunelerin basınç dayanımı değerleri.

Dayanım deneylerinin ardından yüksek sıcaklığa maruz kalan numunelerde UPV deneyleri yürütülmüştür. İlk olarak ön hasarsız numunelerin yüksek sıcaklık sonrası UPV değerleri incelenmiştir. Bu UPV değerleri Şekil 4.27’de verilmiştir. 400 °C maruziyet sonrası değerler incelendiğinde UPV değerlerinin birbirine oldukça yakın olduğu görülmektedir. Bu da 400 °C’de meydana gelen hasarların diğer sıcaklık derecelerine göre daha az meydana geldiğini göstermektedir. Sıcaklık derecesi 600 °C’ye yükseldiğinde UPV değerlerinde ciddi düşüşler saptanmıştır. BH, ÇA2, ÇA4 serisinde kontrol serisine oldukça yakın değerler gözlenirken, ÇA6 serisinde daha yüksek bir UPV değeri göze çarpmaktadır. Bu da çay atığının yüksek sıcaklık sonrası daha sağlam bir harç yapısı bıraktığını göstermektedir. Diğer dikkat çeken parametre ise ÇA ve BÇA serileri aralarında saptanmıştır. Tüm BÇA serileri kendi ilgili ÇA serisine göre daha yüksek UPV değeri sergilemiştir. Bu da bakteri ve çay atığının mutualist etkileşiminin yüksek sıcaklık karşısında da olumlu yansıdığını göstermektedir. Maruziyet derecesi 800 °C’ye çıktığında da harç numunelerinin UPV değeri azalmıştır.

90 günlük seriler incelendiğinde çay atığı oranı arttıkça UPV değerlerinin yükseldiği görülmektedir. Bu artışa bakteri tedavisi de eklenince en yüksek UPV değerleri her sıcaklık derecesinin ardından 90 günlük BÇA6 serisinde tespit edilmiştir. Böylelikle çay atıklarının uzattığı bakteriyel tedavinin yüksek sıcaklığa karşı harçların yapısını daha iyi muhafaza ettiği sonucu çıkarılmıştır.

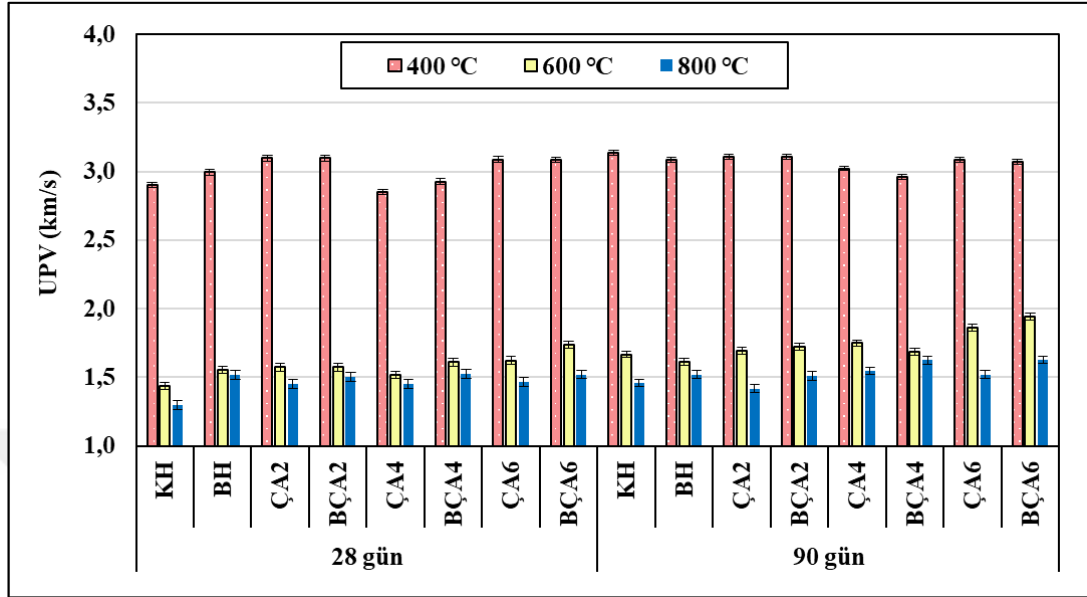


Şekil 4.27 : Yüksek sıcaklık maruziyeti sonrası harç numunelerinin UPV değerleri.

Ön hasarlı numunelerin yüksek sıcaklık maruziyeti sonrasındaki UPV değerleri Şekil 4.28’de verilmiştir. Değerler incelendiğinde ön hasarın yüksek sıcaklık karşısında harçların dayanıklılığını ciddi oranda düşürdüğü görülmektedir. Bu da hasarlı kompozitlerde MICP tedavisinin gerekliliğini vurgulamaktadır. Bu bakteriyel tedavinin etkisi henüz 28 günlük BH numunelerinde görülmüştür. Her sıcaklık derecesinden sonra BH numuneleri KH numunelerine göre daha yüksek UPV değerleri sergilemiştir.

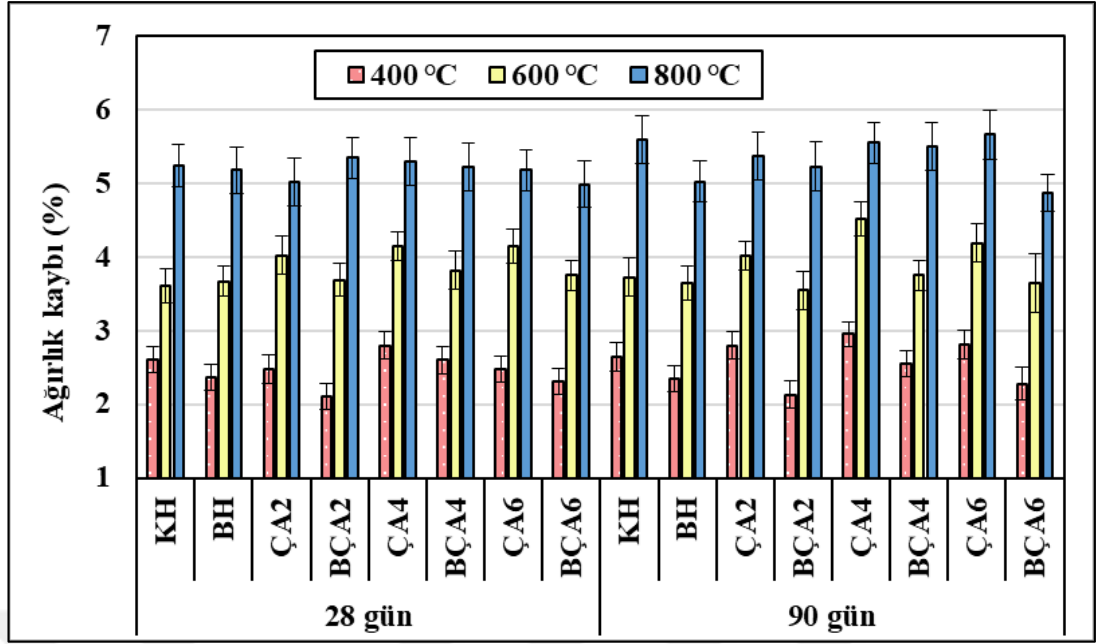
Çay atıkları da ön hasarlı numunelerde UPV değerlerinin korunumunu sağlayarak BH numunelerine göre daha yüksek artık UPV değerleri sergilemiştir. Çay atıklarının sahip olduğu çatlak kısıtlama ve yüksek sıcaklık karşısında kendini koruyan yapısı sayesinde bu UPV değerlerinin sağlanması mümkün olmuştur. Hasarsız numunelerde olduğu gibi ön hasarlı numunelerde de ÇA serilerine bakteri eklenerek oluşturulan BÇA serileri, ÇA serilerine göre daha yüksek UPV değerleri sağlamıştır. Bu da özellikle hasar almış kompozitlerdeki fiber ve bakteriler arasında sinerjistik etkisini göstermektedir. Bu etkinin getirmiş olduğu uzayan kalsitleşme süreci hasarların daha

yüksek ölçüde tedavi edilmesini ve dolayısıyla daha dayanıklı harçların oluşmasını sağlamıştır. Bu bağlamda yüksek sıcaklık derecesi yükseldikçe yine en yüksek değerler BÇA serilerinde ölçülmüştür.



Şekil 4.28 : Yüksek sıcaklık sonrası ön hasarlı harç numunelerinin UPV değerleri.

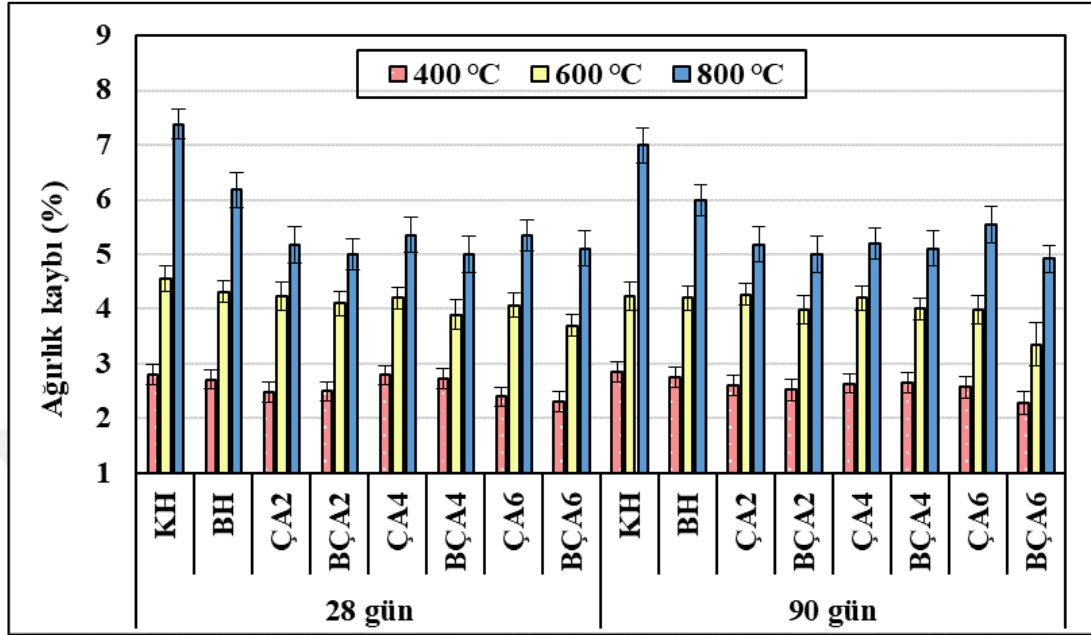
Yüksek sıcaklık harçlarda ağırlık kaybı yaratan bir unsundur. Bu kayıplar hem içyapıdaki fiziksel ve kimyasal değişimlerden hem de kompozitin bütünlüğünü koruyamayarak kütle kaybetmesinden kaynaklıdır. Ön hasarsız harç serilerinin yüksek sıcaklık etkisi sonunda yaşadıkları ağırlık kayıpları Şekil 4.29’da verilmiştir. Şekil 4.29 incelendiğinde, yüksek sıcaklık derecesi arttıkça ağırlık kaybı oranlarının arttığı görülmektedir. En önemli değişiklik ise ÇA ve BÇA serileri aralarında görülmüştür. Çay atıkları en yüksek oranda dahi %0,6 oranında kullanılmıştır. Bu sebepten çay atıklarının hasar görmesi veya görmemesi ağırlık oranlarına yansımaması beklenmemektedir. Hatta en yüksek oranda çay atığı içeren BÇA serisinde bazı sıcaklıklarda KH numunesinden daha fazla ağırlık kaybettiği görülmüştür. Ancak çay atıkları işlevsel olarak bakteriyel harçları etkilemiştir. Öyle ki 600 °C ve 800 °C maruziyeti sonrasında 90 gün sonunda en düşük ağırlık kayıpları BÇA6 serisinde görülmüştür. Bakterilere sağladıkları korunum sayesinde daha efektif kalsitleşme süreci yaratması ve aynı zamanda harçların sıcaklık karşısında bir doğal fiber etkisi sağlaması bunu mümkündür.



Şekil 4.29 : Yüksek sıcaklık etkisi nedeniyle harçlarda yaşanan ağırlık kaybı oranları.

Ağırlık kaybı oranı deneyinde ikincil olarak ön hasarlı numunelerin ağırlık kayıpları belirlenmiştir. Ölçülen bu ağırlık oranları Şekil 4.30’da verilmiştir. Harçlara verilen ön hasar nedeniyle harçların yüksek sıcak karşısında daha yüksek oranda ağırlık kaybettiği saptanmıştır. Örneğin 800 °C sonrasında ön hasarsız KH serisi ağırlığının %5,24’ünü kaybederken, ön hasarlı KH numunesi %7,38’ini kaybetmiştir. Bu da harcın uğradığı hasarın derecesini ifade etmektedir. Yükleme hasarına maruz kalan betonların yüksek sıcaklık karşısında yükleme nedeniyle meydana gelen çatlakların giderek dahada genişlediği ve bunun sonucu olarak ciddi dökülmeler olduğu Yıldırım vd. [38] çalışmasında belirlenmiştir. Paralel şekilde bu tez çalışmasında da hasarlı harçların yüksek sıcaklıklarda ciddi döküntü ve ağırlık kayıpları yaşadıkları görülmüştür. BH serisi incelendiğinde özellikle en yıkıcı sıcaklık hasarı olan 800 °C sonrası daha az miktarda ağırlık kaybettiği görülmektedir. Bu da bakterilerin hasarlı harçlarda oldukça etkin olduğunu ve bu hasar ürünü olan çatlaklarda kendilerine kalsit üretme alanı bularak efektif bir tedavi sunduğunu kanıtlamaktadır. Çay atıklarının hasarsız halde yüksek oranda etkisini gösteremediği ÇA serileri, ön hasarlı numunelerde daha güçlü bir etki göstermiştir. Çünkü doğal lif etkisi basınç yüklemeleri altında köprüleme davranışı sergileyerek oluşarak çatlakları kısıtlamıştır. Bu kısıtlama sonucu daha az hasar almış numuneler geride kalmıştır. BÇA serilerinin değerleri incelendiğinde, çay atığı sayesinde daha kısıtlı çatlaklarda daha elverişli koşullar bulan bakteriler daha yüksek oranda bir tedavi sunmuştur. Böylece daha güçlü

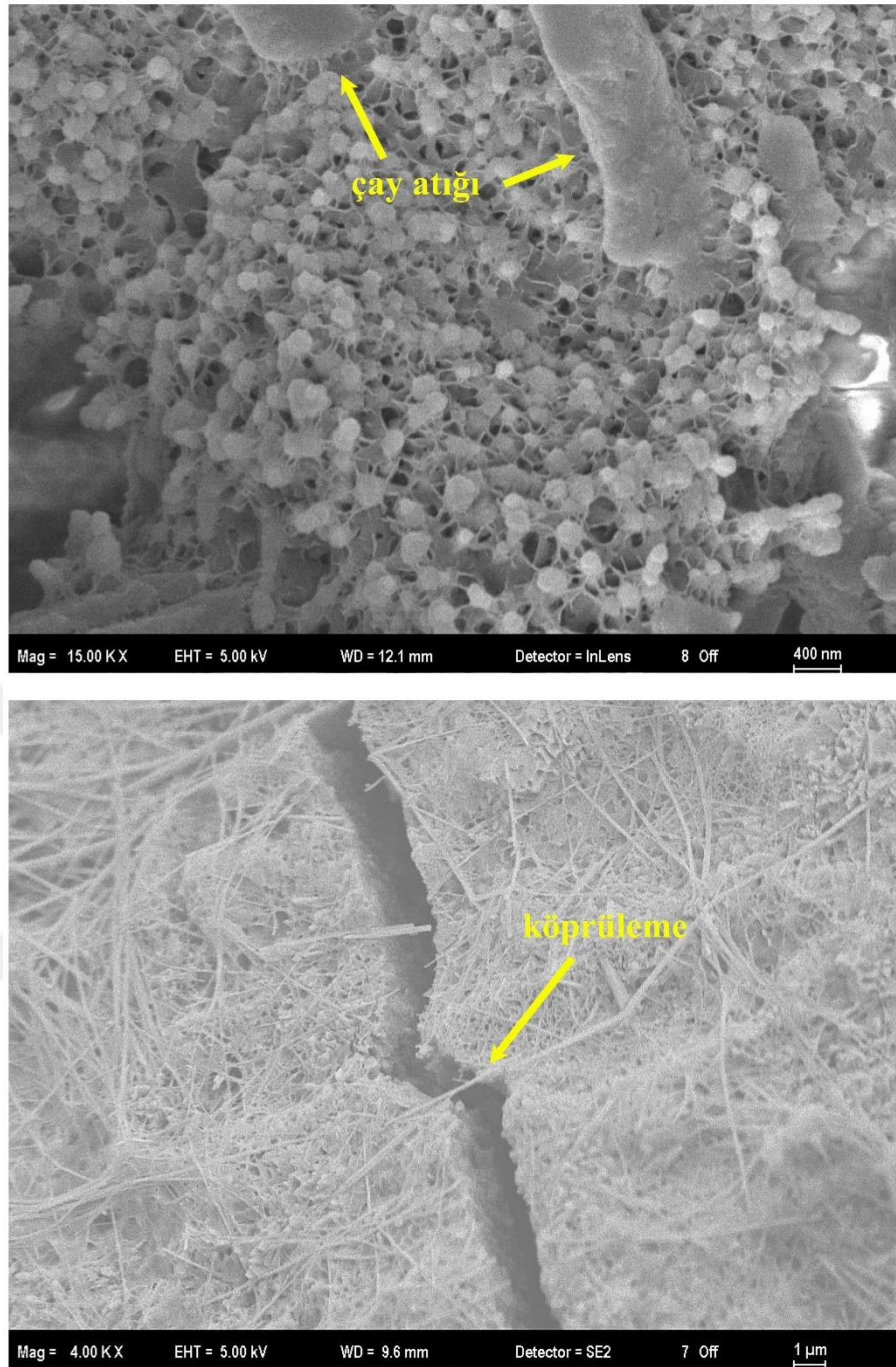
bir harç yapısı ortaya çıkarak yüksek sıcaklık karşısında daha az ağırlık kayıpları yaşanmıştır. Bunun sonucu olarak hem 28 günlük hem 90 günlük BÇA6 serileri her üç sıcaklık derecesi maruziyeti sonucunda en düşük ağırlık kaybını yaşamıştır.



Şekil 4.30: Yüksek sıcaklık etkisi nedeniyle ön hasarlı harçlarda yaşanan ağırlık kaybı oranları.

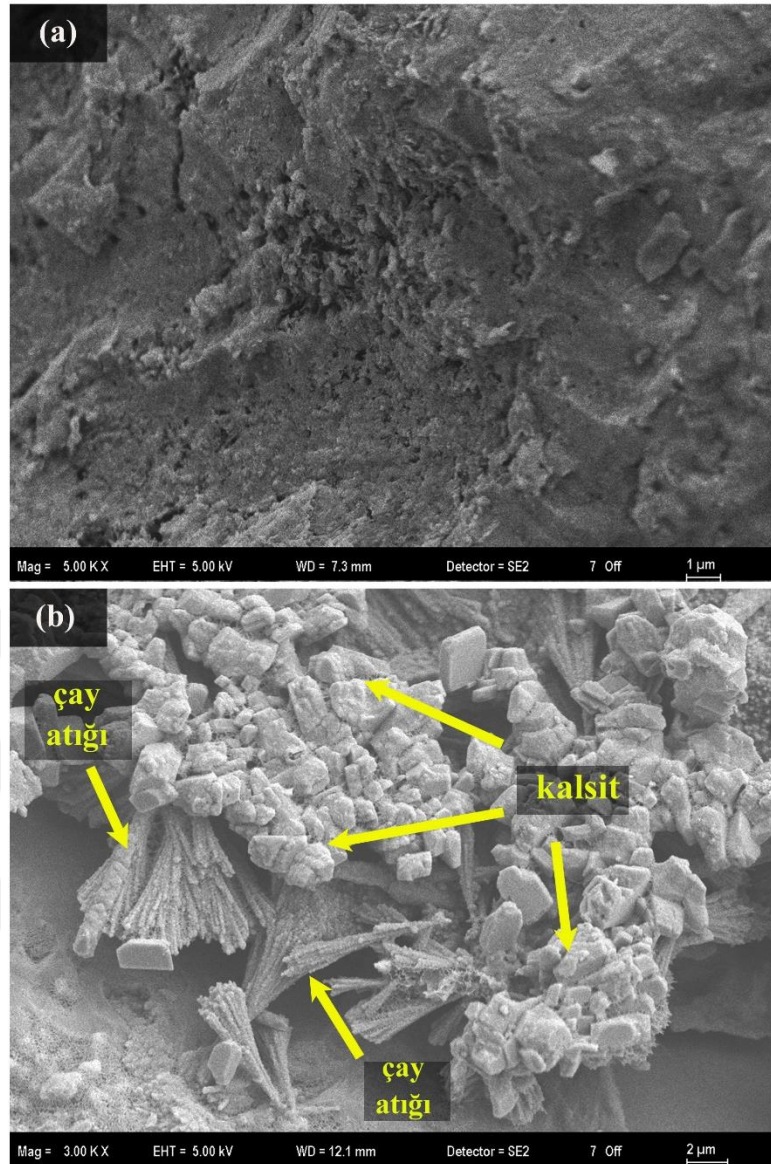
4.11 Taramalı Elektron Mikroskobu Analizi (SEM Analizi)

Çay atıklarının ve bakteri ürünlerinin harç yapısına etkileri 90 günlük harç numuneleri üzerinde yapılan SEM analizi ile araştırılmıştır. Çay atıklarının harç yapısıyla uyumu, kendi kendini iyileştirme davranışına katkı sağlaması açısından çok önemlidir. Çay atıklarının harç yapısıyla etkileşimi Şekil 4.31'de gösterilmektedir. Şekil 31'de gösterildiği gibi, çay atığı lifleri nanomikron düzeydeki yapıyla dahi bile üstün gömülme göstermiştir. Daha küçük büyütme oranıyla SEM altında incelendiğinde ise çay atıklarının yoğunluğuna rağmen ekstra boşluklar yaratmadığı ve çatlaklar arasında bakterilere uygun bir ortam yarattığı görülmektedir. Bu çay atıklarının eklenmesiyle harçta oluşan dayanım ve dayanıklılık özelliklerini görsel olarak desteklemektedir.



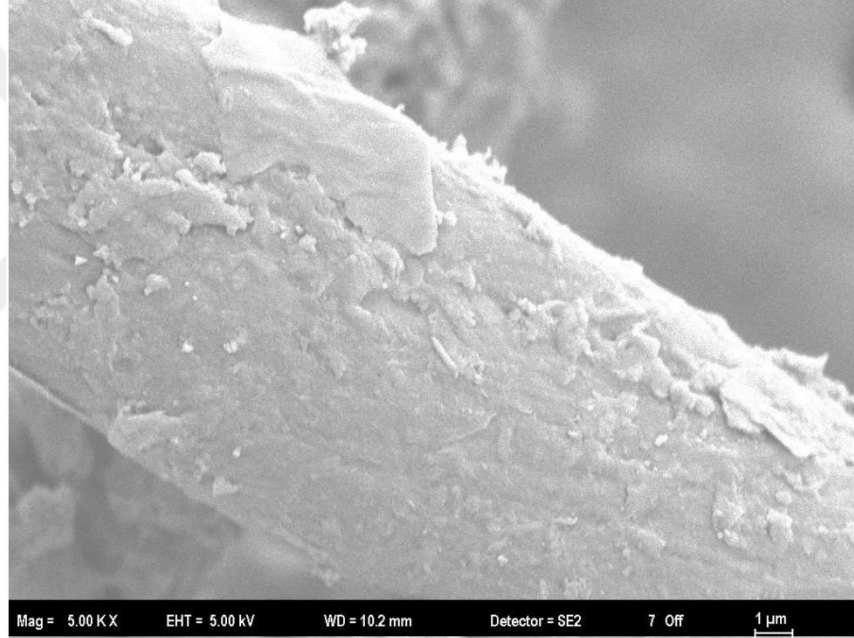
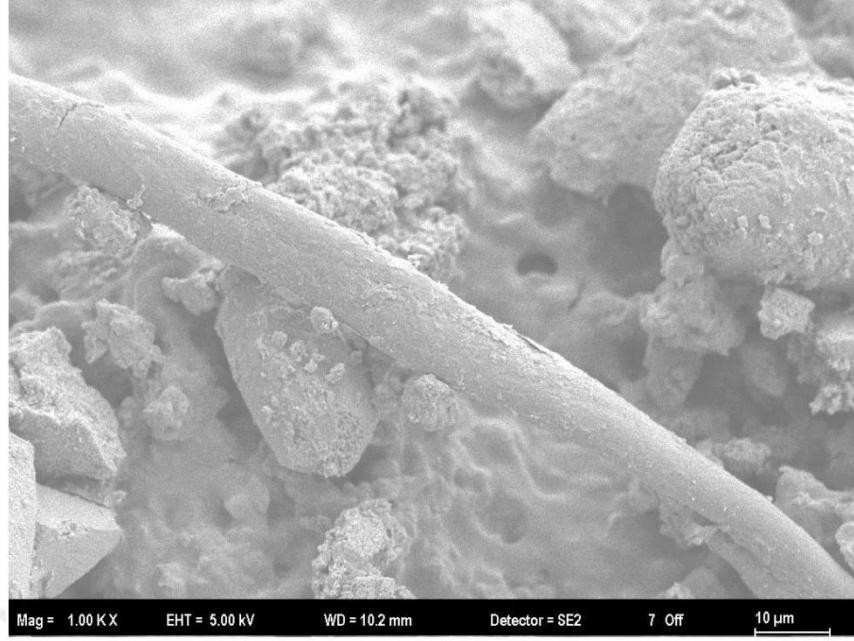
Şekil 4.31 : Harç yapısı içerisinde çay liflerinin görünümü.

Şekil 4.32’de hem kontrol hem de BÇA harç serisinin çatlak yapısından 90 gün sonunda alınan parçanın SEM görüntüleri sunulmaktadır. BÇA serisinde çeşitli boyut ve şekillerde kalsit oluşumları görülmektedir. Rauf vd. [42] yaptıkları çalışmada doğal lif takviyeli bakteri betonlarında da bu tez çalışmasındakine benzer şekillerdeki kalsit oluşumlarını gözlemlemişlerdir.



Şekil 4.32 : Kontrol (a) ve BÇA (b) harç yapısının SEM görüntüleri.

Su vd. [66] uygun koşullar ve malzemeler kullanıldığında polipropilen (PP) lifleri üzerinde de bakteriyel ürünler oluşabileceğini göstermiştir. Ancak mevcut çalışma bu davranışın doğal şekilde ekstra bir yüzey işlemi ve malzemesi kullanılmadan çay atığı tarafından sergilendiğini kanıtlamıştır. Bakteri harçtan sıyrılmış çay atığı lifinin elverişli yüzey görüntüsü Şekil 4.33’de gösterilmiştir. Bu durum çay atıklarının bakteri sporları için koruyucu ve uygun bir ortam sağladığını göstermektedir. Çay atıklarının sağladığı çeper işlevi ve ilave nem nedeniyle bakteri sporları çay atıklarının çevresinde önemli miktarda kalsit oluşturmuştur.



Şekil 4.33 : Çay atığının harç yapısı içerisindeki yüzey yapısı.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez kapsamında dünya çapında çokça açığa çıkan çay üretimi atıklarının bakterili çimentolu kompozitlerde kullanımı araştırılmıştır. *Bacillus megaterium* türü bakteri sporları çay atıklarına emdirilerek çay atık takviyeli ve bakterili harçlar üretilmiştir. Böylece çay atıkların bakterilere sağladığı koruyuculuk ve harç özelliklerine etkisi araştırılmıştır.

Elde edilen sonuçlar aşağıdaki maddelerde özetlenmiştir.

1. Çay atıklarının yüksek oranda su emme yeteneği olduğu ve bu sayede bakteri sporlarını başarılı şekilde tutabildiği görülmüştür. Çay atıkların doğal bir bitki atığı olması sebebiyle sahip olabileceği anti mikrobiyal aktivitenin *Bacillus megaterium* türünün büyümesine engel olmadığı anti mikrobiyal deney sonucunda kanıtlanmıştır.
2. Çay atıkları sahip oldukları yüksek su emme oranı ve lifsi yapısı sayesinde harçların yayılma değerlerini düşürmüştür. Ancak topaklanma göstermemesi sayesinde akışkanlaştırıcı ile istenilen yayılma değerlerinin kullanılan her üç çay atığı ikame oranında sağlanabileceği görülmüştür. Bakteri sporlarının ise harçların yayılma değerlerini üzerinde etkisi olmadığı görülmüştür.
3. Çay atıklarının boyut analizi sonucunda bakteri emebilecek boyutlara sahip olduğu belirlenmiştir. Bu da bu tez çalışmasında kullanılan yöntem açısından oldukça önemlidir. İkinci olarak, çay atıklarının sahip olduğu uzunluk değerlerinin de çimentolu kompozitlerde kullanım için uygun olduğu görülmüştür. Atık malzeme olmasına karşın sahip oldukları farklı uzunlukların ortalaması halihazırda kullanılan diğer yaygınca kullanılan fiber türlerinin boyutlarına yakın bulunmuştur.
4. Basınç yüklemeleri harçların üzerinde ciddi hasarlara neden olmuştur. Çay atıkları ise fiber etkisi sayesinde bu yükleme nedeniyle oluşan çatlaklar arasında köprüleme etkisi göstermiştir. Böylece gösterdiği doğal fiber olarak kullanılabileceği saptanmıştır.

5. ay atıklarının kısıtladığı çatlak aralıklarında bakteriyel tedavinin daha etkin olduğu görölmüştür. İlk 28 gün sonunda dahi böylelikle daha geniş çatlaklar onarılmıştır. Bunun yanı sıra çay atıklarının bakteriyel iyileşme sürecini arttırdığı görölmüştür. Bu da çay atıklarının bakteri koruyucu etkisini ispatlamıştır. Bu kapsamda 90 gün sonunda en geniş çatlak kapanma aralığı olan 0,68 mm iyileşme BA6 serisinde görölmüştür.
6. ay atıkların gösterdiği doğal fiber etkisi sayesinde daha çok enerji emilimi sağlayarak basınç dayanımları da artmıştır. İkame edilen çay atığı arttıkça basınç dayanımı değeri yükselmiştir. BH serilerinin de basınç dayanımı değeri artmıştır ancak bu artış oranı 90 günlük değeriinde görölmemiştir. Bu bakteriyel sistemin sorunu ve kapsülleme yöntemlerinin uygulanma sebebidir. Ancak BA serilerinde 90 gün sonunda en yüksek değeri ulaşmıştır. Bu da çay atığında bakteri emdirilmesinin mekanik özellikleri üzerindeki etkisini kanıtlamıştır. Ön hasarlı numunelerin basınç dayanımı incelendiğinde ise KH ve BH serilerinin bu hasarları yüksek oranda telafi edemezken, en yüksek bakterili çay atığı içeren harç serisi olan BA6 neredeyse tamamen basınç dayanımını geri kazandığı saptanmıştır.
7. ay atıklarının lifsi yapısı eğilme dayanımlarına da pozitif yansımıştır. Ancak eğilme dayanımı sonuçların çay atıkları için sağlam bir harç yapısının önemi görölmüştür. Bakterilerin ürettiği kalsit eğilme dayanımlarında artışa sahip olmuştur. Ancak yine de en yüksek dayanımlar BA serilerinde görölmüştür. Ek olarak, A ve BA serilerinin 28 günlük ve 90 günlük değeri arasındaki artış, çay atıklarının iç kütleme ve kalsitleşme süresinin uzatılmasına atfedilmiştir. Deney sonrası görüntülerde de çay atıklarının güçlü tutuş özellikleri görölmüştür.
8. Bakterilerin kalsitle doldurduğu gözenek ve çatlaklar UPV değeriinin artışına sebep olmuştur. Kalsitlerin daha dolu bir hacim yarattığı görölmüştür. ay atıklarının iç kütleme etkisinin yine daha güçlü bir harç yapısı UPV sonuçlarıyla doğrulanmıştır. ay atıklarına bakteri emdirilmesiyle UPV sonuçları en yüksek değeriilere ulaşarak çay atığı ile MICP sisteminin uyumu belirlenmiştir. Ön hasarlı numunelerin değeriinde ise bakterilerin çay atığı olmadan dahi çok etkin bir iyileşme sunduğu tespit edilmiştir. BA6 serisinde 90 gün sonunda hasarsız serilere göre bile daha yüksek UPV değeriileri

görülmüştür. Bu da hasar nedeniyle meydana gelen çatlakların çay atığı ve kalsitleşme özellikleri sayesinde çok daha yoğun bir şekilde doldurulduğunu göstermiştir. MICP sisteminin özellikle hasarlı numunelerdeki efektif olduğu belirlenmiştir.

9. Su emme oranları incelendiğinde, numune yüzeyinde kalsitleşme kaynaklı olan görülen beyazlaşmalar sayesinde kapanan porların su emme değerlerini azalttığı görülmektedir. Bunun sonucu olarak BH serisi KH serisine göre daha düşük su emme oranlarına sahip olmuştur. Çay atıklı serilerde su emme oranlarında artış gözlemlenmiştir. Ancak çay atıklarının bu su emme özelliği bakteri eklenen serilerde pozitif etki yapmıştır ve en düşük su emme oranları 90 gün sonunda BÇA6 serisinde gözlemlenmiştir. Bu durum su emen fiberlerin bakterilere koruyucu olarak kullanımının ne kadar etkin bir yöntem olduğunu kanıtlar niteliktedir.
10. Kapiller su emme değerleri incelendiğinde, bakterilerin yarattığı kalsitleşmenin kapiller yolları tıkararak su emme değerlerini azalttığı saptanmıştır. Bu sayede kontrol numunelerine göre BH serisinde kapiller su emme miktarı azalmıştır. Çay atıklarının sahip olduğu yüksek su emme oranlarına rağmen kapiller yolla bunu göstermediği saptanmıştır. Bu özellik çay atıkların sahip olduğu şişme özelliklerine ve harç içerisinde düzgün dağılma kabiliyetine atfedilmiştir. Kalsitleşme etkisiyle de birleşince en düşük kapiller su emme değerleri BÇA6 serisinde ölçülmüştür.
11. Bakteriyel oluşumlar harçların gözenekliliği azaltmıştır. Bu da BH serilerinin daha düşük porozite oranları sergilemesi sağlamıştır. Çay atığının da olumsuz bir artış yaratmadığı ve sahip olduğu kütleme yeteneğinin bakteriler olmadan da harç yapısını geliştirdiği görülmüştür. Ön hasarın kontrol numunelerde porozite değerlerini arttırdığı saptanmıştır. Ancak BÇA serilerinin hasarsız hallerine göre dahi daha düşük bir oran gösterdiği belirlenmiştir. Bu da tekrar MICP sisteminin hasarlı kompozitlerde daha etkin olduğunu göstermiştir. Bakteriler hasar nedeniyle yaratılan boşluklarda daha uygun bir gelişim gösterdiği ve çay atıklarının bu boşlukları kısıtlayarak bakteriler için optimum bir ortam yarattığı göz önüne alınmıştır.

12. ay atıklarının yüksek sıcaklık karşısında tahliye ve durabilite özellikleri sayesinde harçların daha yüksek bir basınç dayanımı korunumu sağlamıştır. Yüksek sıcaklık kaynaklı çatlakları da indirmiştir. Bakterilerin yarattığı kalsitlerinde yüksek sıcaklık direncini artırmıştır. Bu iki etki sinerjistik bir etki göstererek hem hasarsız hem ön hasarsız numunelerde en yüksek basınç dayanımlarını BA6 serisinde saptanmıştır. Yüksek sıcaklık sonrası UPV değerlerinde de yine en yüksek değerler BA6 serisinde görölmüştür. Bu da yüksek sıcaklık sonrası harç yapısının bütünlüğünün korunduğunu göstermiştir. Korunan bu harç bütünlüğü sayesinde yüksek sıcaklık sonrası en düşük ağırlık kayıpları da en yüksek bakterili çay atığı içeren serilerde saptanmıştır.

13. SEM analizi görüntülerde çay atığının harç yapısıyla uyumu, köprüleme davranışı ve çay atığı etrafında oluşan ve yoğunlaşan kalsit oluşumları tespit edilmiştir.

Gelecek çalışmalarda araştırılmak üzere yapılan öneriler aşağıdaki gibidir;

1. Farklı türde bakteriler ve çay atığı kullanarak, bakteri türü ve özelliklerine bağlı olarak çay atığının MICP sistemine katkısının araştırılması
2. Farklı hasar seviyelerindeki harçlarda bakterili çay atıklarının etkinliğinin araştırılması
3. Besiyer ve kür çeşitliği yaratarak farklı ortamlarda bakterili çay atıklarının iyileşme özelliklerinin araştırılması önerilmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] **Dobiszewska, M. & Wrzecion, K.** (2017). The Study of the Properties of Concrete Containing Waste Powder as a Fine Aggregate, *Proceedings of 10th International Conference Environmental Engineering*, Vilnius Gediminas Technical University, (pp. 1-7), Lithuania, April 27-28.
- [2] **Cheng, Y., Zhang, Y., Tan, G. & Jiao, Y.** (2018). Effect of Crack on Durability of RC Material under the Chloride Aggressive Environment, *Sustainability*, 10 (2), 1-16.
- [3] **Akhavan, A., Shafaatian, S.M.H. & Rajabipour, F.** (2012). Quantifying the effects of crack width, tortuosity, and roughness on water permeability of cracked mortars, *Cement and Concrete Research*, 42, 313–320.
- [4] **Berrocal, C.G., Löfgren, I., Lundgren, K. & Tang, L.** (2015). Corrosion initiation in cracked fibre reinforced concrete: Influence of crack width, fibre type and loading conditions, *Corrosion Science*, 98, 128–139.
- [5] **Cailleux, E. & Pollet, V.** (2009) Investigations on the development of self-healing properties in protective coatings for concrete and repair mortars, *Proceedings of the 2nd international conference on self-healing material*, (pp.1-2), Chicago,:USA, March 16-18.
- [6] **Nodehi, M., Ozbakkaloglu, T. & Gholampour, A.** (2022). A systematic review of bacteria-based self-healing concrete: Biomineralization, mechanical, and durability properties, *Journal of Building Engineering*, 49(104038)
- [7] **Lai, G., Liu, X., Li, S., Xu, Y., Zheng, Y., Guan, J., Gao, R., Wei, Z., Wang, Z. & Cui, S.** (2023). Development of chemical admixtures for green and environmentally friendly concrete: A review, *Journal of Cleaner Production*, 389 (136116).
- [8] **Miller, S.A., Horvath, A., & Monteiro, P.J.M.** (2016). Readily implementable techniques can cut annual CO₂ emissions from the production of concrete by over 20%, *Environmental Research Letters*, 11(7), 074029.
- [9] **Danner, T., Hjorth Jakobsen, U., & Geiker, M.R.** (2019). Mineralogical Sequence of Self-Healing Products in Cracked Marine Concrete, *Minerals*, 9 (5), 284-294.
- [10] **Van Breugel, K.** (2007). Is there a market for self-healing cement based materials?, *Proceedings of the First International Conference on Self Healing Materials*, (pp.1-9). Noordwijk aan Zee Netherlands, April 17-20.
- [11] **Wu, M., Hu, X., Zhang, Q., Xue, D. & Zhao, Y.** (2019) Growth environment optimization for inducing bacterial mineralization and its application in concrete healing, *Construction and Building Materials*, 209, 631–643.

- [12] **Van Tittelboom, K., De Belie, N., Muynck, W. De, & Verstraete, W.** (2010). Use of bacteria to repair cracks in concrete, *Cement and Concrete Research* 40, 157–166.
- [13] **Jongvivatsakul, P., Janprasit, K., Nuaklong, P., Pungrasmi, W. & Likitlersuang, S.** (2019) Investigation of the crack healing performance in mortar using microbially induced calcium carbonate precipitation (MICP) method, *Construction and Building Materials*, 212, 737–744.
- [14] **Bachmeier, K.L., Williams, A.E., Warmington, J.R., & Bang, S.S.** (2002). Urease activity in microbiologically-induced calcite precipitation, *Journal of Biotechnology*, 93, 171–181.
- [15] **Gollapudi, U.K., Knutson, C.L., Bang, S.S., & Islam, M.R.** (1995). A new method for controlling leaching through permeable channels, *Chemosphere*, 30, 695–705.
- [16] **Hammes, F., Boon, N., de Villiers, J., Verstraete, W. & Siciliano, S.D.** (2003). Strain-Specific Ureolytic Microbial Calcium Carbonate Precipitation, *Applied and Environmental Microbiology*, 69, 4901–4909.
- [17] **Hall-Stoodley, L., Costerton, J.W. & Stoodley, P.** (2004). Bacterial biofilms: from the Natural environment to infectious diseases, *Nature reviews microbiology*, 2(2), 95–108.
- [18] **Beveridge, T.J.** (1988). The bacterial surface: general considerations towards design and function, *Canadian Journal of Microbiology*, 34(4), 363–372.
- [19] **Özhan, H.B., Yıldırım, M., Ögüt, H., & Girgin, H.G.** (2023). Repair of Cracks in Concrete with the Microbial-Induced Calcite Precipitation (MICP) Method. *Slovak Journal of Civil Engineering*, 31(4), 1–8.
- [20] **Wang, J.Y., Snoeck, D., Van Vlierberghe, S., Verstraete, W. & De Belie, N.** (2014). Application of hydrogel encapsulated carbonate precipitating bacteria for approaching a realistic self-healing in concrete, *Construction and Building Materials*, 68, 110–119.
- [21] **Le Metayer-Levrel, G., Castanier, S., Orial, G., Loubiere, J.F. & Perthuisot, J.P.** (1999). Applications of bacterial carbonatogenesis to the protection and regeneration of limestones in buildings and historic patrimony, *Sedimentary Geology*, 126, 25–34.
- [22] **Yıldırım, M., Özhan, H.B. & Öz, H.G.** (2022). Bacteria-based self-healing of cement mortars loaded at different levels and exposed to high temperature. *Magazine of Concrete Research*, 75(3), 674–684.
- [23] **Jonkers, H.M. Thijssen, A. & Van Breugel, K.** (2010). Bacteria mediated remediation of concrete structures, *Proceedings of the Second International Symposium on Service Life Design for Infrastructures*. pp. 833–840. Delft, The Netherlands. May 20–21.
- [24] **Zhang, X., Jin, Z., Li, M., Qian, C.** (2021). Effects of carrier- on the performance of bacteria-based self-healing concrete, *Construction and Building Materials*, 305 (124771).

- [25] **Jonkers, H.M., Thijssen, A., Muyzer, G., Copuroglu, O. & Schlangen, E.** (2010). Application of bacteria as self-healing agent for the development of sustainable concrete, *Ecological Engineering*, 36, 230–235.
- [26] **Wiktor, V. & Jonkers, H.M.** (2011). Quantification of crack-healing in novel bacteria-based self-healing concrete, *Cement and Concrete Composites*, 33, 763-770.
- [27] **Sondarva, P.R., Pitroda, J.R., Gujar, R. & Soni, J.** (2022) An Experimental Investigation on the Strength Properties of Ceramic Tiles Waste Powder based Bacterial Concrete, *Materials Today: Proceedings*, 62 7062-7067.
- [28] **Huang, H., Ye, G., Qian, C. & Schlangen, E.** (2016). Self-healing in cementitious materials: Materials, methods and service conditions, *Materials & Design*, 92, 499–511.
- [29] **Huang, H., Ye, G. & Shui, Z.** (2014) Feasibility of self-healing in cementitious materials – By using capsules or a vascular system?, *Construction and Building Materials*, 63, 108–118.
- [30] **Van Tittelboom, K. & De Belie, N.** (2013). Self-Healing in Cementitious Materials—A Review, *Materials*, 6, 2182–2217.
- [31] **Chindasiriphan, P., Subwilai, N., Intarasoontron, J., Nuaklong, P., Jongvivatsakul, P., Chompoorat, T., Pungrasmi, W. & Likitlersuang, S.** (2024). Synergistic effects of microencapsulated bacterial spores and superabsorbent polymer on self-healing performance in mortar, *Construction and Building Materials*, 414(135005).
- [32] **Wang, J. Y., De Belie, N. & Verstraete, W.** (2012). Diatomaceous earth as a protective vehicle for bacteria applied for self-healing concrete, *Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology*, 39, 567–577.
- [33] **Han, .S, Choi, E.K., Park, W., Yi, C. & Chung, N.** (2019). Effectiveness of expanded clay as a bacteria carrier for self-healing concrete, *Applied Biological Chemistry*, 62(19), 1-5.
- [34] **Chen, H.J., Peng, C.F., Tang, C.W. & Chen, Y.** (2019). Self-Healing Concrete by Biological Substrate, *Materials*, 12(4099).
- [35] **Tziviloglou, E., Wiktor, V., Jonkers, H.M. & Schlangen, E.** (2016). Bacteria-based self-healing concrete to increase liquid tightness of cracks, *Construction and Building Materials*, 122, 118–125.
- [36] **Bhaskar, S., Anwar Hossain, K.M., Lachemi, M., Wolfaardt, G. & Otini Kroukamp, M.** (2017). Effect of self-healing on strength and durability of zeolite-immobilized bacterial cementitious mortar composites, *Cement and Concrete Composites*, 82, 23–33.
- [37] **Feng, C., Zong, X., Cui, B., Guo, H., Zhang, W. & Zhu, J.** (2022). Application of Carrier Materials in Self-Healing Cement-Based Materials Based on Microbial-Induced Mineralization, *Crystals*, 12, 797.

- [38] **Yıldırım, M. & Özhan, H.B.** (2023). Residual Durability Performance of Glass Fiber Reinforced Concrete Damaged by Compressive Stress Loads, *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, 67 (2), 392–401.
- [39] **Yıldırım, M. & Özhan, H.B.** (2023). Durability properties of basalt fiber-reinforced mortars with different mineral admixtures exposed to high temperatures. *Construction and Building Materials*, 400(132574).
- [40] **Homma, D., Mihashi, H. & Nishiwaki, T.** (2009). Self-Healing Capability of Fibre Reinforced Cementitious Composites, *Journal of Advanced Concrete Technology*, 7, 217–228.
- [41] **Singh, H. & Gupta, R.** (2020). Cellulose fiber as bacteria-carrier in mortar: Self-healing quantification using UPV, *Journal of Building Engineering*, 28 (101090).
- [42] **Rauf, M., Khaliq, W., Khushnood, R.A. & Ahmed, I.** (2020). Comparative performance of different bacteria immobilized in natural fibers for self-healing in concrete, *Construction and Building Materials*, 258(119578).
- [43] **Guo, Y., Xiang, K., Wang, H., Liu, X., Ye, Q. & Wang, X.** (2023). Experimental study on self-healing and mechanical properties of sisal fiber-loaded microbial concrete, *Mater. Res. Express*, 10(045701).
- [44] **Amjad, H., Khushnood, R.A. & Ahmad, F.** (2023). Enhanced fracture and durability resilience using bio-triggered sisal fibers in concrete, *Journal of Building Engineering*, 76(10700).
- [45] **Yıldırım, M., Özhan, H.B. & Öz, H.G.** (2023). Production of self-healing mortar using bacterial spores encapsulated with jute fibre, *Advances in Civil and Architectural Engineering*, 14, 131–142.
- [46] **FAOSTAT, Food and Agriculture Statistics.** (2018). Current Market Situation and Medium Term Outlook, *Food and Agriculture Organization of the United Nations*, pp. 13–16. Rome: Italy.
- [47] **Guo, S., Kumar, M., Wang, Y. & Xu, P.** (2021). Current understanding in conversion and application of tea waste biomass: A review, *Bioresource Technology*, 338 (125530).
- [48] **Kütük, A.C., Çayci, G. & Baran, A.** (1995). Çay Atıklarının Bitki Yetiştirme Ortamı Olarak Kullanılabilme Olanakları, *J Agr Sci-Tarim Bili*, 01 , 35-40.
- [49] **Gundogdu, A., Duran, C., Senturk, H.B., Soylak, M., Imamoglu, M. & Onal, Y.** (2013). Physicochemical characteristics of a novel activated carbon produced from tea industry waste, *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 104, 249–259.
- [50] **Cao, Y., Zandi, Y., Rahimi, A., Wu, Y., Fu, L., Wang, Q., Denić, N., Amine Khadimallah, M., Milič, M. & Paunović, M.** (2021). A new intelligence fuzzy-based hybrid metaheuristic algorithm for analyzing the application of tea waste in concrete as natural fiber, *Computers and Electronics in Agriculture*, 190(106420).
- [51] **Caronge, M.A., Tjaronge, M.W., Rahim, I.R., Irmawaty, R., & Lapian, F.E.P.** (2022). Feasibility study on the use of processed waste tea ash

as cement replacement for sustainable concrete production, *Journal of Building Engineering*, 52 (104458).

- [52] **Jakhrani, S.H., Ryou, J.S., Atta-ur-Rehman, K., Woo, B.H. & Kim, H.G.** (2019). Prevention of Autogenous Shrinkage in High-Strength Mortars with Saturated Tea Waste Particles, *Materials*, 12 (2654).
- [53] **Thakare, A.A. , Gupta, T., Deewan, R. & Chaudhary, S.** (2022). Micro and macro-structural properties of waste tyre rubber fibre-reinforced bacterial self-healing mortar, *Construction and Building Materials*, 322 (126459).
- [54] **Yamasamit, N., Sangkeaw, P., Jitchaijaroen, W., Thongchom, C., Keawsawasvong, S. & Kamchoom, V.** (2023). Effect of *Bacillus subtilis* on mechanical and self-healing properties in mortar with different crack widths and curing conditions, *Scientific Report*, 13(844).
- [55] **Luo, M., Qian, C. & Li, R.** (2015). Factors affecting crack repairing capacity of bacteria-based self-healing concrete, *Construction and Building Materials*, 87, 1–7.
- [56] **Feng, J. , Su, Y. & Qian, C.** (2019). Coupled effect of PP fiber, PVA fiber and bacteria on self-healing efficiency of early-age cracks in concrete, *Construction and Building Materials*, 228(116810).
- [57] **Vijay, K., & Murmu, M.** (2019). Self-repairing of concrete cracks by using bacteria and basalt fiber, *SN Appl. Sci.*, 1 (344).
- [58] **Vijay, K., & Murmu, M.** (2021). Evaluating durability parameters of concrete containing bacteria and basalt fiber, *J Build Rehabil*, 7, 2-16.
- [59] **Hu, X., Jiang, Y., Wu, M., Zhang, Q., & Yang, Z.** (2024). Synergistic self-healing effect and mechanism of fiber and biological capsule on mortar cracks, *Journal of Sustainable Cement-Based Materials*, 13, 767–785.
- [60] **Kua, H.W., Gupta, S. , Aday, A.N. & Srubar, W.V.** (2019). Biochar-immobilized bacteria and superabsorbent polymers enable self-healing of fiber-reinforced concrete after multiple damage cycles, *Cement and Concrete Composites*, 100, 35–52.
- [61] **Karimi, N. & Mostofinejad, D.** (2020). *Bacillus subtilis* bacteria used in fiber reinforced concrete and their effects on concrete penetrability, *Construction and Building Materials*, 230 (117051).
- [62] **Salmasi, F. & Mostofinejad, D.** (2020). Investigating the effects of bacterial activity on compressive strength and durability of natural lightweight aggregate concrete reinforced with steel fibers, *Construction and Building Materials*, 251 (119032).
- [63] **Madhan Kumar, M., Vijaya Ganapathy, D., Subathra Devi, V. & Iswarya, N.** (2020). Experimental Investigation on Fibre Reinforced Bacterial Concrete, *Materials Today: Proceedings*, 22, 2779–2790.
- [64] **Manojkumar, C., Ramesh, B. & Ramesh Kumar, G.B.** (2023). Study on the compressive strength of glass fibre reinforced M20 grade self-healing concrete using a novel technique microbial induced calcite precipitation, *Materials Today: Proceedings*, 79, 53–58.

- [65] **Zhang, D., Shahin, M.A., Yang, Y., Liu, H., Cheng, L.** (2022). Effect of microbially induced calcite precipitation treatment on the bonding properties of steel fiber in ultra-high performance concrete, *Journal of Building Engineering*, 50 (104132).
- [66] **Su, Y., Qian, C., Rui, Y. & Feng, J.** (2021). Exploring the coupled mechanism of fibers and bacteria on self-healing concrete from bacterial extracellular polymeric substances (EPS), *Cement and Concrete Composites*, 116 (103896).
- [67] **Anbazhagan, R. & Arunachalam, S.** (2024). Development of Bio-healing Fiber Composite Concrete at Different Curing Conditions, *Arabian Journal for Science and Engineering*, 1, 1-13.
- [68] **Guo, Y., Xiang, K., Wang, H., Liu, X., Ye, Q. & Wang, X.** (2023). Experimental study on self-healing and mechanical properties of sisal fiber-loaded microbial concrete, *Mater. Res. Express*, 10 (045701).
- [69] **Amjad, H., Khushnood, R. A. & Memon, S.A.** (2023). Biomimetic robust self-healing of *Bacillus Subtilis* immobilized through sisal fiber for next-generation concrete infrastructure, *Construction and Building Materials*, 368 (130299).
- [70] **Igbokwe, E., Ibekwe, S., Mensah, P., Agu, O. & Li, G.** (2024). Self-healing of macroscopic cracks in concrete by cellulose fiber carried microbes, *Journal of Building Engineering*, 90 (109383).
- [71] **Al Biajawi, M.I., Abdulrahman, M.F., Saod, W.M., Hilal, N., Embong, R. & Sor, N.H.** (2023). Investigation the effect of nanocarbon tube prepared from tea waste on microstructure and properties of cement mortar, *Environmental Science and Pollution Research*, 1, 1-14.
- [72] **Horma, O., Charai, M., El Hassani, S., El Hammouti, A. & Mezrhab, A.** (2022). Thermo-physical and mechanical characterization of cement-based mortar incorporating spent tea, *Journal of Building Engineering*, 52(104392).
- [73] **Hussain, S.** (2020). Internal Curing in High Strength Mortars with Tea Waste Particles: Evaluation of Early Age Shrinkage, *Physical and Durability Properties*, Hanyang University.
- [74] **Jakhrani, S.H., Kim, H.G., Jeon, I.K. & Ryou, J.S.** (2019). Effect of Saturated Tea Waste and Perlite Particles on Early Age Hydration of High-Strength Cement Mortars, *Materials*, 12 (2269).
- [75] **B.S. EN, EN 197-1** (2011). Cement–Part 1: Composition, specifications and conformity criteria for common cements. British standart.
- [76] **TS EN 196-1.** (2016) Çimento test yöntemleri - Bölüm 1: Dayanımın belirlenmesi, Türk Standartları Enstitüsü.
- [77] **Ahmed, I., Yokota, A., Yamazoe, A. & Fujiwara, T.** (2007). Proposal of *Lysinibacillus boronitolerans* gen. nov. sp. nov., and transfer of *Bacillus fusiformis* to *Lysinibacillus fusiformis* comb. nov. and *Bacillus sphaericus* to *Lysinibacillus sphaericus* comb. nov., *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*, 57, 1117–1125.

- [78] **Fahimizadeh, M., Diane Abeyratne, A., Mae, L.S., Singh, R.K.R. & Pasbakhsh, P.** (2020). Biological Self-Healing of Cement Paste and Mortar by Non-Ureolytic Bacteria Encapsulated in Alginate Hydrogel Capsules, *Materials*, 13(3711).
- [79] **Pinto, A., González-Fontebao, B., Seara-Paz, S. & Martínez-Abella, F.** (2023). Effects of bacteria-based self-healing nutrients on hydration and rheology of cement pastes, *Construction and Building Materials*, 404 (133142).
- [80] **Paine, K.** (2016). Bacteria-based self-healing concrete: Effects of environment, exposure and crack size, *Proceedings of the RILEM Conference on Microorganisms-Cementitious Materials Interactions*, (pp.1–15). Paris, France.
- [81] **Sun, X., Miao, X., Wu, L. & Chen, R.** (2019). Improvement of bio-cementation at low temperature based on *Bacillus megaterium*, *Appl Microbiol Biotechnol*, 103, 7191–7202.
- [82] **TS EN 1015-3** (2012) Methods of test for mortar for masonry- Part 3: Determination of consistence of fresh mortar (by flow table), Türk Standartları Enstitüsü.
- [83] **ASTM C109/C109M-20b** (2020). Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens). *Annual Book of ASTM Standards*, USA.
- [84] **ASTM C348** (2002). Standard Test Method for Flexural Strength of Hydraulic-Cement Mortars, *Annual Book of ASTM Standards*, USA.
- [85] **ASTM C597-9** (2009). Standard test method for pulse velocity through concrete, ASTM International, West Conshohocken, PA, USA.
- [86] **ASTM C642** (2006). Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete, *Annual Book of ASTM Standards*, USA
- [87] **ASTM 1585-13** (2014). Standard Test Method for Measurement of Rate of Absorption of Water by Hydraulic-Cement Concretes, ASTM International, *Annual Book of ASTM Standards*, USA.
- [88] **Lalitha, M.K.** (2004). Manual on antimicrobial susceptibility testing, *Performance Standards for Antimicrobial Testing: Twelfth Informational Supplement*, 56238, 454–456.
- [89] **Rashmi Nayak, J., Bochen, J. & Golaszewska, M.** (2022). Experimental studies on the effect of natural and synthetic fibers on properties of fresh and hardened mortar, *Construction and Building Materials*, 347 (128550).
- [90] **Reinhardt, H.W. & Jooss, M.** (2003). Permeability and self-healing of cracked concrete as a function of temperature and crack width, *Cement and Concrete Research*, 33, 981–985.
- [91] **Chen, Q., Li, W., Jiang, Z.** (2022). Theoretical estimation of the elastic moduli of self-healing concrete relevant to the evolution of cracks closing due to crystallization- and precipitation-based mechanism, *Journal of Building Engineering*, 58, 104995.

- [92] **Kanwal, M., Khushnood, R.A., Khaliq, W., Wattoo, A.G. & Shahid, T.** (2022). Synthesis of pyrolytic carbonized bagasse to immobilize *Bacillus subtilis*; application in healing micro-cracks and fracture properties of concrete, *Cement and Concrete Composites*, 126(104334).
- [93] **Parashar, A.K. & Gupta, A.** (2021). Experimental study of the effect of *Bacillus megaterium* bacteria on cement concrete, *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 1116 (012168).
- [94] **Krishnapriya, S., Venkatesh Babu, D.L. & PA, G.** (2015). Isolation and identification of bacteria to improve the strength of concrete, *Microbiological Research*, 174, 48–55.
- [95] **Luo, M., Liu, Y., Li, X. & Dai, J.** (2022). Crack Self-Healing of Cement Mortar Containing Ureolytic Bacteria Immobilized in Artificial Functional Carrier under Different Exposure Environments, *Buildings*, 12 (1348).
- [96] **Khaliq, W. & Ehsan, M.B.** (2016). Crack healing in concrete using various bio influenced self-healing techniques, *Construction and Building Materials*, 102, 349–357.
- [97] **Gupta, S., Kua, H.W. & Pang, S.D.** (2018). Healing cement mortar by immobilization of bacteria in biochar: An integrated approach of self-healing and carbon sequestration, *Cement and Concrete Composites*, 86, 238–254.
- [98] **Xu, H., Lian, J., Gao, M., Fu, D. & Yan, Y.** (2019). Self-Healing Concrete Using Rubber Particles to Immobilize Bacterial Spores, *Materials*, 12(2313).
- [99] **Juárez, C., Guevara, B., Valdez, P. & Durán-Herrera, A.** (2010). Mechanical properties of natural fibers reinforced sustainable masonry, *Construction and Building Materials*, 24, 1536–1541.
- [100] **Evangelia, T., Ioanna, V. & Stefanidou, M.** (2024). Effect of hemp fibers and crystalline admixtures on the properties and self-healing efficiency of lime and clay-based mortars, *Journal of Building Engineering*, 86(108963).
- [101] **Zhang, Y., Wu, B., Wang, J., Liu, M. & Zhang, X.** (2019). Reactive Powder Concrete Mix Ratio and Steel Fiber Content Optimization under Different Curing Conditions, *Materials*, 12 (3615).
- [102] **Yıldırım, M. & Özhan, H.B.** (2024). Effects of hybrid metallic wastes on strength and durability of cementitious mortars, *Magazine of Concrete Research*, 76(3), 468–481.
- [103] **Siddique, R., Jameel, A., Singh, M., Barnat-Hunek, D., Kunal, Ait-Mokhtar, A., Belarbi, R. & Rajor, A.** (2017). Effect of bacteria on strength, permeation characteristics and micro-structure of silica fume concrete, *Construction and Building Materials*, 142, 92–100.
- [104] **Chaurasia, L., Bisht, V., Singh, L.P. & Gupta, S.** (2019). A novel approach of biomineralization for improving micro and macro-properties of concrete, *Construction and Building Materials*, 195, 340–351.

- [105] **Hoseini, M.** (2013). Effect of Compressive Loading on Transport Properties of Cement-Based Materials (Doctoral dissertation), University of Alberta, Canada.
- [106] **Kumar, R. & Bhattacharjee, B.** (2003). Porosity, pore size distribution and in situ strength of concrete, *Cement and Concrete Research*, 33(1), 155-164.
- [107] **Yildirim, M. & Özhan, H.B.** (2023). Effect of permeability-reducing admixtures on concrete properties at different cement dosages, *Journal of Innovative Science and Engineering*, 7(1), 48-59.
- [108] **Wang, L., Ren, Z., Wang, H., Liang, X., Liu, S., Ren, J., He, Y. & Zhang, M.** (2022). Microstructure-property relationships in cement mortar with surface treatment of microbial induced carbonate precipitation, *Composites Part B: Engineering*, 239 (109986).
- [109] **Sharma, B., Singh, A., Joshi, S. & Reddy, S.** (2023). Utilization of sandstone waste in cement mortar for sustainable production of building materials through biomineralization, *Journal of Sustainable Cement-Based Materials*, 12 , 712–720.
- [110] **Snoeck, D., Van den Heede, P., Van Mullem, T. & De Belie, N.** (2018). Water penetration through cracks in self-healing cementitious materials with superabsorbent polymers studied by neutron radiography, *Cement and Concrete Research*, 113, 86–98.
- [111] **Zhuang, S., Wang, Q., & Zhang, M.** (2022). Water absorption behaviour of concrete: Novel experimental findings and model characterization, *Journal of Building Engineering*, 53 (104602).
- [112] **Güçman, N.Ş., Bilecen, K., Warscheid, T., Son, T. & Topal, T.** (2019). *Tarihi Kireçtaşlarını Koruma Müdahalelerinde Uygulamak Üzere Kalsit Üreten Bakterilerle Biyolojik Harç Geliştirilmesi 1001-Raporu* (Rapor No: 115M188). Ankara: Orta Doğu Teknik Üniversitesi Mimarlık Fakültesi.
- [113] **Chen, H.J., Lo, Y.H., Tang, C.W. & Chang, H.W.** (2024). Applying Microbial-Induced Calcium Carbonate Precipitation Technology to Improve the Bond Strength of Lightweight Aggregate Concrete after High-Temperature Damage, *Applied Sciences*, 14 (1416).
- [114] **Özhan, H.B. & Yildirim, M.** (2020). Effects of acid and high-temperature treatments on durability of bacterial concrete, *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 25(3), 1421–1430.
- [115] **Zhang, D., Tan, G.Y. & Tan, K.H.** (2021). Combined effect of flax fibers and steel fibers on spalling resistance of ultra-high performance concrete at high temperature, *Cement and Concrete Composites*, 121 (104067).
- [116] **Ren, G., Gao, X. & Zhang, H.** (2022). Utilization of hybrid sisal and steel fibers to improve elevated temperature resistance of ultra-high performance concrete, *Cement and Concrete Composites*, 130 (104555).
- [117] **Yildirim, M., Özhan, H.B. & Öz, H.G.** (2023). Bacteria-based self-healing of cement mortars loaded at different levels and exposed to high temperature, *Magazine of Concrete Research*, 75(3), 674–684.

ÖZGEÇMİŞ

TARANMIŞ
VESİKALIK
FOTOĞRAF

Ad-Soyad : Musa YILDIRIM

Doğum Tarihi ve Yeri :

E-posta :

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2017, Sakarya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü
- **Yüksek Lisans** : 2019, Bursa Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, İnşaat Mühendisliği Tezli Yüksek Lisans Programı

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

-
-

TEZDEN TÜRETİLEN ESERLER, SUNUMLAR VE PATENTLER:

-
-
-

DİĞER ESERLER, SUNUMLAR VE PATENTLER:

- **Yıldırım, M. & Özhan, H.B.** (2020). Effects of acid and high-temperature treatments on durability of bacterial concrete. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 25(3), 1421–1430.
- **Yıldırım, M. & Özhan, H.B.** (2022). Bacteria-based self-healing of cement mortars loaded at different levels and exposed to high temperature. *Magazine of Concrete Research*, 75 (3),674–684.
- **Yıldırım, M. & Özhan, H.B.** (2023). Durability properties of basalt fiber-reinforced mortars with different mineral admixtures exposed to high temperatures. *Construction and Building Materials*, 400 (132574).

- **Yıldırım, M., Özhan, H.B. & Öz, H.G.** (2023). Production of Self-Healing Mortar using Bacterial Spores Encapsulated with Jute Fibre. *Advances in Civil and Architectural Engineering* 14 (27), 131-142.
- **Yıldırım, M. & Özhan, H.B.** (2023). Effect of Bacterial Curing and Bacterial Additive on Concrete Properties. *Advances in Civil and Architectural Engineering* 14, 32–43.
- **Yıldırım, M. & Özhan, H.B.** (2023). Effect of permeability-reducing admixtures on concrete properties at different cement dosage,. *JISE*, (7)1, 48-59.
- **Özhan, H.B., Yıldırım, M., Ögüt, H. & Girgin, H.G.** (2023). Repair of Cracks in Concrete with the Microbial-Induced Calcite Precipitation (MICP) Method. *Slovak Journal of Civil Engineering*, 31(4), 1–8.
- **Yıldırım, M. & Özhan, H.B.** (2023). Residual Durability Performance of Glass Fiber Reinforced Concrete Damaged by Compressive Stress Loads. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, 67(2), 392–401.
- **Yıldırım, M. & Özhan, H.B.** (2024). Effects of hybrid metallic wastes on strength and durability of cementitious mortars. *Magazine of Concrete Research*, 76(9), 468–481.
- **Yıldırım, M. & Tutkun, R.** (2024). Developing of High Temperature Resistance Cementitious Composites by Using CNC Milling Waste. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*, 1-15.
- **Yıldırım, M. & Özhan, H.B.** (2020). Effect of High Temperature on Compressive Strenght in Mortar and Paste Produced with Blast Furnace Slag Activated by Sodium Carbonate, *Construction Materials Engineering and Architecture Congress*, (pp. 86-94), Ankara: Türkiye, June 12-14.
- **Benlioğlu, A., Yıldırım, M., Özen, S., & Altun, M.G.** (2023). Metakaolin ve Kolemanit Atığı İçeren Harç Karışımlarının Yüksek Sıcaklık Etkisi Altındaki Performansının İncelenmesi, *3rd International Conference on Innovative Academic Studies*, (pp. 740-747), Konya, Türkiye: September 26-28.
- **Özen, S., Altun, M.G., Durgun, Y. & Yıldırım, M.** (2023). Silis Dumanı Kullanımının Kolemanit ve Kolemanit Atığı İçeren Harç Karışımların Dayanımına Etkisi, *5th International Conference on Applied Engineering and Natural Sciences*, (pp. 996-1004), Konya: Türkiye, July 10-12.
- **Yıldırım, M. & Özhan, H.B.** (2024). Influence of Basalt Fiber and Mineral Admixtures on Acid Resistance of Mortars Subjected to Elevated Temperatures, *16th International İstanbul Scientific Research Congress on Life, Engineering, Architecture, and Mathematical Sciences Proceedings*, (pp.208-215), İstanbul: Türkiye, February 28-29.