

**T.C.
MANİSA CELAL BAYAR ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
YAPI MALZEMESİ BİLİM DALI**

**ÜÇ BOYUTLU BASKI TEKNOLOJİSİ İLE ÇEVRE DOSTU
BETONLARIN ARAŞTIRILMASI VE GELİŞTİRİLMESİ**

Harun İSFENDİYAROĞLU

**Danışman
Prof. Dr. Ali Uğur ÖZTÜRK**



MANİSA-2024

TAAHHÜTNAME

Ben, **Harun İsfendiyaroğlu**, başlığı **Üç Boyutlu Baskı Teknolojisi ile Çevre Dostu Betonların Araştırılması ve Geliştirilmesi** olan bu tezin Manisa Celal Bayar Üniversitesi Mühendislik /Fen-Edebiyat Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'nde, akademik ve etik kurallara uygun olarak yazıldığını ve kullanılan tüm literatür bilgilerinin referans gösterilerek tezde yer aldığını beyan ederim.



İÇİNDEKİLER

Sayfa

TAAHHÜTNAME.....	i
İÇİNDEKİLER	ii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	iv
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	v
TABLO DİZİNİ	xi
TEŞEKKÜR.....	xii
ÖZET Yüksek Lisans Tezi Harun İsfendiyoğlu	xiii
ABSTRACT.....	xv
1. GİRİŞ	1
2. GENEL BİLGİLER	4
2.1 Beton ve İmalatı ile İlgili Genel Bilgi.....	4
2.2 Üç Boyutlu Yazıcı Yöntemi.....	11
2.2.1 Üç Boyutlu Yazıcı ile Beton İmalatı.....	14
2.2 Beton İmalatında Atık Kullanımı	26
3. MATERYAL VE YÖNTEMLER.....	31
3.1 Materyal.....	31
3.1.1 Çimento.....	31
3.1.2 Agrega.....	31
3.1.3 Polipropilen Lif.....	34
3.1.4 Kauçuk Lastik Atığı.....	35
3.1.5 Kimyasal Katkı	37
3.1.6 Su	37
3.2 Yöntemler	38
3.2.1 Basınç Dayanım Testi.....	41
3.2.2 Asit Deneyi	44
3.2.3 Sülfat Deneyi	45
3.2.4 Su Emme Deneyi	46
3.2.5 Donma-Çözünme Deneyi	46
3.2.6 SEM-EDX.....	48

4. ARAŞTIRMA BULGULARI	52
5. SONUÇ VE ÖNERİLER	58
KAYNAKLAR	60
EKLER.....	65



SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

ÖTL	Ömrünü Tamamlamış Lastik
FDM	Eriyik Yığıma Modellemesi
ITZ	Arayüzey Geçiş Bölgesi
3B/3D	Üç Boyutlu/Three Dimensional
3DPC	Üç Boyutlu Baskı Beton/Three Dimensional Printed Concrete
FRP	Fiber Takviyeli Polimer/Fiber Reinforced Polymer
ABS	Akrilonitril Bütadien stiren
PLA	Polilaktik asit
PCL	Polikaprolakton
Kg	Kilogram
Mm	Milimetre
N	Newton
kN	Kilonewton
m	Metre
cm	Santimetre
µm	Micrometre
ASTM	American Society for Testing and Materials
EN	European Norms
TS	Türk Standartı
G	Gram
kPa	Kilopascal
dk	Dakika
s	Saniye

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 2.1	Farklı Şekiller ile İmal Edilen Beton Baskılar	16
Şekil 2.2, 2.3	Üç Boyutlu Baskı Cihazı ve Üretilen Beton Kiriş	17
Şekil 2.4	4 Filament Arası Boşluk	23
Şekil 2.5	3B Yazıcı ile İmalatta Donatı Uygulama Örneği	25
Şekil 3.1	Taş Unu-Filler Malzeme Örnek Resim	32
Şekil 3.2	Taş Unu-Filler Malzeme XRD Raporu	32
Şekil 3.3	Filler-Taş Unu ve Kum Granülmetri Eğrileri	33
Şekil 3.4	Polipropilen Lifler	34
Şekil 3.5	Çalışmada Kullanılan Lastik Atığı Örneği (0.05-0.1 mm)	35
Şekil 3.6	Çalışmada Kullanılan Lastik Atığı Örneği (1-1.5 mm)	35
Şekil 3.7	Farklı Boyutlarda İşlenmiş Örnek Kauçuk Lastik Atık Numuneleri	36
Şekil 3.8	İlgili Beton Harcının Hazne Mikserinde Karıştırılma İşlemi	37
Şekil 3.9	Çalışmada Kullanılan 3B Beton Yazıcısı	38
Şekil 3.10	İmalatı Tamamlanan Uzun Kirişin Boyut Ölçümü	39
Şekil 3.11	İlgili Numunelerin Basınç Dayanım Testi Cihazı	40
Şekil 3.12	İlgili Numunelerin Basınç Dayanım Testi İşlemi	40
Şekil 3.13	İlgili Numunelere Uygulanan Basınç Kuvvetinin Yönleri	41
Şekil 3.14	3B Yazıcı ile Beton Basım İşlemi	41
Şekil 3.15	3B Yazıcı ile İmal Edilen Beton Kiriş Numune (60x15x15 cm)	42
Şekil 3.16	Kesim İşlemi Sonrası İmal Edilen Bazı Numuneler (10x10x10 cm)	42
Şekil 3.17	Asite Maruz Kalmış Numunenin İşlem Sonrası Ağırlık Ölçümü	43
Şekil 3.18	Kullanılan Magnezyum Sülfatın Tartılaması	44
Şekil 3.19	Donma Çözünme Deneyi için Kullanılan İklimlendirme Kabini	45
Şekil 3.20	İklimlendirme Kabini ve İçeri Numunelerin Yerleştirilmesi	45
Şekil 3.21 ve Şekil 3.22	Sülfat ve Asit Deneyleri Sonucu Kırık Örnek Alınan Numuneler	46
Şekil 3.23	SEM-EDX Analizi için Hazırlanan Kırık Yüzey Numune	47

Şekil 3.24 SEM-EDX Analizi için Kırık Yüzey Numune Hazırlanması	47
Şekil 3.25 SEM-EDX Analiz Cihazına İlgili Numunelerin Yerleştirilmesi	48
Şekil 3.26 SEM-EDX Öncesi İlgili Numunelerin Vakumlanması ve Kaplanması. 48	
Şekil 3.27 SEM Analizi Sonucu Elde Edilen Örnek SEM Görüntüsü	49
Şekil 3.28 Referans Numunesi Örnek SEM-EDX Analizi Sonucu	49
Şekil 3.29, Şekil 3.30 İlgili Numunelerin Örnek Micro-CT Tarama Görüntüleri...	50
Şekil 4.1 Asit Deneyi Numuneleri Yüzdece Basınç Dayanım Kayıpları	51
Şekil 4.2 Sülfat Deneyi Numuneleri Yüzdece Basınç Dayanım Kayıpları	52
Şekil 4.3 Asit Deneyi Sonrası Yüzdece Ağırlık Artışı	53
Şekil 4.4 Sülfat Deneyi Sonrası Yüzdece Ağırlık Artışı	53
Şekil 4.5 Su Emme Deneyi Sonrası Yüzdece Ağırlık Artışı	54
Şekil 4.6 Donma-Çözünme Numuneleri Yüzdece Basınç Dayanımı Kayıplar.....	55
Şekil 4.7(a) ve Şekil 4.8(b) L-10 ve Referans Numuneleri Asit Deneyi Sonrası SEM Görüntüleri- 100X/20kV	55
Şekil 4.9(a) ve Şekil 4.10(b) L-10 ve Referans Numunelerin Sülfat Deneyi Sonrası SEM Görüntüleri- 100X/15kV	56
Şekil 4.11 L-10 Numunesi Micro-CT Analiz Görüntüsü	57
Şekil 4.12 Referans Numunesi Micro-CT Analiz Görüntüsü	57
Şekil E.1, Şekil E.2 İSTON A.Ş 3B Yazıcı ile Üretilmiş Bazı Ürünler.....	64
Şekil E.3, Şekil E.4 İSTON A.Ş 3B Yazıcı ile Üretilmiş Bazı Ürünler.....	64
Şekil E.5, Şekil E.6 SEM Analizi Esnasında Alınan Görüntüler.....	64
Şekil E.7 SEM Analizi Esnasında Alınan Görüntü.....	65
Şekil E.8 Asit ve Sülfat Öncesi L-10 Numunesi SEM Analizi Görüntüsü 500X/20kV.....	65
Şekil E.9 Asit ve Sülfat Öncesi L-10 Numunesi SEM Analizi Görüntüsü 1000X/20kV.....	65
Şekil E.10 Asit ve Sülfat Öncesi L-10 Numunesi SEM Analizi Görüntüsü 2000X/20kV.....	65
Şekil E.11 Asit ve Sülfat Öncesi L-10 Numunesi SEM Analizi Görüntüsü 5000X/20kV.....	65

Şekil E.12 Asit ve Sülfat Öncesi L-10 Numunesi SEM Analizi Görüntüsü 500X/20kV.....	65
Şekil E.13 Asit ve Sülfat Öncesi L-10 Numunesi SEM Analizi Görüntüsü 500X/20kV.....	66
Şekil E.14 Asit ve Sülfat Öncesi L-10 Numunesi SEM Analizi Görüntüsü 2000X/20kV.....	66
Şekil E.15 Asit ve Sülfat Öncesi L-10 Numunesi SEM Analizi Görüntüsü 1000X/20kV	66
Şekil E.16 Asit ve Sülfat Öncesi L-10 Numunesi SEM Analizi Görüntüsü 500X/20kV.....	66
Şekil E.17 Asit ve Sülfat Öncesi L-10 Numunesi SEM Analizi Görüntüsü 305X/20kV.....	66
Şekil E.18 Asit ve Sülfat Öncesi Referans Numunesi SEM Analizi Görüntüsü 100X/20kV.....	66
Şekil E.19 Asit ve Sülfat Öncesi Referans Numunesi SEM Analizi Görüntüsü 100X/20kV.....	67
Şekil E.20 Asit ve Sülfat Öncesi Referans Numunesi SEM Analizi Görüntüsü 5000X/20kV.....	67
Şekil E.21 Asit ve Sülfat Öncesi Referans Numunesi SEM Analizi Görüntüsü 3000X/20kV.....	67
Şekil E.22 Asit ve Sülfat Öncesi Referans Numunesi SEM Analizi Görüntüsü 2000X/20kV.....	67
Şekil E.23 Asit ve Sülfat Öncesi Referans Numunesi SEM Analizi Görüntüsü 1000X/20kV.....	67
Şekil E.24 Asit Sonrası L-10 Numunesi SEM Analizi Görüntüsü 439X/20kV.....	67
Şekil E.25 Asit Sonrası L-10 Numunesi SEM Analizi Görüntüsü 100X/20kV.... ..	68
Şekil E.26 Asit Sonrası L-10 Numunesi SEM Analizi Görüntüsü 93X/20kV.....	68
Şekil E.27 Asit Sonrası L-10 Numunesi SEM Analizi Görüntüsü 100X/20kV.....	68
Şekil E.28 Asit Sonrası L-10 Numunesi SEM Analizi Görüntüsü 100X/20kV.....	68
Şekil E.29 Asit Sonrası L-10 Numunesi SEM Analizi Görüntüsü 100X/20kV.....	68
Şekil E.30 Asit Sonrası L-10 Numunesi SEM Analizi Görüntüsü 100X/20kV.....	69

Şekil E.31 Asit Sonrası L-10 Numunesi SEM Analizi Görüntüsü 100X/20kV.....	69
Şekil E.32 Asit Sonrası L-10 Numunesi SEM Analizi Görüntüsü 100X/20kV.....	69
Şekil E.33 Asit Sonrası L-10 Numunesi SEM Analizi Görüntüsü 500X/20kV.....	69
Şekil E.34 Asit Sonrası L-10 Numunesi SEM Analizi Görüntüsü 500X/20kV.....	69
Şekil E.35 Asit Sonrası L-10 Numunesi SEM Analizi Görüntüsü 300X/20kV.....	69
Şekil E.36 Asit Sonrası L-10 Numunesi SEM Analizi Görüntüsü 500X/20kV.....	70
Şekil E.37 Asit Sonrası Referans Numunesi SEM Analizi Görüntüsü 500X/20kV.	70
Şekil E.38 Asit Sonrası Referans Numunesi SEM Analizi Görüntüsü 100X/20kV.	70
Şekil E.39 Asit Sonrası Referans Numunesi SEM Analizi Görüntüsü 100X/20kV.	70
Şekil E.40 Asit Sonrası Referans Numunesi SEM Analizi Görüntüsü 100X/20kV.	70
Şekil E.41 Asit Sonrası Referans Numunesi SEM Analizi Görüntüsü 100X/20kV.	70
Şekil E.42 Asit Sonrası Referans Numunesi SEM Analizi Görüntüsü 100X/20kV.	71
Şekil E.43 Asit Sonrası Referans Numunesi SEM Analizi Görüntüsü 100X/20kV.	71
Şekil E.44 Asit Sonrası Referans Numunesi SEM Analizi Görüntüsü 100X/20kV.	71
Şekil E.45 Asit Sonrası Referans Numunesi SEM Analizi Görüntüsü 100X/20kV.	71
Şekil E.46 Asit Sonrası Referans Numunesi SEM Analizi Görüntüsü 100X/20kV.	71
Şekil E.47 Asit Sonrası Referans Numunesi SEM Analizi Görüntüsü 100X/20kV.	71
Şekil E.48 Asit Sonrası Referans Numunesi SEM Analizi Görüntüsü	

100X/20kV.	72
Şekil E.49 Asit Sonrası Referans Numunesi SEM Analizi Görüntüsü 100X/20kV.	72
Şekil E.50 Asit Sonrası Referans Numunesi SEM Analizi Görüntüsü 500X/20kV.	72
Şekil E.51 Asit Sonrası Referans Numunesi SEM Analizi Görüntüsü 500X/20kV.	72
Şekil E.52 Asit Sonrası Referans Numunesi SEM Analizi Görüntüsü 500X/20kV.	72
Şekil E.53 Asit Sonrası Referans Numunesi SEM Analizi Görüntüsü 500X/20kV.	72
Şekil E.54 Asit Sonrası Referans Numunesi SEM Analizi Görüntüsü 1000X/kV... ..	73
Şekil E.55 Asit Sonrası Referans Numunesi SEM Analizi Görüntüsü 500X/20kV.	73
Şekil E.56 Asit Sonrası Referans Numunesi SEM Analizi Görüntüsü 300X/20kV.	73
Şekil E.57 Sülfat Sonrası L-10 Numunesi SEM Analizi Görüntüsü 100X/15kV.....	73
Şekil E.58 Sülfat Sonrası L-10 Numunesi SEM Analizi Görüntüsü 500X/15kV.....	73
Şekil E.59 Sülfat Sonrası L-10 Numunesi SEM Analizi Görüntüsü 1000X/15kV.....	73
Şekil E.60 Sülfat Sonrası L-10 Numunesi SEM Analizi Görüntüsü 500X/15kV.....	73
Şekil E.61 Sülfat Sonrası L-10 Numunesi SEM Analizi Görüntüsü 10000X/15kV.....	74
Şekil E.62 Sülfat Sonrası L-10 Numunesi SEM Analizi Görüntüsü 10000X/10kV	74
Şekil E.63 Sülfat Sonrası L-10 Numunesi SEM Analizi Görüntüsü 5000X/10kV...74	
Şekil E.64 Sülfat Sonrası L-10 Numunesi SEM Analizi Görüntüsü 2000X/15kV...74	

Şekil E.65 Sülfat Sonrası L-10 Numunesi SEM Analizi Görüntüsü 1000X/15kV...	74
Şekil E.66 Sülfat Sonrası L-10 Numunesi SEM Analizi Görüntüsü 500X/15kV....	74
Şekil E.67 Sülfat Sonrası L-10 Numunesi SEM Analizi Görüntüsü 100X/15kV....	75
Şekil E.68 Sülfat Sonrası Referans Numunesi SEM Analizi Görüntüsü 500X/15kV.....	75
Şekil E.69 Sülfat Sonrası Referans Numunesi SEM Analizi Görüntüsü 100X/15kV.....	75
Şekil E.70 Sülfat Sonrası Referans Numunesi SEM Analizi Görüntüsü 100X/15kV.....	75
Şekil E.71 Sülfat Sonrası Referans Numunesi SEM Analizi Görüntüsü 100X/15kV.....	75
Şekil E.72 Sülfat Sonrası Referans Numunesi SEM Analizi Görüntüsü 100X/15kV.....	75
Şekil E.73 Sülfat Sonrası Referans Numunesi SEM Analizi Görüntüsü 100X/15kV.....	76
Şekil E.73 Sülfat Sonrası Referans Numunesi SEM Analizi Görüntüsü 100X/15kV.....	76
Şekil E.74 Sülfat Sonrası Referans Numunesi SEM Analizi Görüntüsü 101X/15kV.....	76
Şekil E.75 Sülfat Sonrası Referans Numunesi SEM Analizi Görüntüsü 100X/15kV.....	76
Şekil E.76 Sülfat Sonrası Referans Numunesi SEM Analizi Görüntüsü 500X/15kV.....	76
Şekil E.77 Sülfat Sonrası Referans Numunesi SEM Analizi Görüntüsü 500X/15kV.....	76

TABLO DİZİNİ

Sayfa

Tablo 3.1 Portland Çimentosunun Fiziksel ve Mekanik Özellikleri.....	31
Tablo 3.2 Portland Çimentosunun Kimyasal Özellikleri.....	31
Tablo 3.3 Taş Unu-Filler Malzeme Tane Boyutu Dağılım Tablosu	32
Tablo 3.4 Kumun Elek Analizi	33
Tablo 3.5 Polipropilen Lifin Fiziksel ve Mekanik Özellikleri.....	34
Tablo 3.6 Üretilen Betonların Karışım Miktarları	37
Tablo 3.7 Yapılan Deneyler ve Standartlar	38
Tablo 4.1 Asit Deneyi Numuneleri Basınç Dayanım Değerleri	51
Tablo 4.2 Sülfat Deneyi Numuneleri Basınç Dayanım Değerleri	52
Tablo 4.3 Donma-Çözünme Numuneleri Basınç Dayanım Değerleri	54

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimimin başından sonuna kadar her zaman yanımda olan, bilgi ve birikimleri ile beni yönlendiren, farklı fikirler öne sürdüğüm zaman destek olan değerli danışmanım Prof. Dr. Ali Uğur ÖZTÜRK'e, laboratuvarında yapmış olduğum çalışmalarda yardımlarını esirgemeyen ve bana destek olan Arş. Gör. Dilan ÇANKAL'a, bu süreçte ne kadar yoğun olursa olsun destek olup bu çalışmayı mümkün kılan ve bana yardım eli uzatan İSTON A.Ş' ye ve özellikle Ar-Ge Şefi Sayın Serhat ZEYTUN'a, Manisa Celal Bayar Üniversitesi'ne Bilimsel Araştırma Proje desteği ile çalışmaya katkılarından dolayı, gerek ilgisi ve gerek desteği için başta Sayın Mahmut Yıldız olmak üzere Orbay Kauçuk'a ve Yıldız Endüstri ekibine, Ege Demir ve Demir Geri Dönüşüm ekibi ve Sayın Asım Yurtvermez'e yardımları ve desteği için ayrıca son olarak tüm hayatım boyunca bana en büyük desteği sunan ve beni ayakta tutan çok değerli aileme sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Harun İSFENDİYAROĞLU

MANİSA,2024

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

Harun İsfendiyaroğlu

Manisa Celal Bayar Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman:

Prof. Dr. Ali Uğur Öztürk

Üç Boyutlu Baskı Teknolojisi ile Çevre Dostu Betonların Araştırılması ve Geliştirilmesi

Günümüzde, geri dönüşüm konusunda farkındalık yaratmak ve bu durumların çözümüne katkı sağlamak adına, çeşitli atık ve yan ürünlerin (yüksek fırın cürufu, taş unu, kauçuk lastik atığı vb.) betonda kullanımı araştırılmaktadır. Atık malzemeler ve yan ürünlerin; depolanma, bertaraf, maliyet, çevre kirliliği vb. sorunlarına çözüm olması adına, yeni nesil çevre dostu malzemeler geliştirilmesi mümkündür. Atık malzemelerin değerlendirilebileceği yeni alanlar ve yöntemler oluşturmak bilim dünyasının önemli araştırma alanlarından biri haline gelmiştir. Atık malzemeler çeşitli yöntemler kullanılarak geri kazandırılmaya çalışılmaktadır. Doğal kaynakların sınırlı olması, geri dönüşüm uygulamalarının özellikle inşaat sektöründe potansiyel bir hammadde kaynağı olarak kullanılması alternatifini ortaya çıkarmıştır. Betonda atık kullanımının; su yalıtımı, aşınma dayanımı, asit dayanımı gibi durabilite özelliklerini geliştirdiği görülmüştür. Dolayısıyla betonda atık kullanımı geri dönüşüme katkının yanında betonun bazı durabilite özelliklerinin de geliştirilmesi açısından oldukça faydalıdır.

Diğer bir yandan, inşaat sektörünün gelişmesi için sadece malzeme bilimi açısından sınırlı olmadan, son zamanlarda geleneksel inşaatın yerini alan Üç Boyutlu (3B) Baskı yöntemiyle metot olarak da gelişmelerin gerçekleştirilmesi ele alınmıştır. Bu üretim süreci, daha az insan müdahalesi ve minimum malzeme israfı ile makul üretim süresinde önemli avantajlar sağlamaktadır. Türkiye’de bu yöntemin uygulanmasını

arttırmak, avantajlarından faydalanmak ve geleneksel inşaatın seviye atlaması adına bu konudaki araştırmaların artırılması oldukça faydalı bir yaklaşım olmuştur.

Bu çalışmada CEM-I 42,5 R Portland çimentosu kullanılan beton numuneler 2 farklı tür olarak; biri kauçuk kauçuk lastik atığıyla ve diğeri kauçuk lastik atıksız olmak üzere imal edilmiştir. Beton numuneler standart yöntemden ziyade 3B baskı yöntemiyle üretilmiştir. İmal edilen numunelerin çeşitli durabilite özelliklerinin incelenmesi için farklı testler ve metotlar uygulanmıştır. Asit-sülfat dirençlerinin incelenmesi için asit ve sülfat ortamlarına 30 gün boyunca maruz bırakılmış, su emme miktarının incelenmesi için 28 gün boyunca suda bekletilmiş, donma-çözünme dayanımının incelenmesi için 50 gün süresince iklimlendirme kabini içinde bekletilmiş ve bu testlerin ardından ilgili numunelerin 28 günlük basınç dayanımları karşılaştırılmıştır. Ardından elde edilen betonlardan daha ufak parçalar kullanılarak Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) analizi uygulanmıştır.

Son olarak ilgili numunelerin SEM (taramalı elektron mikroskobu) analizi ile mikro yapıları incelenmiştir. Bütün bu analizler sonucu 3B baskı yöntemi ile üretilen betonun (3DPC) kauçuk lastik atığı ilavesinde boşluk yapısındaki değişim, ilgili durabilite özellikleri ve mikro yapısı araştırılması hedeflenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Sürdürülebilirlik, geri dönüşüm, atık yönetimi, 3B beton, durabilite, kauçuk kauçuk lastik atığı, mikroyapı

ABSTRACT

M.Sc. Thesis

Harun İsfendiyaroğlu

**Manisa Celal Bayar University
Graduate School of Applied and Natural Sciences
Department of Civil Engineering**

**Supervisor:
Prof. Dr. Ali Uğur Öztürk**

The Research and Development of Eco-Friendly Concrete via Three-Dimensional Printer Technology

Nowadays, in order to raise awareness about recycling and contribute to the solution of these cases, the use of various waste and by-products (blast furnace slag, tire rubber waste, stone powder etc.) in concrete is being investigated. It is possible to develop new generation environmentally friendly materials, in order to solve the problems of waste materials and by-products such as; storage, disposal, expenses and environmental pollution etc. Creating new areas and methods in which waste materials can be evaluated has become one of the important research areas of the scientific world. Waste materials are tried to be recycled using various methods. The limited natural resources have revealed the alternative of using recycling applications as a potential raw material source, especially in the construction sector. Use of waste in concrete; It has been observed that it improves durability properties such as water repellency, impact resistance and acid resistance. Therefore, in addition to contributing to recycling, some durability properties of concrete are expected to be improved.

On the other hand, for the development of the construction industry, not only in terms of material science, but also the realization of developments as a method with the three-dimensional (3D) printing method, which has recently replaced traditional construction, will be discussed. This manufacturing process provides significant advantages in reasonable construction time with less human intervention and minimal material wastage. Increasing the application of this method in Turkey, taking it's advantages and increasing the researches on this subject in order to raise the level of traditional construction is a beneficial approach for this subject.

In this study, concrete specimens containing CEM-I 42.5 R Portland cement were produced in two different variations: one incorporating recycled rubber tire waste and the other without any rubber tire waste. These concrete specimens were manufactured using a 3B printing method rather than the standard procedure. Various tests and methods were employed to investigate the diverse durability properties of the manufactured specimens. For the examination of resistance to acid-sulfate exposure, the specimens were exposed to two different chemical environments (acid and sulphate) for 30 days. The water absorption rate was evaluated by immersing the specimens in water for 28 days. Freezing-thawing resistance was assessed by subjecting the specimens to climatic conditions in a chamber for 50 days. Subsequently, the 28-day compressive strengths of the relevant specimens were compared. To investigate the microstructure Scanning Electron Microscopy (SEM) analysis was conducted. Subsequently, smaller portions of the obtained concrete were used for Scanning Electron Microscopy (SEM) analysis.

Lastly, SEM analysis was employed to examine the microstructures of the specimens. As a result of all these analyses aimed to investigate the changes in the pore structure, relevant durability properties and microstructure of the 3B printed concrete (3DPC) with the addition of rubber tire waste.

Key Words: Sustainability, recycle, waste management, 3D concrete, durability, rubber tire waste, microstructure

1. GİRİŞ

3B baskı herhangi bir alet, kalıp ve sabitleme olmadan bir üç boyutlu bilgisayar destekli tasarım modelinden otomatik olarak karmaşık şekil geometrileri üretebilen gelişmiş bir üretim sürecidir. Bu otomatikleştirilmiş üretim süreci, daha az insan müdahalesi ve minimum malzeme israfı ile makul inşa süresinde önemli avantajlarından dolayı günümüzde birçok farklı endüstri alanına uygulanmaktadır uygulanmaktadır (Tay vd., 2017). Özellikle inşaat sektöründe 3B uygulamaları; geleneksel yöntemlere göre geometrik tasarım esnekliği, kalıp ve kalıpsız imalatla daha fazla güvenlik, inşaat süresinde, işçilikte, maliyette ve atık oluşumunda azalmalar sağlaması gibi önemli faydaları olduğundan dolayı inşaat sektöründe önemli ilgi görmüştür (Buswell vd., 2018; Wu vd., 2016).

Bu teknolojinin çevreye yönelik daha yeni bir uygulaması, insan kaynakları, yüksek sermaye yatırımları ve ek kalıplara olan ihtiyacı azaltırken geleneksel bina stratejilerimizi iyileştirdiği görünmektedir. 3B baskı ve eklemeli imalatın biyomedikal, havacılık ve otomotiv gibi alanlarında yaygın olarak kullanılmasına rağmen, inşaat sektöründeki gelişimi henüz başlangıç aşamasındadır (Kristombu Baduge vd., 2021).

Diğer yandan yeni malzemelerin üretilmesi ve atık malzemelerin yeni nesil yapı malzemeleri olarak kullanılmasının önemi son yıllarda artmıştır. Artan nüfusla birlikte tüketimin de artması sonucunda oluşan katı atıklar, teknik ve sağlık yönüyle koşullara uygun bir şekilde bertaraf edilmedikleri zaman hava, su ve toprak kirliliğine neden olmaktadır. Bu nedenlerden dolayı katı atıkların çevreye en az zarar verecek şekilde bertarafını sağlayacak yöntemlerin kullanılması gerekmektedir (Karagözo vd., 2009). Atıklarla beraber her yıl büyük miktarlarda endüstriyel yan ürünler üretilmektedir ve oluşan ürünlerin büyük bir kısmı depolanmaktadır (Yılmaz & Degirmenci, 2009). Bu yan ürünlerin önemli bir bölümü katı atık olarak düzenli depolamaya devam etmektedir. Buna örnek olarak yüksek fırın cürufu ele alınabilir. Cüruf, metallerin veya elementlerin ergitme fırınlarında işlenmesi sonucu ergiyik üründen yoğunluk farkı ile ayrılan veya kömür/katı atıkları yakıt olarak kullanan tesislerde ortaya çıkan oksit, silikat veya boratlardan oluşan bir yan üründür (Ünal, 2017).

Atık malzemelerin değerlendirilebileceği yeni alanlar ve yöntemler oluşturmak bilim dünyasının önemli araştırma alanların

dan biri haline gelmiştir. Atık maddeler çeşitli yöntemler kullanılarak geri kazandırılmaya çalışılmaktadır. Doğal kaynakların sınırlı olması, geri dönüşüm uygulamalarının özellikle inşaat sektöründe potansiyel bir hammadde kaynağı olarak kullanılması alternatifini ortaya çıkarmıştır (DEMİREL & ÖZ, 2017). Örnek olarak, dünya çapında otomobil sayısındaki büyük artışı nedeniyle, yüksek hacimli hurda lastikler büyük bir atık yönetimi sorunu haline geldiği bilinmektedir (Najim & Hall, 2010;Topçu & Unverdi, 2018). Atık lastikler genellikle yakılarak bertaraf edilmektedir. Bu yöntem kolay ve ucuz olmasına rağmen atık lastiklerin yakılması çevre kirliliği açısından önemli bir sorun oluşturmaktadır. Taşıtların (özellikle otomobillerin) kullanımının artması sonucunda lastik kullanımının ve dolayısıyla ömrünü tamamlamış lastiklerin miktarının artmasıyla bu sorun daha çok dikkat çekmektedir. Doğal kaynakların tüketimini en aza indirmek için öğütülmüş lastik, beton malzemelerde kumun, dolgu olarak kısmen değiştirilmesi için potansiyel bir malzeme olarak kabul edilebilir. Özellikle yol ve köprü gibi darbe ve titreşime maruz kalan yapılar için uygulanabilir (Senin vd., 2016).

Türkiye’de ve dünyada atıkların inşaat sektöründe değerlendirilmesi durumunda, enerji tasarrufu sağlanması, daha ucuz ve kaliteli malzeme üretilmesi, atık malzemenin geri dönüştürülmesiyle ülke ekonomisine katkı sağlanması mümkün görünmektedir (DEMİREL & ÖZ, 2017). Böylece inşaat sektörünün gelişimine, atık geri dönüşümüne ve atık bertaraf etme yöntemlerinin geliştirilmesine katkı sağlanabilmektedir. Atık lastiklerin kullanımına ilişkin önceki çalışmalarda, asfalt kaplama karışımlarında atık lastik kullanımının asfaltın kayma direncini arttırdığı, yorulma çatlamasını azalttığı ve geleneksel asfalt kaplamadan daha uzun ömürlü olduğu gözlemlenmiştir (Al-Akhras & Smadi, 2004). Betona lastik atıklarının katılmasıyla çatlak kontrolünde, basınç dayanımında, eğilme ve çekme dayanımlarında iyileşmelerin olduğu görülmüştür (KÖROĞLU, 2016). Kullanılmış lastiklerin, bütün halden toz hale kadar çeşitli boyutlar için geri kazanılması ve yeniden kullanımı mümkündür (Figueiredo vd., 2020).

Günümüzün doğal kumu, daha zor bulunması nedeniyle kullanımı azalmıştır ve daha maliyetli hale gelmektedir (Gupta vd., 2014). Atık lastiğin, kuma göre ekonomik ve sürdürülebilir bir alternatif olabileceği düşünülmektedir (Senin vd., 2016;Güneyisi vd., 2004). Yapılan başka bir çalışmada ise lastik atıkları, parçalar halinde fırında yakıldıktan sonra elde edilen kauçuk lastik atığı no.100 elekten geçirilip (150µm)

kullanıma hazır hale getirilmiştir. Lastik atıkları betonda ağırlıkça %2,5, %5, %7,5 ve %10 oranlarında kullanılmıştır. Çalışma sonucunda kauçuk lastik atığı kullanımının betonun hava içeriğinin %2,6 oranından %1,5 oranına kadar azalttığı ve eğilme-basınç dayanımlarının da lastik kullanımıyla orantılı bir şekilde arttığı gözlenmiştir (Al-Akhras & Smadi, 2004). İlker B. Topçu ve Aytaç Ünverdi, yaptıkları bir araştırmada kauçuk lastik atığı kullanımının betonun tokluğunu, basınç dayanımını ve darbe direncini olumlu yönde etkilediğini tespit etmişlerdir (Topçu & Ünverdi, 2018). Belirtilen veriler ve konular doğrultusunda, yapı malzemeleri çalışmaları, atık kullanılarak yeni nesil malzeme üretilmesi hem çevre hem de daha iyi performanslı malzeme geliştirilmesi açısından önemlidir.

Bu çalışma kapsamında 3B yazıcı ile üretilen ve içerisinde farklı atıkları barındıran çevre dostu bir beton imal edilmiştir. Çeşitli atıkların kullanımı, atıkların bertaraf edilmelerine yardımcı olacak ve üretim yapan firmaların bu atıkları depolamaları için gereken kaynak harcamalarını (zaman ve maliyet) azaltarak önemli bir miktarda yarar sağlamıştır. Bertarafı mümkün olmayan atıkların yok edilmesine alternatif bir yöntem olması beklenmektedir.

Çeşitli atıkların kullanılmasıyla beraber çevreye ve ekonomiye katkı sağlanmasının yanında, yeni nesil bir uygulama olan 3B ile geleneksel inşaatın ötesinde bir çalışma beklenmektedir. Malzeme özellikleri, ekonomik ve çevresel katkının yanında, uygulama açısından gelişmekte olan 3B baskı yöntemine bir katkı sağlaması beklenmektedir. Sonuç olarak bu çalışma ile inşaat sektörüne çok yönlü katkılar sağlanması hedeflenmektedir. Bu açıdan, 3B baskı yöntemiyle üretilen betonların hem üretim hem de kullanım süreçleri birlikte ele alınmaktadır. Bu araştırmalar ve veriler doğrultusunda tez kapsamında 3B yazıcı ile imal edilebilen ve içerisinde farklı atıkları barındıran çevre dostu bir beton imalatı amaçlanmaktadır.

2. GENEL BİLGİLER

2.1 Beton ve İmalatı ile İlgili Genel Bilgi

Beton inşaat sektöründe en yaygın kullanılan taşıyıcı yapı malzemesidir. Fakat betonun çevre şartlarına uzun yıllar karşı koyabilmesi; üretim kalitesi, dayanım ve durabilitesinin arttırılması ile mümkün olabilir. Betonun dayanıklılığı, yapıların uzun ömürlü olmalarını sağlayan kritik bir özelliktir. Betonun dayanıklılığını düzgün sağlanabilmesi için, mühendislerin çevresel etkileri öngörmesi, olası bozucu etkileri belirlemesi ve bu etkileri minimize etmek için uygun önlemleri belirlemesi gerekmektedir. Bu süreçte, betonun üretim aşamasından başlayarak uygun kalite kontrol önlemlerinin alınması ve sahibi tarafından kalite güvence önlemlerinin uygulanması büyük öneme sahiptir (Mather, 2004).

Beton, yüksek mukavemet özelliğine olduğundan dolayı, dayanıklılığı sayesinde çeşitli çevresel etkilere karşı direnç gösterebilir. Aderans özelliği sayesinde çelik donatı ve benzeri diğer yapı malzemeleri ile tutunarak birlikte optimal bir biçimde çalışırlar. İşlenebilirlik özelliği ile taze beton, istenilen şekilde uygulanabilmesini ve yerleştirilebilmesini sağlar. Yangına karşı dirençlidir, yüksek sıcaklıklara karşı dayanıklıdır. Permabilitesi kontrol edilebilir, su girişini ve kimyasal nüfuzu azaltılabilir. Ses yalıtımı sağlayarak binalarda gürültü iletimini azaltır. Yoğunluğu farklı uygulamalara göre ayarlanabilir, tasarımda esneklik sağlar. Betonun başlıca durabilite özelliklerini ele aldığımızda aşağıdaki gibi sıralanabilir:

- ✓ Basınç Dayanımı: Betonun basınç dayanımı, betonun birim alan başına uygulanan basınca karşı direncini ifade eder.
- ✓ Çekme Dayanımı: Betonun çekme dayanımı, betonun çekme yüklerine karşı direncini ifade eder.
- ✓ Donma-Çözünme Direnci: Beton, donma ve çözünme döngüleri sırasında çatlamayı önleyecek şekilde tasarlanmalıdır.

- ✓ Kimyasal Dayanım: Beton, asitler, sülfatlar, tuzlar gibi kimyasal saldırılara karşı dayanıklı olmalıdır.
- ✓ Aşınma Direnci: Beton, aşındırıcı etkilere karşı direnç göstermeli ve yüzeyinde aşınma olmamalıdır.
- ✓ Korozyon Direnci: Beton içindeki metal donatıya karşı korozyonu önleyici önlemler alınmalıdır.
- ✓ Nanomalzemelerin Kullanımı: Betonun mikroyapısını yoğunlaştırarak geçirgenliği azaltabilir ve kimyasal saldırılara karşı direnci artırabilir. Nanomalzemeler, betonun dayanıklılığını artırmak için gelişmiş özellikler sunar.
- ✓ Uygun Karışımın Belirlenmesi: Uygun oranlarda çimento, agrega, su ve katkı maddeleri kullanarak betonun dayanıklılığını artırabiliriz. Optimal karışım tasarımı, betonun mukavemetini artırabilir ve çevresel etkilere karşı direncini güçlendirebilir.
- ✓ Katkılı Çimento Malzemelerinin Kullanımı: Uçucu kül, cüruf ve silis dumanı gibi katkı malzemeler betonun gözenek yapısını iyileştirerek dayanıklılığını artırabilir. Katkılı çimento malzemeleri, betonun kimyasal saldırılara karşı direncini artırabilir ve su geçirgenliğini azaltabilir. Bu durum betonun durabilite özelliklerini geliştirecektir.
- ✓ Uygun Kürleme Uygulaması: Betonun optimal hidrasyonunu sağlamak için uygun kür yöntemlerinin kullanılması gerekmektedir. Doğru kürleme uygulaması, betonun mukavemetini ve dayanıklılığını artırır.

- ✓ Çatlakların Kontrolü: Fiber malzemeler, mikro donatı niteliğinde lif uygulamaları veya sonradan gerdirme gibi yöntemler vasıtasıyla çatlak kontrolünü sağlayarak betonun dayanıklılığı geliştirilebilir. Çatlakların kontrol altında tutulması, betonun su girişini azaltabilir ve donatının korozyonunu önleyebilir.
- ✓ Yüzeye Yönelik Uygulamalar: Yüzey kaplamaları, sızdırmazlık malzemeleri veya su yalıtım membranları gibi yüzey işlemleri betonu nemden, kimyasal saldırılardan ve aşınmadan koruyabilir. Doğru yüzey işlemleri, betonun dayanıklılığını artırabilir ve ömrünü uzatabilir.
- ✓ Kalite Kontrolü ve Bakım: İnşaat sırasında düzenli kalite kontrol kontrolleri ve periyodik bakım, beton yapıların dayanıklılığını artırabilir ve sorunları erken tespit edebilir. Kaliteli kontrol ve düzenli bakım, beton yapıların uzun ömürlü olmasını sağlayabilir ve dayanıklılığını artırabilir (Adesina, 2019).

Beton kürü, betonun yüzeyindeki suyun buharlaşmasını önlemek için su veya özel kimyasallar içeren bir malzeme ile kaplanması veya beton yüzeyine su püskürtülmesi gibi yöntemlerle gerçekleştirilebilir. Beton kürü, betonun sertleşme sürecindeki suyun kaybını önleyerek, betonun daha iyi mukavemet ve dayanıklılık kazanmasını sağlar. Buhar ile beton kürü, betonun sertleşme sürecindeki nem kaybını önlemek için uygulanan bir yöntemdir. Bu yöntemde, beton yüzeyine buhar püskürtülür veya beton, özel bir buhar odasında kür işlemine tabi tutulur. Bu yöntem, betonun priz alma sürecini hızlandırır ve daha yüksek mukavemet kazanmasını sağlar. Ayrıca, betonun yüzeyindeki çatlakların oluşmasını önler ve betonun daha homojen bir yapıya sahip olmasını sağlar. Ancak, buhar ile beton kürü yönteminin bazı dezavantajları da vardır. Öncelikle, bu yöntem, yüksek maliyetlidir ve buhar odalarının kurulumu ve işletilmesi duruma göre mümkün olmayabilir (Liu vd., 2005).

2022 yılında, 3B yazıcı teknolojisi kullanılarak üretilen betonların mekanik performansının, kürü koşullarına nasıl bir şekilde bağlı olduğu incelenmiştir. Araştırma, katı atıklar içeren basılı betonun mekanik performansı üzerinde farklı buhar

kürü koşullarının etkisini araştırmıştır. Optimum buhar kürü koşullarının, 3B yazıcı teknolojisi kullanılarak üretilen çimento bazlı kompozitlerin ara tabaka bağlanmasını (interlayer bonding) iyileştirdiği öne sürülmüştür. Ayrıca, araştırma, buhar kürü koşullarının ile katı atık katkısının, basılı kompozitlerin mekanik özelliklerini, anizotropiyi ve ara tabaka bağlanma davranışlarını iyileştirdiğini göstermiştir. Bu nedenle, buhar kürü, 3B yazıcı teknolojisi kullanılarak üretilen betonlar için daha uygun bir kürlenme yöntemi olduğu öne sürülmüştür (Wang vd., 2022).

Beton, çimento, agrega, su ve katkı maddelerinin belirli oranlarda karıştırılmasıyla elde edilen ve inşaat sektöründe yaygın olarak kullanılan dayanıklı ve mukavemetli bir yapı malzemesidir. Betonun dayanıklılığı ve mukavemeti, içerdiği malzemelerin kalitesine, karışım oranlarına ve üretim sürecine bağlı olarak değişmektedir. Ayrıca betonun çeşitli testlerle karakterize edilmesi ve standartlara uygunluğunun sağlanması önemlidir. Sonuç olarak, betonun özellikleri ve çimento üretiminde kullanılan malzemeler arasındaki ilişkiler karmaşıktır ve dikkatle incelenmelidir. Malzeme seçimi, karışım oranları, üretim süreci, betonun kalitesi ve performansı üzerinde belirleyici bir rol oynamaktadır. Bu nedenle, beton endüstrisinde çalışanlar ve araştırmacılar için bu tür bilgilerin derlenmesi ve analiz edilmesi önemlidir. Betonun kalitesini belirlemek için çeşitli testler yapılır ve bu testler belirli standartlara göre gerçekleştirilir. Beton testlerinde genellikle basınç dayanımı, çekme dayanımı ve eğilme dayanımı gibi parametreler ölçülür. Betonun dayanıklılığını ve uzun vadeli performansını değerlendirmek için farklı yaşlarda dayanım testleri yapılır. Belirli standartlara uygunluğu, karışım oranları, agrega kalitesi ve üretim süreci gibi faktörlere bağlıdır (Neville, 1995).

Her imalatda olduğu gibi beton üretiminde de dikkat edilmesi hususlar bulunmaktadır. Bu durumda kullanılan malzemelerin kalitesi beton için büyük önem taşımaktadır. Çünkü, betonun dayanıklılığı ve mukavemeti, kullanılan çimento, agrega, su ve katkı maddelerinin kalitesine bağlıdır. Dolayısıyla, yüksek kaliteli malzemelerin seçilmesi gerekmektedir. Karışım oranları doğru şekilde belirlenmelidir. Betonun istenilen dayanıklılığı ve özellikleri elde edebilmesi için karışım oranları titizlikle belirlenmeli ve uygulanmalıdır. Su-çimento oranı betonun işlenebilirliği, dayanıklılığı ve çatlama direnci üzerinde büyük etkiye sahiptir. Doğru su-çimento oranının sağlanması betonun kalitesi için kritik öneme sahiptir. Karıştırma süresi ve yöntemi beton karışımının homojen olması ve malzemelerin tam olarak birbirine

entegre olması için uygun karıştırma süresi ve yöntemi seçilmelidir. Uygulama koşulları betonun dökümü ve yerleştirilmesi sırasında uygun sıcaklık, nem ve diğer çevresel koşulların sağlanması gerekmektedir. Aksi takdirde betonun kalitesi olumsuz etkilenebilir. Sertleşme ve bakım sürecinde uygun bakımın yapılması, çatlama ve dayanıklılık sorunlarını önlemek için önemlidir. Sertleşme sürecinde beton yeterince nemli tutulmalıdır. Kalite kontrol beton üretim sürecinde kalite kontrol adımlarının titizlikle uygulanması, betonun standartlara uygunluğunu ve istenilen özellikleri taşıdığını sağlar. Yukarıda belirtilen unsurlara dikkat edilerek beton üretimi sırasında kaliteli, dayanıklı ve uzun ömürlü yapılar elde edilebilir. Betonun dayanıklılığı, donma-çözünme etkilerine karşı direnç göstermesinden, kimyasal saldırılara karşı korunaklı olmasına; aşındırıcı etkilere karşı dayanıklı olmasından, gömülü donatıların korozyonunu önlemesine kadar birçok faktöre bağlıdır. Bu nedenle, betonun dayanıklılığını sağlamak için doğru malzeme seçimi, uygun karışım oranları, kaliteli üretim ve düzenli bakım önlemleri büyük önem taşımaktadır. Beton yapıların uzun ömürlü olmalarını sağlamak için, mühendislerin detaylı bir planlama ve sürekli izleme süreciyle betonun dayanıklılığını güvence altına almaları gerekmektedir (Neville, 1995; Mather, 2004).

Betonun durabilite özelliklerini güçlendirmek için uygulamalara örnek olarak lif kullanımı verilebilir. Polipropilen lifler, geleneksel hazır beton güçlendiricilerine göre güçlü alternatiflerden biridir. Sahip olduğu karakteristikleri ile başta maliyet düşürmesi olmak üzere kullanım rahatlığı, hızlı imalat imkanı yaratması, çok uzun ömürlü olması avantajlarını sunmaktadır. 3B beton uygulamalarında da kullanılan polipropilen liflerin eklenmesi yaygın bir uygulamadır. Bu lifler, 3B baskı sürecinde beton karışımının işlenebilirliğini artırabilir, çatlak oluşumunu azaltabilir ve baskı katmanlarının stabilitesini sağlayabilir. Polipropilen lifler, betonun mekanik özelliklerini iyileştirmeye ve baskı sürecinde karışımın şeklini korumasına yardımcı olabilir. Sonuç olarak, polipropilen liflerin beton uygulamalarında kullanılması, karışımın dayanıklılığını, işlenebilirliğini ve stabilitesini artırabilir dolayısıyla betonun kalitesini yükseltir. Polipropilen lifler, polipropilen polimerinden üretilen ince liflerdir. 3B beton uygulamalarında da polipropilen liflerin kullanılmasına rastlanabilir. Bu liflerin, 3B baskı sürecinde beton karışımının işlenebilirliğini artırabileceği, çatlak oluşumunu azaltabileceği ve baskı katmanlarının stabilitesini sağlayabileceği öne sürülmüştür (Rubio vd., 2017).

Diğer bir çalışmada beton numunlere, propilen lifler harçlara hacimce %0,6, %0,8, %0,9, %1,1 oranlarında katılmıştır. Bu katkının sonucunda polipropilen lif katkısının harçlar üzerinde basınç dayanımını bir miktar düşürdüğü, eğilme dayanımını bir miktar arttırdığı, su emmelerinin lif tipine göre değiştiği gözlemlenmiştir. Polipropilen lif katkılı harçlar üzerinde yapılan su emme deneyleri sonuçlarına göre, lif tipinin değişmesiyle, diğer bir ifadeyle lif uzunluğunun artmasıyla su emme değerleri de artmıştır. Diğerlerine göre daha kısa olan lif hacminin artışıyla su emme değerleri azalırken, daha uzun olan liflerin miktarının artışı da harçların su emme miktarının yükselmesine neden olduğu belirlenmiştir. Bu sonuçlar doğrultusunda beton harcında propilen lif kullanımının belirli koşullarda betonun bazı durabilite özelliklerini iyileştirdiği söylenebilir (Uygunoğlu, Barlas Özgüven., 2019.).

Sülfürik asit saldırısının beton üzerindeki etkileri incelenmiştir. Çalışmanın sonuçlarına göre, sülfürik asit ile temas sonucu betonun ağırlık kaybı ve kalınlık artışı gözlemlenmiştir. Betonun ağırlık kaybı, kalınlık artışı ve sülfür içeriğindeki değişiklikler, betonun sülfürik asit saldırısına karşı tepkisini değerlendirmek için kullanılan göstergelerdir. Ağırlık kaybı, asit çözeltilisinin asiditesine bağlı olarak artış göstermiştir. Daha güçlü asit çözeltileri, betonda daha fazla hacim artışına neden olurken, yoğunluk azalmasını da beraberinde getirdiği görülmüştür. Ayrıca, betonun kalınlık artışı (genleşme) dağılımı incelendiğinde, sülfat dirençli çimento kullanan betonun normal portland çimento kullanan betona göre daha fazla genleştiği gözlemlenmiştir. Fakat, uzun vadede sülfat dirençli çimento kullanmanın sülfürik asit saldırısına karşı betona daha iyi direnç sağladığına dair bir kanıt bulunamamıştır. Betonun sülfürik asit saldırısına karşı tepkisi incelenirken ağırlık kaybı, kalınlık artışı ve kimyasal değişiklikler gibi çeşitli göstergelerin bir arada değerlendirilmesi gerekmektedir (Attigbe & Rizkalla, 1988.).

Taramalı elektron mikroskobu (SEM) analizi kullanılarak betonun sülfürik asit saldırısına karşı tepkisi incelenmiştir. SEM analizi, betonun mikroyapısını incelemek ve asit saldırısının beton üzerindeki etkilerini belirlemek için kullanılmıştır. SEM analizi sonucunda, asit saldırısına maruz kalan beton numunelerinin yüzeyinde ve iç yapısında meydana gelen değişiklikler detaylı bir şekilde incelenmiştir. Bu analiz sayesinde asit saldırısının betonun mikroyapısında nasıl bir etkiye yol açtığı gözlemlenmiş ve anlaşılmıştır. Özellikle, asit saldırısının betonun içine doğru ilerleyerek nasıl bir bozulmaya neden olduğu ve bu bozulmanın derinliğine göre

değişen etkileri belirlenmiştir. SEM analizi ayrıca, beton numunelerindeki sülfür içeriğinin incelenmesinde de kullanılmıştır. Sülfür içeriğindeki değişiklikler, betonun sülfürik asit saldırısına karşı kimyasal olarak nasıl tepki verdiğini anlamak için önemli bir gösterge olmuştur.

Sonuç olarak, SEM analizi sayesinde betonun sülfürik asit saldırısına karşı tepkisi detaylı bir şekilde incelenmiş, asit saldırısının betonun mikroyapısında ve kimyasal bileşiminde nasıl değişikliklere neden olduğu anlaşılmıştır. Bu analiz, betonun asit saldırısına karşı dayanıklılığını belirlemek ve beton yapılarının uzun vadeli performansını değerlendirmek için önemli bir araç olmuştur. SEM analizi sonuçlarına dayanarak, asit saldırısına maruz kalan beton numunelerinde yüzeyde ve iç yapıda belirgin bozulmaların meydana geldiği ve bu bozulmaların betonun dayanıklılığını olumsuz yönde etkilediği sonucuna varılmıştır. SEM analizi ile elde edilen görüntülerde, asit saldırısının beton yüzeyindeki mikroyapıda çeşitli bozulmalar ve çatlaklar oluşturduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca, asit saldırısının betonun iç yapısında da çözünmeye ve bozulmaya neden olduğu belirlenmiştir. Özellikle, sülfat içeriğinde artış ve beton matrisindeki çözünme izleri tespit edilmiştir. Bu değişiklikler, asit saldırısının betonun kimyasal bileşimini etkilediğini ve betonun dayanıklılığını azalttığını göstermektedir (Attigbe & Rizkalla, 1988.).

Gerçekleştirilen bir çalışmanın sonuçlarına göre, asit saldırısına maruz kalan beton küplerinin ağırlığındaki kayıp, çimento içeriğinin artmasıyla artmaktadır. Örneğin, su/çimento oranı 0.40 olan betonla yapılan küplerin kaybı, su/çimento oranı 0.70 olan betonla yapılan küplere kıyasla üç katından fazla artmıştır. Bu sonuçlar, düşük sülfürik asit konsantrasyonlarına sahip daha dayanıklı betonlar için nispeten yüksek çimento içeriği gerekliliğinin geçerli olmadığını ve betonun yüksek sülfürik asit konsantrasyonlarına maruz kalması durumunda ters etki yarattığını göstermektedir. Ancak, bu sonuçlar tam olarak tüm beton karışımları için geçerli değildir, çünkü farklı beton karışımları farklı sonuçlar vermiştir. Beton küplerinin ağırlığı, zamanla değişmiştir ve bu değişim, betonun yaşı, su-çimento oranı ve asit saldırısı şartlarına bağlı olarak farklı sonuçlar vermiştir. Özellikle, çimento hacminin artmasıyla betonun ağırlığının da arttığı gözlemlenmiştir. Bu durum, betonun sülfürik asit saldırısına karşı dayanıklılığını etkileyen önemli bir faktör olarak belirtilmiştir. Sonuç olarak, bu çalışma betonun sülfürik asit saldırısına karşı dayanıklılığını ve fiziksel özelliklerini anlamak için önemli bilgiler sunmaktadır. Betonun sülfürik asit saldırısına maruz

kaldığında, çimento içeriğinin artmasıyla ağırlık kaybının da arttığı belirlenmiştir. Daha yüksek çimento içeriğine sahip betonlar, asit saldırısına daha duyarlı olabilir ve ağırlık kaybı daha fazla olabilir. Düşük su-çimento oranına sahip betonların asit saldırısına daha duyarlı olduğu ve bu durumun betonun dayanıklılık özelliklerini olumsuz yönde etkilediği gözlemlenmiştir (Fattuhi & Hughes, 1988).

2.2 Üç Boyutlu Yazıcı Yöntemi

3B baskı teknolojisi, dijital tasarımın fiziksel dünyaya dönüşmesini sağlayan bir üretim yöntemi olarak ortaya çıkmıştır. Bu teknolojinin gelişimiyle birlikte, üretim süreçleri ve endüstrilerde önemli değişimler yaşanmıştır. Özellikle prototipleme süreçlerinde büyük bir devrim yaratmıştır. Geleneksel üretim yöntemlerinde, bir prototipin üretilmesi zaman alıcı ve maliyetli olabilirken, 3B baskı sayesinde tasarımcılar hızla ve düşük maliyetle prototipler üretebilirler. Bu, ürün geliştirme sürecinin hızlanmasına ve maliyetlerin düşmesine katkıda bulunmuştur. Ayrıca, 3B baskı teknolojisi kişisel üretimi ve özelleştirmeyi artırmıştır. Artık bireyler, kendi tasarımlarını oluşturabilir ve evlerinde veya küçük atölyelerinde bu tasarımları fiziksel nesnelere dönüştürebilirler. Bu durum, hobi meraklıları için büyük bir fırsat sunarken, kişisel ihtiyaçlara uygun ürünlerin üretilmesini de mümkün kılmıştır. 3B baskı, endüstriyel üretimde de önemli bir rol oynamaktadır. Özellikle karmaşık geometrilere sahip parçaların üretiminde ve özelleştirilmiş ürünlerin küçük partiler halinde üretilmesinde tercih edilmektedir. Bu, üretim süreçlerini daha esnek hale getirir ve stok maliyetlerini azaltır. Bu teknolojinin sağladığı esneklik ve yenilik, birçok endüstride büyük bir etki yaratmıştır. Geleneksel üretim yöntemlerine kıyasla daha az iş gücü ve kaynak kullanımı gerektiren bu teknoloji, sürdürülebilir üretim modellerinin gelişimine de katkıda bulunmuştur.

Filamentler kullanılarak uygulanan 3B baskı yöntemi oldukça ilginç bir konudur. Bu yöntem, genellikle Eriyik Yığılma Modellemesi (FDM) olarak adlandırılır ve 3B baskı endüstrisinde yaygın olarak kullanılır (Kristiawan vd., 2021). Eriyik Yığılma Modellemesi (FDM), ham maddenin eritilmesini ve filamanlara yeni şekiller oluşturmak üzere yeniden işlenmesini içeren bir 3 boyutlu baskı tekniğidir. Bu süreç, enjeksiyonlu kalıplamaya benzer ve malzemeleri verimli bir şekilde yönetirken

karmaşık şekiller ve yapılar oluşturma yeteneği nedeniyle giderek daha popüler hale geliyor; bu da daha az israfa yol açıyor ve geleneksel üretim yöntemlerine göre çeşitli başka avantajlar sağlıyor. FDM süreci filament bileşimi, baskı parametreleri ve üretim süreci gibi çeşitli faktörlerden etkilenir. Örneğin, kullanılan filamentlerin türü, FDM makinesinin performansı ve seçilen parametrelerin tümü, FDM ürünlerinin mekanik özelliklerini etkileyebilir.

3B baskı pazarı en hızlı büyüyen sektörlerden biridir ve pazarında büyümesinde önemli bir artış beklenmektedir. Bu teknolojinin son yıllarda daha popüler hale geldi ve 3B baskının kullanımı çeşitli endüstriyel sektörlere yayılmıştır. 3B baskıda kullanılan malzemeler çeşitlidir ve süreç, çoğunlukla otomotiv bileşenleri, cerrahi aletler, prototipler, ambalajlar ve oyuncaklar da dahil olmak üzere geniş bir ürün yelpazesine sahiptir. Genel olarak, filamentlerle 3B baskı ve genel olarak 3B baskı, üretime çok yönlü ve yenilikçi bir yaklaşım sunarak, çeşitli endüstrilerde potansiyel uygulamalara sahip karmaşık ve özelleştirilmiş nesnelerin üretilmesine olanak tanır. Filament yöntemi 3B baskı için en yaygın ve yaygın olarak kullanılan yöntemlerden biridir. Filamentler, 3B baskıda kullanılan temel malzemelerdir ve üç boyutlu nesneler oluşturmak için 3B yazıcılarda kullanılırlar. 3B baskı filamentleri için en popüler malzemeler, akrilonitril bütadien stiren (ABS), polilaktik asit (PLA) ve polikaprolakton (PCL) dahil olmak üzere termoplastiklerdir. 3B baskının kullanımı genel olarak olduğu gibi filamentlerle de malzemeyi katman katman biriktirerek üç boyutlu nesnelerin oluşturulmasını içerir. Filamentler, 3B baskıda kullanılan ve genellikle uzun, ince şeritler halindeki malzemelerdir. Bu filamentler, istenen nesneyi oluşturmak için malzemeyi ısıtan ve ekstrüde eden bir 3B yazıcı aracılığıyla uygulanır. Özetle FDM, malzeme verimliliği, atık azaltma ve karmaşık yapılar oluşturma yeteneği açısından çok sayıda avantaj sunan çok yönlü bir 3B baskı tekniğidir. FDM sürecini etkileyen çeşitli faktörleri anlamak, baskı parametrelerini optimize etmek ve yüksek kaliteli sonuçlar elde etmek için çok önemlidir (Mikula vd., 2020.).

Bu yöntemin çevreyle ilişkisi daha da ele alınacak olduğunda, 3B baskı filamentinin atık plastiklerin geri dönüştürülmesine yönelik bir yöntem olarak kullanımını ve bunun atık yönetimi ve çevre koruma üzerindeki etkileri araştırılmaktadır. Giderek büyüyen plastik geri dönüşüm sorununu ve bunun çevre koruma ve atık yönetimi üzerindeki etkilerini vurgulanmaktadır. İnceleme, plastiklerin merkezi olarak seçici olarak toplanmasına yönelik mevcut yaklaşıma alternatif olarak

geri dönüştürülmüş polimerlerden 3 boyutlu yazıcılar için filament üretimine odaklanıyor. Ayrıca 3B baskı filament üretiminin çevresel etkisi; döngüsel ekonomi ilkeleriyle uyumunu ve plastiklerle antropojenik kirlenmeyi azaltmadaki rolü vurgulanıyor. Plastik geri dönüşümü ve plastik atıkların yeni ürünlere dönüştürülmesi için 3B baskı teknolojisinin kullanılmasıyla ilgili bilgiyi yaymayı amaçlayan eğitim projeleri ele alınmaktadır. Ek olarak, geri dönüştürülmüş polimerlerin mekanik özelliklerini iyileştirmek için çeşitli katkı maddelerinin kullanımının yanı sıra, üretimi koronavirüs krizi sırasında olduğu gibi geçici ihtiyaçlara göre ayarlamak için 3B baskı potansiyeline de değiniliyor. Ayrıca PET şişeleri 3B baskı için ekolojik filamentlere dönüştürmeyi amaçlayan girişimlere de dikkat çekilerek, plastik atıkların ele alınmasının gerekliliği ve büyük şirketlerin plastik atıklarla mücadeleye dahil edilmesine teşvik edilmektedir. Böylelikle 3B baskı uygulamaların bu alanında da çevreye katkıda bulunabilmesi mümkündür (Erdem Çerçevik vd., 2018). Bu durum inşaat sektöründe 3B baskı yöntemi uygulamalarında çevre dostu, atık içeren beton harçların imalatı ile aynı mantığa dayanmaktadır.

FDM baskı yönteminde, termoplastik filamentler eritilip katman katman bir taban yüzeye uygulanır. Malzeme seçimi, kullanıcı ihtiyaçlarına göre farklı özelliklere sahip filamentlerin tercih edilip edilmemesine bağlıdır. Filamentler eritilir ve işlenebilir hale getirildikten sonra eklenerek imalat sürdürülür. Katmanlar üst üste eklenir ve her katman eklenirken erimiş filament hızla soğur ve katı nesne oluşturulmuş olur. FDM 3B yazıcıların çalışma şekli genellikle; ilk olarak taban hareket eder ve nozül, tabanın üzerinde hareket ederken filament ekler. Karmaşık geometrilere sahip nesneler için destek malzemeleri kullanılabilir ve bu destekler baskı tamamlandıktan sonra kolayca çıkarılabilecek şekilde uygulanır. FDM 3B baskı, günlük kullanımlar, mühendisler ve prototipleme uzmanları tarafından sıklıkla tercih edilir. Hem evde kullanım için uygun maliyetli 3B yazıcılarla hem de endüstriyel ortamlarda karmaşık parçaların üretiminde kullanılır.

3B baskı yöntemi, ilk olarak 1984 yılında Charles Hull tarafından icat edilmiştir. Hull, stereolitografi adı verilen bu teknolojiyi geliştirmiştir. Stereolitografi, sıvı polimerlerin UV ışık altında katman katman sertleştirilerek 3 boyutlu modellerin oluşturulmasını sağlayan bir süreçtir. Hull, bu teknolojiyi geliştirdikten sonra 3B Systems şirketini kurmuş ve stereolitografi makineleri üretmeye başlamıştır. Bu gelişmeler, 3B baskı teknolojisinin ortaya çıkışını ve ilk kullanımlarını temsil

etmektedir. 3B baskının erken araştırmalarında öncü olan isimler arasında 1971'de foto kimyasal işleme adı verilen çift lazer ışını yaklaşımı için patent başvurusunda bulunan Wyn Swainson, erken 1980'lerde tek bir lazer ışını kullanarak hızlı prototipleme tekniği geliştiren Hideo Kodama, 1984'te stereolitografiyi icat eden ve 1986'da buna ilişkin bir patent alan Charles Hull, aynı dönemde seçmeli lazer sinterleme (SLS) kavramını geliştiren Carl Deckard ve 1989'da eritme birleştirme modelleme (FDM) için patent alan Stratasys'in kurucuları S. Scott ve Lisa Crump bulunmaktadır (Su & Al'Aref, 2018).

3B baskı, endüstriyel sektörlerin hemen hemen hepsinde, süreçlerin otomasyonunu ve üretimini daha hızlı ve ucuz bir şekilde gerçekteşmesine katkı sağlamıştır. Bu yöntem birçok farklı endüstride kullanılabilir duruma gelmiştir. Örneğin, otomotiv, havacılık, tıp ve inşaat gibi endüstrilerde prototip üretimi, yedek parça üretimi ve özel parça üretimi gibi amaçlar doğrultusunda kullanılmaktadır. Ayrıca, son yıllarda 3B baskı, kişisel kullanım için de daha erişilebilir hale gelmiştir. Ancak inşaat sektörü diğer endüstri sektörleri ile aynı ölçüde otomatikleştirilmemiştir. Genel olarak, 3B baskı teknolojisi halihazırda çeşitli endüstrilerde önemli bir etki yarattı ve sağlık, havacılık, inşaat ve ötesine kadar gelecekteki uygulamalar için büyük bir potansiyele sahiptir. Bu nedenle, bu yöntemin geliştirilmesi büyük faydalar sağlayabilir (Gin Y., 2022).

2.1.1 Üç Boyutlu Yazıcı ile Beton İmalatı

3B beton baskı teknolojisi, yapı ve inşaat endüstrisinde giderek artan ilgiyi çekmektedir. Bu teknik, katman katman şekilde çimento esaslı malzemelerin ekstrüde edilmesini sağlar. Bu yöntemde malzemenin pompalanabilir olması ve ekstrüzyon sonrası şeklini koruyabilmesi için reolojik özellikler özellikle önem arz etmektedir. 3B beton baskı uygulamalarında başarılı sonuçlar elde etmek için dikkate alınması gereken bazı önemli noktalar bulunmaktadır. İlk olarak, malzemenin akışkan olması ve hortum aracılığıyla pompalanabilir olması gerekmektedir. Aynı zamanda, katman katman birikimden sonra yeterli dayanıklılık ve rijitlik kazanması çok önemlidir. Malzemenin nozuldan çıktıktan sonra şeklini koruyabilme yeteneği olan yüksek şekil tutma kapasitesi de kritik bir husustur. 3B beton baskı uygulamalarında malzemenin

başarılı bir şekilde işlenebilmesi için, malzemenin statik akma gerilmesi de göz önünde bulundurulmalıdır. Bu gerilme, malzemeye ilk rijitliğini verir ve nozuldan çıktıktan sonra şeklini koruyabilme yeteneğini sağlar. Ayrıca, malzemenin yapısal birikim hızı da önemlidir; çünkü ardışık katmanların birikim hızı, malzemenin yapısal birikim hızından daha hızlı ise yapı başarısız olabilir. Sonuç olarak, 3B beton baskı teknolojisiyle ilgilenenlerin malzemenin reolojik özelliklerine dikkat etmeleri ve pompalanabilirlik ile işlenebilirlik gibi faktörleri göz önünde bulundurmaları önemlidir. Bu sayede, başarılı ve dayanıklı 3B beton yapılar inşa etmek mümkün olacaktır.

3B beton yazıcı ile imalat aşamalarını aşağıdaki gibi sıralanabilir:

1. Tasarım: İlk adım, 3B baskı beton yapısının tasarımıdır. Bu adımda, yapısal gereksinimler, geometrik kısıtlamalar ve malzeme özellikleri dikkate alınarak bir dijital model oluşturulur.
2. Hazırlık: Beton harcı hazırlanır ve 3B baskı cihazının haznesine yüklenir. Beton harcı, özel bir karıştırıcıda hazırlanır ve ardından 3B baskı cihazına imalata hazır bir şekilde aktarılır.
3. Baskı: 3B baskı cihazı, dijital modeli takip ederek beton harcını katman katman biriktirir. Baskı işlemi, beton harcının özel bir nozuldan çıkarılması ve bir tabana veya önceki katmana yerleştirilmesi yoluyla gerçekleştirilir.
4. Priz Alma Evresi: Beton yapının imalatının tamamlanmasının ardından, priz alma evresi bu süreç devam eder. Betonun priz alması, yapısal dayanıklılığı ve mukavemetinin nihai haline ulaşması için uygun bir şekilde gerçekleşmelidir (Uygunoğlu vd., 2019.; Zeranka vd., 2019).

Bugün 3 Boyutlu Baskı alanında birçok farklı teknik bulunmaktadır, ancak temel prensip aynıdır. Bu yöntem, malzemeyi katman katman ekleyen bir üretim teknolojisidir. 3B yazıcı, ayrıntının ince kesitsel alanlarını birer birer üst üste basar ve bu şekilde tüm ayrıntıyı oluşturur. Bu teknolojinin başlıca avantajları, karmaşık standart olmayan detayları hızla üretebilmesidir. Katman katman olarak ilerleyen bu yöntem, öncelikle bir CAD yazılımı kullanılarak bir 3B modelin oluşturulmasıyla başlar. Bu model, bir 3B yazıcıya aktarılır ve yazıcı, modeli katmanlar halinde

işlemeye başlar. Her katman, yazıcının malzeme deposundan alınan malzeme ile oluşturulur (Anell, 2015.).

Üç boyutlu yazıcı ile beton imalatının avantajlarını verilen bilgilerin de doğrultusunda aşağıdaki gibi listeleyebiliriz:

- ✓ **Maliyet ve Zaman Tasarrufu:** Kalıp kurulumu olmamasından dolayı kalıp kurulumu ve sökümünden kaynaklı zaman ve maliyet harcanmasını engelleneceği için bu hususta tasarruf sağlanmış olacaktır.
- ✓ **Daha Esnek Tasarım İmkânı:** Kalıp uygulaması olmadan betonun doğrudan şekillendirilmesi ve CAD programları tarafından hazırlanan tasarımların direkt olarak 3B baskı cihazı ile uygulanması ile daha karmaşık ve özgün tasarımların yapılmasına olanak tanır.
- ✓ **Sürdürülebilirlik ve Çevre:** 3B baskı, inşaat malzemelerinin üretiminde geleneksel kalıplama ve döküm yöntemlerine kıyasla daha az atık ortaya çıkarır malzemelerin daha verimli kullanılması ile beraber çevre dostu ve sürdürülebilir bir inşaat sürecine katkı sağlar.
- ✓ **Daha Güvenli ve Pratik İnşaat Süreci:** Yerinde inşaatların tek bir aşamada geliştirilmesini kolaylaştırması, inşaat ekipmanlarının taşınması, montaj işlemlerinin daha Pratik bir şekilde gerçekleşmesi, daha az işçi gereksinimi ile inşaat işleri sırasında yaralanma riskini azaltması avantajlarının sağlanmasıyla bu yöntem daha güvenli ve pratik bir inşaat süreci sağlar (Fares vd., 2019; Uygunoğlu vd., 2019).



Şekil 2.1 Farklı Şekiller ile İmal Edilen Beton Baskılar

Bu bulgu ve unsurların doğrultusunda 3B baskı betonun tasarımı ve üretimi, geleneksel beton yapım yöntemlerine kıyasla daha hızlı ve daha verimlidir. Ayrıca, 3B baskı beton, karmaşık geometrilerin oluşturulmasına olanak tanır ve düşük maliyetli konutların ve daha farklı yapıların inşası için potansiyel olarak kullanılabilir.



Şekil 2.2 ve 2.3 Üç Boyutlu Baskı Cihazı ve Üretilen Beton Kiriş

Bir grup araştırmacı, 3B yazdırılabilir beton karışımlarının performansını tanımlamaya uygun bir takım kapsamlı kriterler saptamışlardır. Performans kriterleri arasında statik ve dinamik akma gerilimi, pompalanabilirlik, ekstrüde edilebilirlik, üretilebilirlik ve taze durumda açık kalma süresinin yanı sıra üç farklı yükleme

yönünde ortalama basınç dayanımı ve sertleştirilmiş durumda katmanlar arası bağ dayanımı yer alır. Bu performans göstergeleri, söz konusu beton karışımlarının, çevresel ve ekonomik etkilerini karşılaştırmak için gerekli olan aynı işlevsel gereksinimleri karşılamasını sağlamak için seçilmiştir. Ayrıca çalışmalarında kalsiyum sülfoalüminat-kireçtaşı bağlayıcı sistemlerinin 3B yazdırılabilir beton karışımlarında kullanılmasının küresel ısınma potansiyelini önemli ölçüde azalttığını gözlemledi. Ancak fosil kaynakların tükenmesi göstergesinin Portland çimentosu bazlı karışımlara göre çok daha yüksek olduğu kaydedildi. 3B yazdırılabilir beton karışımlarının çevresel ve maliyet etkilerini azaltmaya yönelik stratejiler arasında agrega içeriğini artırarak bağlayıcı içeriğinin azaltılması, daha çevre dostu bağlayıcı sistemlerin kullanılması ve doğal iri agregalar ile geri dönüştürülmüş beton agregalarının birleştirilmesi yer alır. Bu stratejiler, 3B yazdırılabilir beton karışımlarının çevresel etkisini ve genel maliyetini azaltmayı mümkün kılma potansiyeline sahiptir (Mohan vd., 2022).

Bu çalışmada, ekstrüzyon bazlı beton 3B baskı teknolojisinin malzeme davranışı incelenmiş ve çeşitli faktörlerin katman arayüzlerini nasıl etkilediği ve bunun sonuçlarının neler olduğu araştırılmıştır. Çalışmada betonun özellikleri, bileşenleri ve baskı parametreleri üzerinde durulmuştur. Betonun malzeme davranışını belirlemek için reolojik, mekanik, mikroyapı ve kimyasal analizler uygulanmıştır. Ayrıca, katman arayüzlerini etkileyen ana faktörler ve bunların sonuçları incelenmiştir. Bu faktörler arasında zaman aralığı, nem içeriği, baskı parametreleri, porozite ve malzeme bileşimi bulunmaktadır. Sonuçlar, katman arayüzlerinin dayanıklılık, işlenebilirlik ve su geçirgenliği gibi özelliklerini etkilediğini göstermektedir. Özellikle, kuruma kaynaklı çekme, katman arayüzlerinde çatlaklar ve yapısal bütünlük sorunlarına neden olabilir. Sonuç olarak, 3B baskılı betonun kalitesini artırmak ve dayanıklılığını sağlamak için katman arayüzlerinin dikkatlice yönetilmesi gerekmektedir.

Ekstrüzyon bazlı beton 3B baskı teknolojisi, katman arayüzlerinin kalitesi ve dayanıklılığı açısından önemli bir rol oynamaktadır. Bu teknolojiye, katman arayüzlerini etkileyen çeşitli faktörler bulunmaktadır ve bunların sonuçları da oldukça belirleyicidir (Mohan vd., 2021).

Bu bağlamda katman arayüzünü etkileyen faktörleri ve bu durumun etkilediği unsurları aşağıdaki gibi sıralayabiliriz:

- Katman Arayüzlerini Etkileyen Faktörler:

1. Zaman Aralığı: Katmanların arasındaki zaman aralığı, betonun kuruması ve bağlanması için önemlidir. Daha uzun zaman aralıkları, katman arayüzlerindeki nem gradyanının artmasına neden olabilir ve bu da poroziteyi artırarak bağlantıları zayıflatabilir.
2. Nem İçeriği: Nem içeriği, betonun katman arayüzlerindeki bağlantıları etkileyen önemli bir faktördür. Yüksek nem içeriği, katman arayüzlerindeki bağların gücünü azaltabilir ve dayanıklılığı olumsuz yönde etkileyebilir.
3. Baskı Parametreleri: Baskı hızı, nozül yüksekliği ve çevresel koşullar gibi baskı parametreleri, katman arayüzlerinin kalitesini etkileyebilir. Doğru baskı parametreleri seçilmezse, katman arayüzlerinde düzensizlikler ve zayıf bağlantılar oluşabilir.
4. Porozite: Betonun porozitesi, katman arayüzlerindeki bağların gücünü ve su geçirgenliğini etkileyen önemli bir faktördür. Yüksek porozite, katman arayüzlerindeki bağların zayıflamasına ve su geçirgenliğinin artmasına neden olabilir.
5. Malzeme Bileşimi: Kullanılan beton karışımının bileşimi, katman arayüzlerinin özelliklerini belirleyen kritik bir faktördür. Yanlış malzeme bileşimi, katman arayüzlerinde çatlaklar ve kırılmalar gibi sorunlara yol açabilir.

- 3B Betonda Katman Arayüzünün Etkilediği Unsurlar:

1. Dayanıklılık Sorunları: Zayıf katman arayüzleri, betonun dayanıklılığını ve uzun vadeli performansını olumsuz yönde etkileyebilir. Bu durum, yapıların çatlama ve hasar görmesine neden olabilir.
2. Su Geçirgenliği: Zayıf katman arayüzleri, betonun su geçirgenliğini artırabilir. Bu da yapıların su hasarına daha açık hale gelmesine ve dayanıklılığının azalmasına yol açabilir.
3. Mekanik Dayanım: İyi bir katman arayüzü, betonun mekanik dayanımını artırabilirken, zayıf arayüzler mekanik dayanımın azalmasına neden olabilir. Bu da yapıların güvenilirliğini ve sağlamlığını tehlikeye atabilir.

4. Yapısal Bütünlük Sorunları: Katman arayüzlerindeki zayıflıklar, yapısal bütünlüğü tehlikeye atabilir ve yapıların beklenenden daha kısa ömürlü olmasına neden olabilir.

Sonuç olarak, katman arayüzlerini etkileyen faktörlerin dikkatlice yönetilmesi, 3B baskılı beton yapıların kalitesini artırmak ve dayanıklılığını sağlamak için hayati öneme sahiptir. Bu faktörlerin anlaşılması ve kontrol altına alınması, gelecekteki baskı süreçlerinde başarıya ulaşmak için kritik bir adımdır (Mohan vd., 2022).

3B beton baskı teknolojisi, yapı ve inşaat endüstrisinde giderek artan ilgiyi çekmektedir. Bu teknik, katman katman şekilde çimento esaslı malzemelerin ekstrüde edilmesini sağlar. Kalıp kullanımını ortadan kaldırma potansiyeline sahip olan bu teknikte, malzemenin pompalanabilir olması ve ekstrüzyon sonrası şeklini koruyabilmesi için reolojik özellikler büyük önem taşır. 3B beton baskı uygulamalarında başarılı sonuçlar elde etmek için dikkate alınması gereken bazı önemli noktalar bulunmaktadır. İlk olarak, malzemenin akışkan olması ve hortum aracılığıyla pompalanabilir olması gerekmektedir. Aynı zamanda, katman katman birikimden sonra yeterli dayanıklılık ve rijitliği kazanması da önemlidir. Malzemenin nozuldan çıktıktan sonra şeklini koruyabilme yeteneği olan yüksek şekil tutma kapasitesi de kritik bir husustur (Hou vd., 2021).

İlgili parametreler üzerine çalışmalardan biri olarak, Yu Zhang ve ark. bir çalışmada 3B yazıcı ile inşaat ve bu yöntemde nozülle ilgili parametrelerin doğru şekilde ayarlanması, baskı kalitesini belirlemede kritik bir rol oynamakta olduğunu ortaya koymuştur. Bu çalışmada; extrüdebilite, inşa edilebilirlik, pompalanabilirlik ve katmanlar arası adezyon gibi etkili olan nozül parametrelerinin nasıl optimize edilebileceği incelenmiştir. İlgili parametrelerin ve nozül tasarımının doğru şekilde ayarlanması, baskı kalitesini arttıracak ve standart uygulamaların geliştirilmesine katkı sağlayabileceğinden bahsetmişlerdir. Araştırmalar sonucu karşımıza çıkan ilgili parametreler aşağıdaki gibi sıralanıp açıklanmıştır.

➤ **Extrudability (Ekstrüde Edilebilirlik /Dışarıya Çıkma Yeteneği)**
Optimizasyonu:

Ekstürüdebilite, malzemenin nozulden düzgün bir şekilde çıkmasını ve akmasını ifade eder. Bu parametrenin optimize edilmesi için nozül kesit alanı,

malzeme akış hızı ve çıkış şekli dikkate alınmalıdır. Nozül kesit alanı arttıkça malzemenin akışı iyileşirken, uygun bir malzeme akış hızı belirlenerek extrudability sağlanabilir.

- **Pompalabilirlik (Pumpability):** Bir malzemenin pompa ile taşınma kolaylığını ifade eden bir terimdir. Beton, çimento gibi malzemelerin pompa ile taşınabilirliği ve akışkanlığı pumpability kavramıyla değerlendirilir. Pumpability genellikle malzemenin viskozitesi, akışkanlığı ve reolojik özellikleri ile ilişkilidir. Genellikle birim zamanda taşınan malzeme miktarı, pompa hızı ve malzemenin akışkanlığı gibi faktörlere bağlı olarak değerlendirilir.

- **İnşa Edilebilirlik (Buildability) İyileştirmesi:**
İnşa Edilebilirlik, baskı sürecinde katmanların düzgün bir şekilde inşa edilmesini ifade eder. Bu parametrenin optimize edilmesi için nozül çıkış şekli ve yapıya olan mesafe önemlidir. Nozül çıkış şekli, katman deformasyonunu etkileyerek inşa edilebilirliği belirlerken, nozülün yapıya olan mesafesi katmanlar arası yapışmayı güçlendirir.

- **Katmanlar Arası Adezyon (Interlayer Adhesion) Güçlendirme:**
Katmanlar Arası Adezyon, baskı sürecindeki katmanların birbirine sağlam bir şekilde yapışmasını ifade eder. Bu parametrenin optimize edilmesi için nozülün yapıya olan mesafesi ve malzeme özellikleri göz önünde bulundurulmalıdır. Nozülün yapıya olan mesafesi arttıkça, katmanlar arası yapışma güçlenir ve baskı sonucunda daha sağlam bir yapı elde edilir.

- **Yapısal Birikim Hızı (Structural Build-up Rate):** Yapısal birikme hızı, malzemenin katman katman birikim sürecinde ne kadar hızlı bir şekilde sertleştiğini ve dayanıklı bir yapı oluşturduğunu ifade eder. Bu hız, malzemenin içindeki bağlayıcı maddelerin reaksiyon hızına, flokülasyon sürecine ve katmanların birbirine ne kadar hızlı bağlandığına bağlıdır. Flokülasyon, daha büyük madde parçaları veya agregalar oluşturmak üzere su

veya diğer sıvılar içinde asılı kalan ince parçacıkların kümelenmesi işlemi olarak tanımlanabilir. Bu süreç genellikle atık su arıtımı, toprak stabilizasyonu ve beton üretimi gibi inşaatla ilgili faaliyetlerde asılı parçacıkların çökmesini, filtrelenmesini veya drenajlarını iyileştirmek için kullanılır. Yapısal birikme hızı, yeni bir katman eklenirken önceki katmanın yeterince sertleşip dayanıklı hale gelmesini sağlar. Eğer yapısal birikme hızı yeterince yüksek değilse, katmanlar arasında yeterli bağlantı oluşmaz ve yapının zayıf bir şekilde oluşmasına yol açar.

Matematiksel olarak ifadesi $\frac{V}{t}$ olmak üzere, V malzemenin birim zamanda biriktiği hacmi veya kalınlığı temsil eder ve t ise süreyi ifade eder.

- **Şekil Tutma Kapasitesi (Shape Retention Capability):** Şekil tutma kapasitesi, malzemenin nozuldan çıktıktan sonra istenilen şekli koruyabilme yeteneğini ifade eder. 3B beton baskı uygulamalarında, malzemenin nozuldan çıktıktan sonra hızla sertleşmesi ve şeklini koruması önemlidir. Şekil tutma kapasitesi yüksek olan malzeme, katmanlar arasında sağlam bir bağ oluşturabilir ve yapısal bütünlüğü sağlayabilir. Bu özellik, inşaat sürecinde istenilen şekillerin doğru bir şekilde oluşturulmasını sağlar ve yapıların dayanıklılığını artırır.

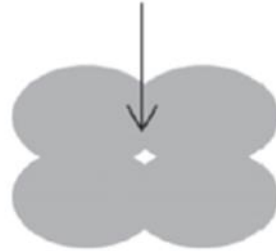
Matematiksel olarak ifadesi $\frac{F_{deformasyon}}{F_{koruma}}$ olmak üzere, F_{koruma} malzemenin şeklini koruyabilme kapasitesini, $F_{deformasyon}$ ise malzemenin deformasyona uğrama kapasitesini temsil eder (Zhang vd., 2022; Hou vd., 2021).

Gerçekleştirilen bir araştırmada, 3B beton baskı yöntemiyle üretilen betonun mekanik özelliklerini ve bu özelliklerin betonun dayanıklılığı üzerindeki etkilerini incelenmiştir. Yapılan deneylerde, basınç dayanımı, eğilme dayanımı, çekme bağlantı dayanımı ve kuruma büzülme gibi önemli parametreler üzerinde durulmuştur. Deneylerin sonuçlarına göre, 3B beton baskı yöntemiyle üretilen betonun yoğunluğunun arttığı, basınç dayanımının 75-102 MPa arasında değiştiği ve eğilme dayanımının 6-17 MPa aralığında olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca, filament arası boşlukların azaltılmasının betonun dayanıklılığını artırabileceği ve daha homojen bir yapı elde edilebileceği belirtilmiştir. Ayrıca, betonun anizotropik özelliklerinin farklı yönlerdeki kuvvetlerle değişebileceği ve yazdırma işleminin betonun kuruma büzülmesini etkilediği tespit edilmiştir. Bu bulgular, 3B beton baskı yönteminin

mekanik özelliklerini anlamak ve gelecekte inşaat sektöründe daha etkili bir şekilde kullanılabilmesi için önemli bir adım olarak değerlendirilmektedir (Le vd., 2012).

4 filament arasındaki boşluklar, betonun katılaşmış özelliklerini önemli ölçüde etkileyeceği gözlemlenmiştir. Bu boşluklar, betonun homojenliğini azaltabilir ve betonun durabilite özelliklerini olumsuz yönde etkileyebilir. Bu sebepten dolayı filament arası boşlukların azaltılması, betonun dayanıklılığını artırabilir ve daha sağlam yapılar elde edilmesine katkı sağlayabilir. Bu etkilerin minimize edilmesi için birkaç önlem alınabilir. İlk olarak, malzeme akışının kontrol edilmesi ve baskı sürecinin titizlikle yönetilmesi gerekmektedir. Malzeme akışının düzgün olması, filament arası boşlukların azaltılmasına yardımcı olabilir. Ayrıca, baskı parametrelerinin uygun şekilde ayarlanması da önemlidir. Baskı hızı, tabaka kalınlığı, malzeme sıcaklığı gibi parametrelerin dikkatlice optimize edilmesi, filament arası boşlukların minimize edilmesine katkı sağlayabilir. Diğer bir önlem ise malzeme bileşimi ve karışım oranlarının iyileştirilmesidir. Beton karışımında kullanılan malzemelerin ve karışım oranlarının optimize edilmesi, daha homojen bir beton yapısının oluşturulmasına ve filament arası boşlukların azaltılmasına yardımcı olabilir. Son olarak, baskı sürecindeki zaman aralıklarının optimize edilmesi de oldukça önemlidir. Katmanlar arasındaki çekme bağlantısının güçlendirilmesi için baskı sürecindeki zaman aralıklarının uygun şekilde ayarlanması, filament arası boşlukların azaltılmasına ve daha sağlam beton yapıların elde edilmesine katkı sağlayabilir. Bu önlemler, filament arası boşlukların etkilerini minimize etmek ve daha sağlam beton yapılar elde etmek için önem arz etmektedir (Le vd., 2012).

A void between 4 filaments



Şekil 2.4 4 Filament Arası Boşluk (Le vd., 2012)

3B baskı teknolojisi ile beton yapı elemanları üretmek için, donatı imalatı da önemli bir adımdır. Donatı, betonun yüksek mukavemetli ve dayanıklı hale gelmesini sağlar. 3B baskı teknolojisi ile beton yapı elemanları üretirken, donatı imalatı için önerilen izlenebilecek adımlar aşağıdaki gibi sıralanabilir:

- Donatının tasarlanması: İlk adım, donatının tasarımını yapmaktır. Donatı tasarımı, yapı elemanının boyutlarına, şekline ve yük taşıma kapasitesine göre belirlenir. Donatı tasarımı, yapı elemanının mukavemetini ve dayanıklılığını artırmak için önemlidir.
- Donatının hazırlanması: Donatı imalatı için, çelik çubuklar kullanılır. Bu çubuklar, donatı tasarımına uygun olarak kesilir ve bükülür. Donatı çubukları, 3B baskı işlemi sırasında betonun içine yerleştirilecektir.
- Donatının yerleştirilmesi: Donatı çubukları, 3B baskı işlemi sırasında betonun içine yerleştirilir. Bu işlem, manuel olarak yapılabilir veya otomatik olarak gerçekleştirilebilir. Donatı çubukları, betonun içinde doğru pozisyonda ve aralıklı olarak yerleştirilmelidir.
- 3B Beton baskı işlemi: Donatı çubukları yerleştirildikten sonra, beton baskı işlemi gerçekleştirilir. 3B baskı yazıcının nozulu, betonu katmanlar halinde yerleştirir. Her katmanın kalınlığı ve genişliği kontrol edilir. Beton baskı işlemi tamamlandıktan sonra, betonun sertleşmesi için beklenir.
- Donatı kontrolü: Beton sertleştikten sonra, donatı çubuklarının doğru pozisyonda ve aralıklı olarak yerleştirildiği kontrol edilir. Donatı çubukları, betonun içinde sabitlenmiş olmalıdır.
- Testler: 3B baskı teknolojisi ile üretilen beton yapı elemanları, standart malzeme testleri ile test edilmelidir. Bu testler, yapı elemanının mukavemetini ve dayanıklılığını belirlemek için yapılır.

Söz konusu donatı imalatı için özellikle dikkat edilmesi gereken noktalar ise:

- Donatı tasarımı, yapı elemanının boyutlarına, şekline ve yük taşıma kapasitesine göre belirlenmelidir.
- Donatılar, doğru pozisyonda ve aralıklı olarak yerleştirilmelidir.
- 3B Beton baskı işlemi sırasında, her katmanın kalınlığı ve genişliği kontrol edilmelidir.
- Donatılar, betonun içinde sabitlenmiş olmalıdır.
- Üretilen beton yapı elemanları, standart yapı ve malzeme testlerine tabi tutulmalıdır (Uygunoğlu vd., 2019.).

3B baskı teknolojisi ile beton ve donatı uygulamaları, inşaat sektöründe çeşitli alanlarda kullanılmaktadır. Örnek olarak, binalar, köprüler, duvarlar ve diğer yapı elemanları 3B baskı teknolojisi ile üretilir. Bu yöntemde, betonun iyileştirilmesine ve yerleştirilmesine odaklanılırken, donatı imalatı için öneriler geri planda kalmaktadır. Ayrıca, 3B baskı beton yöntemiyle katmanlı yapı imalatında dikey donatı yerleşimi ve donatı arasındaki bağlantının uygulanması zor bir süreçtir. Bu sebepten dolayı, 3B baskı beton yapısını güçlendirmeye yönelik karbon fiber veya fiber takviyeli polimer (FRP) ile karıştırılmış kompozit fiber gibi alternatif donatılar gibi yollara başvurulmaktadır, fakat bu seçenekler 3B baskı teknolojisinde kapsamlı bir inceleme ve inovatif ayarlamalar gerektirmektedir. 3B basılı parçaların tamamlanmasının ardından kesintisiz olarak çubuk veya eşzamanlı olarak beton baskı imalatı esansında yazıcının başlığı kullanılarak bir çelik tel yerleştirilmesiyle de Şekil 1.2' de görüldüğü gibi uygulanabilir. 3B baskı yazıcılarla otomatik yapı üretimiyle yapılan uygulamalarda, ara katmanlara veya harç filament katmanları arasına donatı yerleştirilebildiği gibi direkt olarak hazır el yapımı bağlanmış takviye kafesinin yanından beton ekstrüze edilerek ilgili yapı oluşturulabilmektedir (Le vd., 2012).



Şekil 2.5 3B Yazıcı ile İmalatta Donatı Uygulama Örneği (Uygunoğlu vd., 2019.)

2.3 Beton İmalatında Atık Kullanımı

Beton üretim süreçlerinde atık kullanımı, çevre dostu ve sürdürülebilir bir perspektife doğru önemli bir adım olarak öne çıkıyor. Geleneksel beton üretiminde genellikle çimento, kum, çakıl ve su gibi doğal kaynaklar kullanılır. Ancak alternatif ve sürdürülebilir yöntemler geliştirilmediği sürece bu durum, doğal kaynakların tükenmesine ve çevresel etkilere yol açabilir. Günümüzde çevresel sürdürülebilirlik, inşaat sektöründe önemli bir odak noktası haline gelmiştir. Bu bağlamda, beton üretiminde atık kullanımının artan bir şekilde ele alınması, çevre dostu inşaat malzemeleri ve süreçleri konusundaki araştırmalarda önemli bir yer edinmiştir. Beton imalatında atık kullanımıyla ilgili önceki çalışmalardan faydalananarak, çeşitli atık malzemelerin betonun durabilite özellikleri üzerindeki etkilerini ve sürdürülebilir inşaat uygulamalarındaki potansiyelleri araştırılmaktadır.

Atık kullanımıyla beton üretimi, atıkların çevresel etkilerini azaltmanın yanı sıra, doğal kaynakları koruma ve değerlendirme amacını taşır. Örneğin, uçucu kül ve yüksek fırın cürufu gibi endüstriyel atıklar, çimento üretiminde katkı maddeleri olarak kullanılabilir. Bu atıklar, beton karışımlarına eklenerek bazı durabilite özelliklerini geliştirebilir ve aynı zamanda çevresel etkileri minimize edebilir. Örnek olarak atık

lastik granülleri, taş unu, yüksek fırın cürufu veya cam atıkları gibi malzemeler beton üretiminde kullanılabilir. Bu tür atık malzemelerin beton karışımlarına entegrasyonu, betonun mekanik özelliklerini iyileştirmenin yanı sıra, atıkların çevresel açıdan daha sürdürülebilir bir şekilde yönetilmesini sağlar. Sonuç olarak, atık kullanımıyla beton üretimi, çevre üzerindeki olumsuz etkileri minimize etme ve doğal kaynakları koruma amacını taşır. Bu uygulamalar, inşaat sektörünü daha sürdürülebilir hale getirerek çevresel sorumluluk bilincini artırır.

Bir çalışmaya göre elde ettikleri bulgular, çevre dostu çimento harcının gözenekliliği, su emme ve mekanik davranışı üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu göstermiştir. Çalışma, harcın gözenekliliğinin artmasıyla su emiliminin de arttığını göstermiştir. Bu durum, kauçuklu harç içindeki gözenek yapılarının artmasıyla ilişkilendirilir ve daha yüksek geçirgenlik ve su emilimine neden olur. Kauçuklu harç, kontrol harcına göre yaklaşık 4 kat daha fazla su emme göstermiştir ve aynı zamanda kontrol harcına göre yaklaşık %40 daha hafiftir. Ek olarak, gözeneklilik, kauçuk içeriğiyle orantılı olarak zararlı bir etkiye sahiptir ve sıkıştırma dayanımında yaklaşık 10 kat daha düşük bir değer gözlemlenmiştir. Kauçuklu harcın gözenekli morfolojisi, uygulanan stresin harç bölümü boyunca dağıtılmasını veya yayılmasını zorlaştırdığı için zayıflatıcı bir etki yaratmıştır. Bu nedenle, çevre dostu çimento harcının gözenekliliğinin, su emme ve mekanik dayanımı üzerinde önemli bir etkisi olduğu ve daha yüksek gözenekliliğin artan su emilimine ve azalan mekanik dayanıma neden olduğu sonucuna varılabilir (Angelin vd., 2017).

Gerçekleştirilen başka bir çalışmada ise taş ununun beton durabilite özelliklerini nasıl etkilediğiyle ilgili araştırmalar yapılmıştır. Genellikle taş ununun betonun basınç dayanımını arttırdığı, boşluklu yapıyı azaltarak betonun kompozitesini arttırdığı ve bu durumun dayanımını arttırdığı belirtilmiştir. Ayrıca, taş ununun betonun su emme özelliğini azalttığını ve bu bilgilerin sonucunda, taş ununun betonun dayanıklılığına olumlu etkileri olabileceği gözlemlenmiştir (Horoz, 2020).

Hurda lastiklerin, enerji yoğun endüstrilerde alternatif bir yakıt olarak kullanılması veya düşük kirlilik riski taşıyan malzemeler üretmek için çimentolu kompozitlere dahil edilmesi gibi yöntemlerle yeniden kullanılabileceği çeşitli yollardan bahsedilmiştir. Hurda lastiklerin depolanması veya uygunsuz bertarafı (örnek olarak toplayarak yakılması), çevreye zehirli dumanlar salınmasına ve kazara yangınlara yol

açabilmektedir. Bu yangınların söndürülmesi zor olabilir ve aylarca yanarak hava ve toprak kirliliğine neden olabilir. Bu sebepten dolayı atık lastiklerin beton üretiminde kullanılması çevreci bir yaklaşımdır. Ayrıca atık kauçuk lastik atığının agrega ikamesi olarak kullanılması sonucu betonun daha fazla enerji emme kapasitesini arttırdığı ve su emme özelliğini azalttığı gözlemlenmiştir. Bu durum, betonun darbe direncini artırarak ve su emme kapasitesini azaltarak dayanıklılık özelliklerini olumlu yönde etkilemiştir (Topçu & Unverdi, 2018).

Atık lastiklerin betonda kullanımının, bazı durabilite özelliklerini iyileştirdiğini gözlemlenmiştir. Örneğin, lastik kullanımı betonun su emme özelliğini geliştirdiğini ve lastik katkısının asidik ortamda betonun dayanıklılığını artırdığı belirtilmiştir. Bununla birlikte, atık lastiklerin betonda kullanımının, sürdürülebilir bir beton üretmek için kullanılabileceğini ve doğal agregalarda tasarruf sağlayabileceğini öne sürülmüştür (Rajan vd., 2020).

Gerçekleştirilen başka bir çalışmada ise 3B baskı beton malzemelerinin fiziksel ve mekanik özelliklerini incelemek için çeşitli deneyler ve analizler uygulanmıştır. Bu deneyler arasında, betonun yoğunluğunu belirlemek için hacim ağırlığı testi, basınç dayanımını belirlemek için basınç dayanımı testi, yalıtım özelliklerini belirlemek için ses geçirgenliği testi, malzemenin mikro yapısını incelemek için taramalı elektron mikroskobu (SEM) analizi ve X-ışını kırınımı analizi yer almaktadır. Ayrıca, malzemenin 3B baskı kalitesini belirlemek için, malzemenin ekstrüzyonu, katmanlar arası adezyon ve yapısal bütünlüğü gibi özellikleri değerlendirmek için bir takım basılabilirlik (printability) testleri yapılmıştır. Çalışma, lastik agregalarının betonun içindeki kumun yerini alabileceğini ve böylece atık lastiklerin geri dönüştürülmesine yardımcı olabileceğini göstermiştir. Bu sonuçlar, inşaat endüstrisinde sürdürülebilir malzeme kullanımı ve atık yönetimi açısından önemli bir adım olarak değerlendirilebilir. Kullanılan lastik agregaları, boyutları sırayla 0-1 mm boyutunda olan lastik tozu (rubber powder) ve 1-3 mm boyutunda olan lastik granülleri (rubber granules) olmak üzere iki çeşit olmak üzere kullanılmıştır (Shen vd., 2013).

Lastik agregalarının betonun mikro yapısında olumlu etkiler gösterdiği ve böylece malzemenin bazı dayanıklılık özelliklerini artırdığını gözlemlenmiştir. Lastiğin ikamesi, malzemenin porozitesini azaltarak ve gözenek boyutu dağılımını iyileştirerek malzemenin dayanıklılığını artırabileceği öne sürülmüştür. Ayrıca, lastik agregalarının

betonun elastisite modülünü azaltarak malzemenin deformasyon kapasitesini artırdığı ve malzemenin kırılma başarısızlığını önlediği de gösterilmiştir. Bu bulguların sonucunda, lastik agregalarının betonun dayanıklılık özelliklerini artırdığı sonucuna varılabilir (Shen vd., 2013).

Diğer çalışmada lastik atığının beton endüstrisinde kullanımının potansiyel faydalarını ve dikkat edilmesi gereken noktaları incelenmiştir. Ömrünü tamamlamış lastiklerin geri dönüştürülmesi yoluyla elde edilen polimer agregaların, 3B baskı beton malzemelerinin fiziksel, mekanik ve akustik özelliklerini nasıl etkilediğini incelenmiştir. Ayrıca, çalışma, lastik agregalarının betonun içindeki kumun yerini alabileceğini ve böylece atık lastiklerin geri dönüştürülmesine yardımcı olabileceğini göstermeyi amaçlamaktadır. Lastikler boyut olarak 0-1 mm boyutunda olan lastik tozu ve 1-3 mm boyutunda olan lastik granülleri halinde incelenmiştir. Yapılan deneyler ve SEM analizi sonucu lastik atığı içeren beton karışımlarında boşluk oranının azaldığı ve porozitenin azaldığı tespit edilmiştir. Bu durum, lastik atığının betonun dayanıklılığını artırabileceğini ve malzemenin mekanik özelliklerini olumlu yönde etkileyebileceğini göstermektedir. Ancak, lastik agregalarının betonun basınç ve eğilme dayanımlarını olumsuz yönde etkilediği belirlenmiştir. Basınç ve eğilme dayanımlarının azalması, lastik atığının betonun mekanik dayanımını düşürebileceğini ve betonun dayanıklılığını etkileyebileceğini göstermektedir. Ayrıca lastik kullanımının 3B betonda önemli etkileri arasında, malzemenin akıcılığını değiştirerek taze malzeme akıcılığını artırması ve basınçlı bir depo içindeki taze karışımın ekstrüzyonunu sağlamak için uygun yüzey nem koşullarını teşvik etmesi gibi önemli sonuçlar elde edilmiştir. Bu değişiklikler, malzemenin basılabilirliğini, inşa edilebilirliğini ve katmanlar arası yapışmayı etkileyerek malzemenin baskı kalitesini arttırabileceği öne sürülmüştür. Ancak, lastik atığının betonun mekanik özellikleri üzerindeki etkileri dikkatlice değerlendirilmeli ve optimize edilmelidir (Sambucci & Valente, 2021).

Çimento esaslı yapı malzemelerinden betonun bütünleşmiş mikroyapısı, hidrate olmuş çimento hamuru, kaba ve ince agrega ve arayüzey geçiş bölgesi (ITZ) olarak isimlendirilen agrega ve çimento hamuru arasındaki ara yüzeyden oluşur ve bu durum betonun mekanik özellikleri üzerinde önemli bir etki sahibidir (Öztürk, 2009). Bu durum ile lastik kauçuğu içeren betonun arasındaki ilişki ele alındığında, kauçuk lastik atığının mekanik öğütme düzeyinin lastik kauçuğu parçacıklarının yüzey yapısını

etkilediği gözlemlenmiştir. Daha iri polimer fraksiyonunun, en ince olanından daha küçük bir spesifik yüzey alanına sahip olduğu, bu durumun da çimentoyla daha zayıf bir tutunma kabiliyeti ve gözenekli arayüzey geçiş bölgeleri ile sonuçlandığı görülmüştür (Sambucci & Valente, 2021).

Yapılan bir çalışmaya göre, beton karışımlarında kauçuk lastik atığının kum ikamesi olarak kullanılması, numunelerin basınç dayanımını önemli ölçüde azalttığını belirlemiştir. Bununla birlikte, beton karışımına kırık lastik kauçuk eklenmesinin, beton ürünlerinin tahmin edilen donma-çözünme direncini arttırdığını gözlemlenmiştir. Test sonuçları, farklı yüzdelerde kırık lastik kauçuk eklemenin tahmin edilen donma-çözünme direnci üzerinde olumlu bir etkisi olduğunu göstermiştir; daha yüksek kırık lastik kauçuk yüzdelерinin donma-çözünme direncinde daha büyük iyileştirmelere yol açtığını ortaya koyulmuştur. Bu durum ile ilişkili olarak kırık lastik kauçuğunun kullanılması, toplam ve etkili gözenekliliği arttırdığından dolayı ve daha yüksek oranlarda kullanımın donma-çözünme özelliğini daha iyi etkilediğini öne sürülmüştür. Bununla birlikte, çalışma sonucu toplam ve etkili gözenekliliğin artması sonucu numunelerin ultrasonik darbe hızlarında azalma meydana gelmiştir. Özellikle, kırık lastik kauçukunun yüzdesinin artması, ultrasonik darbe hızındaki düşüşü artırmaktadır. Bu durum, kırık lastik kauçuğunun betonun ses iletim özelliklerini etkilediğini göstermektedir (Girskas & Nagrockienė, 2017).

İlgili diğer bir çalışmada, farklı boyutlardaki lastik parçacıklarının betona katılmasıyla gerçekleştirilmiştir. Donma-çözünme döngüsü testlerinde referans beton en düşük performans gösterirken kauçuk lastik parçaları içeren tüm beton örnekleri donma-çözünme dayanıklılığı açısından referans betondan daha iyi performans göstermiştir. Donma-çözünme sonrası basınç dayanımı testi, kauçuk boyutu 0,5 mm'den küçük olan betonun en yüksek dayanıma sahip olduğunu belirlendi, bu durum da bu setin en az miktarda yapısal hasara sahip olduğunu gösteriyor. Ek olarak araştırmalar, kauçuk parçacık boyutları küçüldükçe donma-çözünme direncinin arttığını ileri sürmüştür (Zeynep Savas vd., 1997.).

Sonuç olarak, ilgili çalışmaların da ışığında geri dönüşümlü malzemeleri ve yeni nesil inşaat yöntemlerini kullanarak daha iyi atık yönetimi uygulamaları geliştirmek ve daha sürdürülebilir, çevre dostu yapılar oluşturmanın mümkün olabildiği söylenebilir.

3. MATERİYAL VE YÖNTEMLER

3.1 Materyal

Çalışma kapsamında üretilen betonda kullanılan malzemeler ve bilgileri aşağıda ilgili bölümler halinde sıralanarak verilmiştir.

3.1.1 Çimento

Üretilen betonlarda bağlayıcı olarak Oyak Çimento firmasından tedarik edilen CEM I 42.5 R tipi Portland çimentosu kullanılmıştır. Bu çimentonun fiziksel ve mekanik özellikler Tablo 3.1’de, kimyasal özellikleri Tablo 3.2’de verilmiştir.

Tablo 3.1 Portland çimentosunun fiziksel ve mekanik özellikleri

İncelik (90 µ)	Blaine İnceliği (cm ² /g)	Özgül Ağırlık	Eğilme Dayanımı (MPa)	Priz Başlama süresi (Dk)	Basınç Dayanımı (MPa)
0.1	2919	3.12	7.88	186	55.8

Tablo 3.2 Portland çimentosunun kimyasal özellikleri

Bileşen (%)	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	SO ₃
Çimento	19,17	5,32	3,78	63,13	2,31	0,43	2,81

3.1.2 Agrega

Üretilen betonlarda Şekil 3.7’ de verilen kum ve taş unu-filler malzeme olmak üzere iki çeşit agrega kullanılmıştır. Kullanılan agregaların toplam agregadaki kullanım oranları ve bazı fiziksel özellikleri Tablo 1’de verilmiştir. Tane boyutu 0-4 mm arasında değişen kum ve taş ununa TS EN 933-1’e uygun elek analizi yapılarak

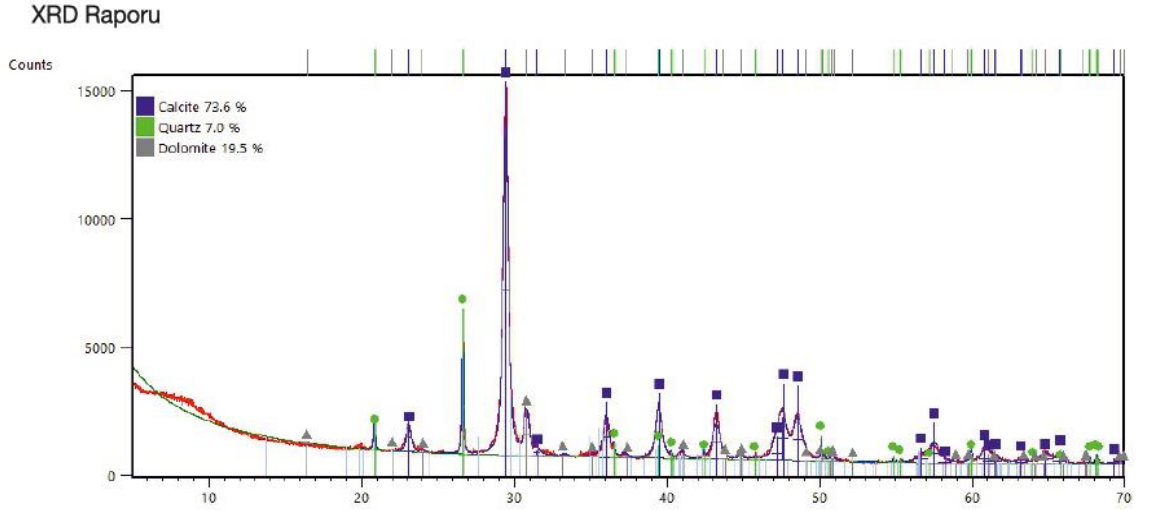
granümetrileri verilmiştir. Kumun ve taş ununun granülometri eğrileri sırasıyla Şekil sonucu granülometrik ve 2 'de verilmiştir. Kullanılan agregaların kimyasal analizleri firma tarafından yapılmış ve beton kullanımına uygun olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca taş unu-filler malzemenin XRD analizi Şekil 3.3'te verilmiştir.



Şekil 3.1 Taş Unu-Filler Malzeme Örnek Resim (<https://politamakine.com/filler-nedir/>)

Tablo 3.3 Taş Unu-Filler Malzeme Tane Boyutu Dağılım Tablosu

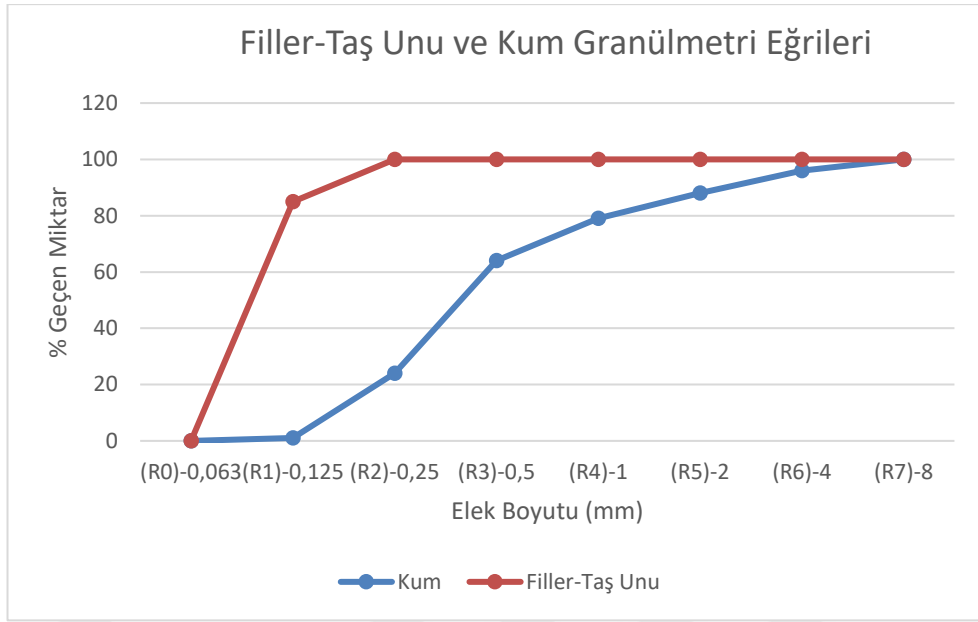
TANE BOYUTU DAĞILIMI (*)		İlgili Standard : TS EN 933-1:2012											
Analiz Yöntemi	Elekt Göz Açıklığı (mm)	Elekt Analizi (% Geçen)											
	Numune	31,5	22,4	16	11,2	8	5,6	4	2	1	0,500	0,250	0,125
Yaş eleme	Filler Agrega (Mikronize Dalga)	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	85



Şekil 3.3 Taş Unu-Filler Malzeme XRD Raporu

Tablo 3.4 Kumun elek analizi

Elek boyutu (mm)	% Geçen
(R7)-8	100
(R6)-4	96
(R5)-2	88
(R4)-1	79
(R3)-0,5	64
(R2)-0,25	24
(R1)-0,125	1
(R0)-0,063	0
TAVA (P)	0



Şekil 3.5 Filler-Taş Unu ve Kum Granülmetri Eğrileri

3.1.3 Polipropilen Lif

Çalışma kapsamında kullanılan polipropilen lifler Şekil 3.5'te verilmiştir. Asit direnci özelliğine sahip olan propilen lifler söz konusu betonun işlenebilirliğini, bazı durabilite özelliklerini ve kalitesini arttırmak amacıyla kullanılmıştır. İlgili liflerin fiziksel ve mekanik özellikleri Tablo 3.4' te verilmiştir.

Tablo 3.5 Polipropilen lifin fiziksel ve mekanik özellikleri

Kullanılan Lif Türü	Lif Boy (mm)	Uzama Miktarı (%)	Yüzey Alanı (m ² /kg)	Çekme Dayanımı (MPa)	Elastisite Modülü (MPa)	Birim Hacim Ağırlık (g/cm ³)
Polipropilen	12	20-25	140	467-548	4048-5674	0.91



Şekil 3.4 Polipropilen Lifler

3.1.4 Kauçuk Lastik Atığı

Bu çalışmada kauçuk lastik atığı, %10 oranında kum ile yer değiştirilerek kullanılmıştır. Yıldız Endüstri bünyesinde bulunan Orbay Lastik Geri Dönüşüm isimli firmadan elde edilen iki farklı boyut olmak üzere yaklaşık olarak 0.05 – 0.1 mm ve 1-1.5 mm boyutlarında işlenmiş kauçuk lastik atıkları kullanılmıştır.



Şekil 3.5 Çalışmada Kullanılan Lastik Atığı Örneği (0.05-0.1 mm)



Şekil 3.6 Çalışmada Kullanılan Lastik Atığı Örneği (1-1.5 mm)



Şekil 3.7 Farklı Boyutlarda İşlenmiş Örnek Kauçuk Lastik Atık Numuneleri

3.1.5 Kimyasal Katkı

Çalışma kapsamında kimyasal katkı olarak İSTON firmasına ait toz katkı kullanılmıştır. Beton üretiminde işlenebilirlike ek olarak pompolanabilirlik ve ekstrüzyon özelliklerinin iyileştirilmesi hedeflenmiştir. Kullanılan katkı ile betonun üretim aşamasında betonun pompada tıkanması engellenmiş ve sorunsuz beton üretimi gerçekleştirilmiştir. Çalışmada, priz hızlandırıcı, priz geciktirici, vizkozite düzenleyici ve akışkanlaştırıcı kullanılan ilgili kimyasal katkılardır.

3.1.6 Su

Beton üretiminde şehir şebeke suyu kullanılmıştır.

3.2 Yöntemler

Çalışma kapsamında iki ayrı beton karışımı belirlenmiştir. Her iki grupta sadece kauçuk lastik atığı değişken olmak üzere iki farklı karışım oranı hazırlanmıştır. Kauçuk lastik atığı ağırlıkça 10% oranında kum yerine ikame edilerek kullanılmıştır. Belirlenen karışım oranları Tablo 3.6’da verilmiştir.

Tablo 3.6 Üretilen Betonların Karışım Miktarları (g)

Set No	Set İsmi	Filler- Taş Unu	Çimento	Su	Kum	Kauçuk Lastik	Propilen Lif	Kimyasal Katkı
1	Referans	255 g	150 g	90 g	140 g	0 g	1 g	3 g
2	L-10	255 g	150 g	90 g	126 g	14 g	1 g	3 g



Şekil 3.8 İlgili Beton Harcının Hazne Mikserinde Karıştırılma İşlemi

Beton numuneler, bir 3B baskı makinesi aracılığıyla bu yöntemin uygulandığı aracı firma olan İSTON A.Ş’de imal edilmiştir. 3B baskı makinesi ile üretilen beton numunelere gerçekleştirilecek deney standartlarına uygun boyutların elde edilmesi

amacıyla kesme yöntemi belirlenmiştir. Yaklaşık 60x15x15 cm boyutunda üretilen bütün kirişlere kesim işlemi uygulanarak 10x10x10 cm olmak üzere kesilerek küp numuneler elde edilmiştir. Üretilen bu kiriş yaklaşık olarak 70-80 derece sıcaklıkta 3 saat buhar kürü işlemine tabi tutulmuştur. Ardından kesim işlemi yapılarak istenilen boyutlarda (10x10x10 cm) numuneler elde edilmiştir. Numuneler kesim öncesi ve sonrası görünüşleri ve 3B yazıcı işlemi süreçleri aşağıda olmak üzere gösterilmiştir. Kür ve kesim işlemi tamamlanan numunelerin kütlece su emme, donma-çözünme, asit dayanımı, sülfat dayanımı ve basınç dayanımı deneyleri tamamlanmıştır. Uygulanan deneyler ve standartlar ise Tablo 3.7’de verilmiştir. Son olarak ilgili deneylerin ardından mikroyapı incelemesi için SEM-EDX analizleri yapılmıştır.

Tablo 3.7 Yapılan Deneyler ve Standartlar

Yapılan Deneyler	Uygulanan Standartlar
Basınç Dayanımı	TS EN 1015-11
Kütlece Su Emme Deneyi	TS EN 1015-10
Donma-Çözünme Deneyi	ASTM C666
Asit Dayanımı Deneyi	ASTM C267
Sülfat Deneyi	ASTM C1012



Şekil 3.9 Çalışmada Kullanılan 3B Beton Yazıcısı



Şekil 3.10 İmalatı Tamamlanan Uzun Kirişin Boyut Ölçümü

3.2.1 Basınç Dayanım Testi

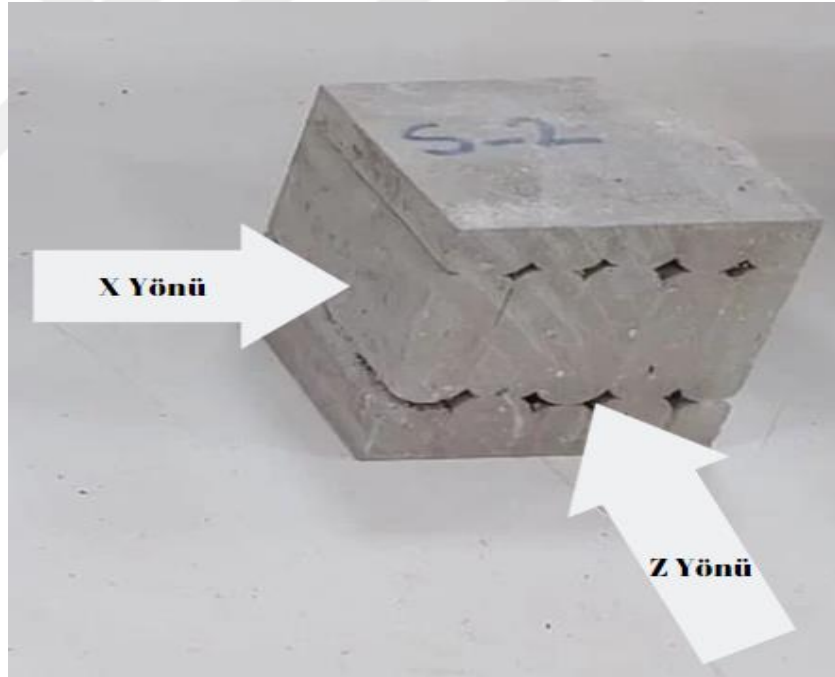
İmalatı ve kürü tamamlanmış numunelerin basınç dayanımını belirlemek amacıyla TS EN 1015-11 standartına uygun olarak basınç dayanım deneyleri uygulanmıştır. Numuneler 3B yazıcı ile imal edildiğinden dolayı oluşan katmanlar arası boşluğu da göz önünde bulundurmak amacıyla iki farklı yönden basınç dayanımı test edilmiştir. Bu durumdan dolayı ilgili yönler Şekil 3.13'te gösterilmiştir. Deneyde kullanılan cihaz ve numunelerin görüntüleri de aşağıda verilmiştir.



Şekil 3.11 İlgili Numunelerin Basınç Dayanım Testi Cihazı



Şekil 3.12 İlgili Numunelerin Basınç Dayanım Testi İşlemi



Şekil 3.13 İlgili Numunelere Uygulanan Basınç Kuvvetinin Yönleri



Şekil 3.14 3B Yazıcı ile Beton Basım İşlemi



Şekil 3.15 3B Yazıcı ile İmal Edilen Beton Kiriş Numune (60x15x15 cm)



Şekil 3.16 Kesim İşlemi Sonrası İmal Edilen Bazı Numuneler (10x10x10 cm)

Numunelerin imalatı tamamlandıktan sonra 3B baskı makinesinin ürettiği numuneler yapılacak deneylerin standartlarına uygun 10x10x10 cm boyutlarında parçalara ayrılıp numunelerin imalatı tamamlanmıştır. Üretilen betonların mekanik dayanımları ile dayanıklılık (durabilite) özellikleri belirlenmiştir. Mekanik dayanımların belirlenmesi amacıyla test edilecek tüm numuneler buhar kürüne tabi tutulmuştur. Buhar kürü uygulanmasının sebepleri 3B yazıcı ile üretilen beton için daha uygun olması ve daha fazla dayanım elde etmektir. Kürü tamamlanan numunelerin basınç dayanımı tespit edilmiştir. Ardından yapılacak su emme, asit dayanımı, sülfat dayanımı ve donma-çözünme deneyleri Tablo 2’de numune sayıları ile verilmiştir.

3.2.2 Asit Deneyi

Asit dayanımı deneyi için de numunelerin öncelikle ağırlığı tespit edilmiştir. Daha sonra numuneler 5%, oranında hazırlanan asit çözeltisinde bekletilmiştir. Asit sonrası numunelerin ağırlıkları ve basınç dayanımları tespit edilmiştir. Asit deneyi öncesi ve sonrası olmak üzere bu kayıplar yüzdece hesaplanmıştır ve ardından elde edilen veriler kıyaslanmıştır.



Şekil 3.17 Asite Maruz Kalmış Numunenin İşlem Sonrası Ağırlık Ölçümü

3.2.3 Sülfat Deneyi

Sülfat dayanımı deneyi için de asit deneyi ile neredeyse aynı bir süreçte ilerlenmiştir. Numunelerin öncelikle ağırlığı tespit edilmiştir. Daha sonra numuneler 5%, oranında hazırlanan sülfat çözeltisinde bekletilmiştir. Asit sonrası numunelerin ağırlıkları ve basınç dayanımları tespit edilmiştir. Sülfat deneyi öncesi ve sonrası olmak üzere bu kayıplar yüzdece hesaplanmıştır ve ardından elde edilen veriler kıyaslanmıştır.



Şekil 3.18 Kullanılan Magnezyum Sülfatın Tartılması

3.2.4 Su Emme Deneyi

Su emme deneyi için TS EN 1015-10'e uygun olacak şekilde etüvde 48 saat bekletilerek tamamen kuruması sağlanmıştır. Öncelikle numunelerin kuru haldeki ağırlıkları hassas terazi ile ölçülmüştür. Daha sonra 48 saat boyunca numunelerin tamamı suyun içerisinde olacak şekilde bekletilmiştir. Sudan çıkarılan numunelerin tekrardan ağırlıkları ölçülerek su emme kapasiteleri yüzdece hesaplanmıştır.

3.2.5 Donma-Çözünme Deneyi

Dış etkenlere maruz kalan beton malzemelerde hava sıcaklığındaki değişimlerle donma çözünme etkisi ile hasarlar meydana gelir. Bu hasarların nedeni betonun boşluklu yapısı ve bu boşukta bulunan suyun hacminin artarak sertleşmiş betonun bu hacim değişikliğine karşı koyamayarak çatlamasıdır. Hasarları önlemek için üretim aşamasında beton malzemelerin içine kimyasal katkı malzemeleri kullanılmaktadır. 28 günlük 10x10x10 cm boyutlu numuneler donma-çözünme deneyine tabi tutulmuştur. Bu kapsamda ilgili numuneler Şekil. 3.19'da görüldüğü üzere -25°C'de donma, +25°C'de çözünme deneyi uygulanmak üzere iklimlendirme kabinine koyulmuştur. Numuneler 50. donma çözünme devrinden sonra basınç dayanımı deneyine tabi

tutulmuştur. Deney numuneleri üzerinde 50. Devir sonunda basınç dayanımları test edilip sonuçlar belirlenmiştir.



Şekil 3.19 Donma Çözünme Deneyi için Kullanılan İklimlendirme Kabini



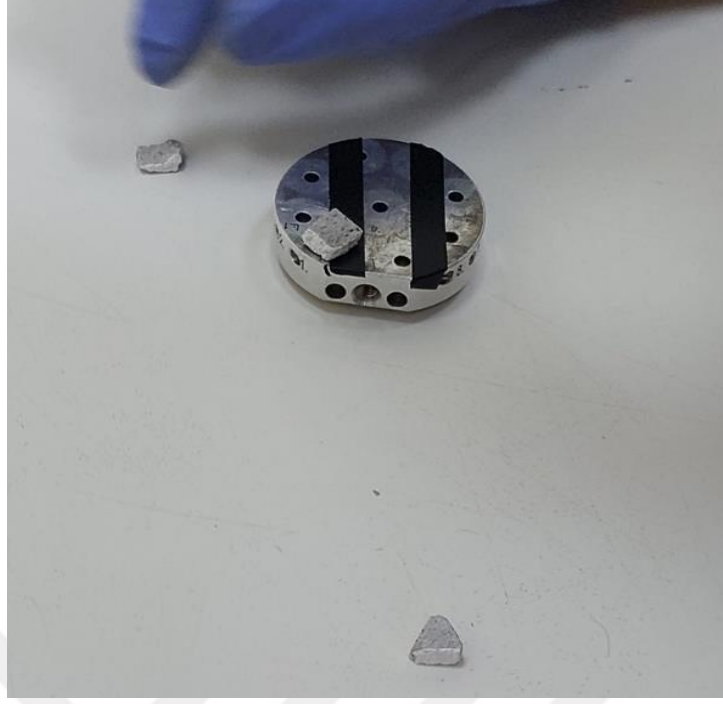
Şekil 3.20 İklimlendirme Kabini ve İçeri Numunelerin Yerleştirilmesi

3.2.6 SEM-EDX

İlgili numunelerin SEM (taramalı elektron mikroskobu) analizi ile mikro yapıları incelenmiştir. Bu analizler ile betonun kauçuk lastik atığı ilavesinde boşluk yapısındaki değişim incelenmiştir. Elde edilen SEM görüntüleri ile mekanik ve durabilite deneyleri sonucunda elde edilen verilerin yorumlanması açısından fayda sağlanmıştır. Bu analizde kullanılmak üzere sülfat ve asit deneylerine tabi tutulan numuneler seçilmiştir. Bunun sebebi ise ilgili numunelerin dış katmanlarında tuz oluşumu ve benzeri durumların mikroyapısal olarak detaylı incelenecek olmasıdır. SEM-EDX analizi kapsamında daha detaylı ve kaliteli olarak inceleme yapılabilmesi için asit ve sülfata maruz kalmış numunelerin dış yüzeylerinden kırılarak bir parça üzerinde işlem gerçekleştirilmiştir. Tuzlanma ve bozulmalar dış yüzeydedaha yoğun bir vaziyette bulunduğundan dolayı analiz ve mikroyapı inceleme için daha uygun bir yöntem olmaktadır.



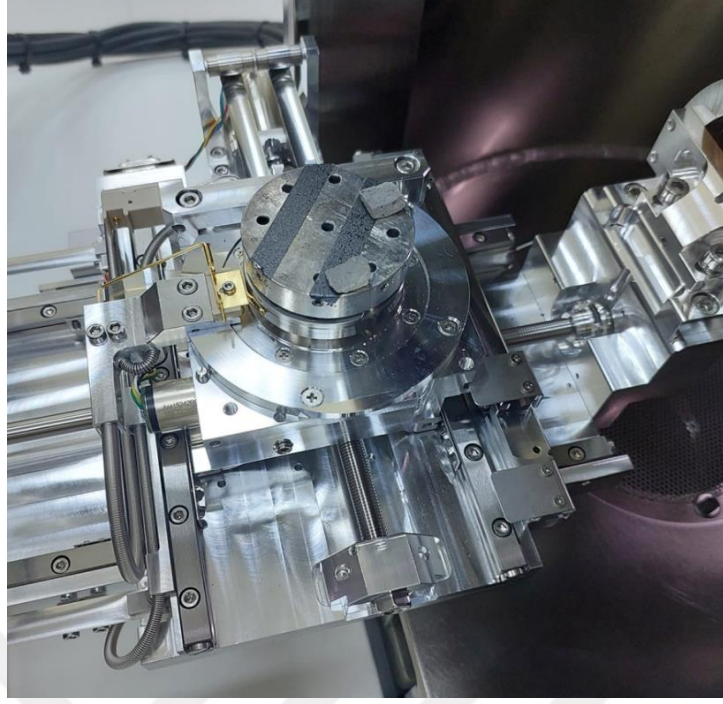
Şekil 3.21 ve 3.22 Sülfat ve Asit Deneyleri Sonucu Kırık Örnek Alınan Numuneler



Şekil 3.23 SEM-EDX Analizi için Hazırlanan Kırık Yüzey Numune



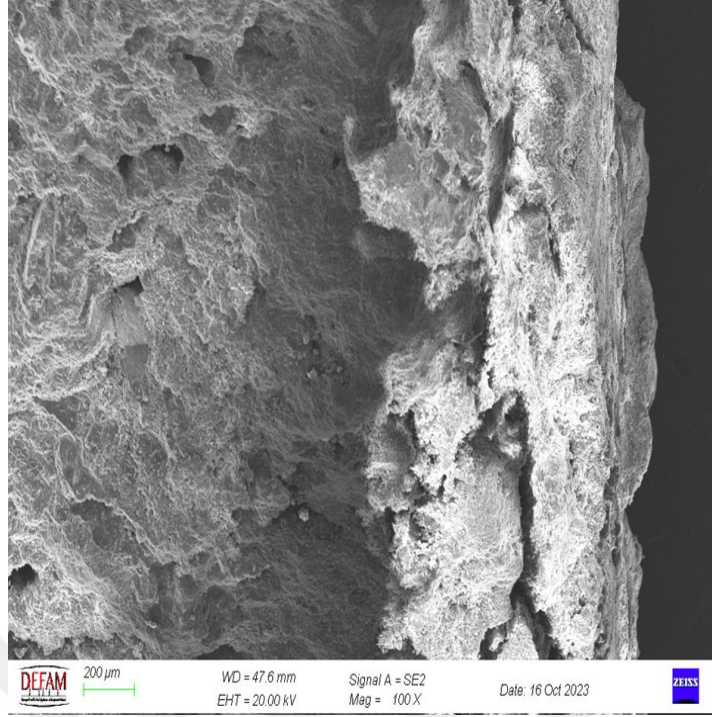
Şekil 3.24 SEM-EDX Analizi için Kırık Yüzey Numune Hazırlanması



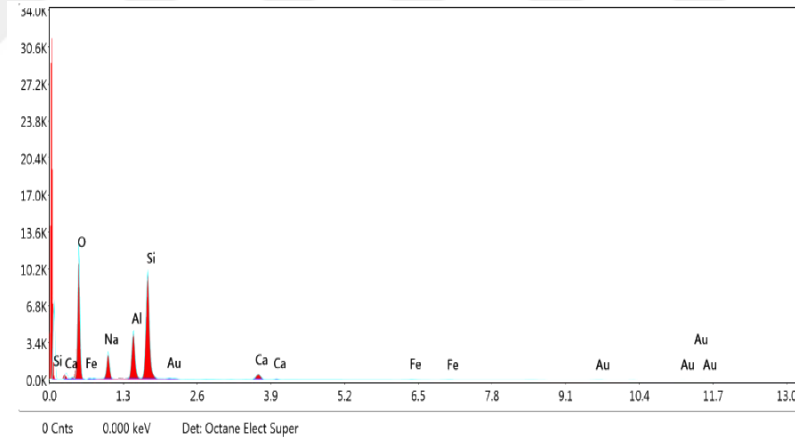
Şekil 3.25 SEM-EDX Analiz Cihazına İlgili Numunelerin Yerleştirilmesi



Şekil 3.26 SEM-EDX Öncesi İlgili Numunelerin Vakumlanması ve Kaplanması



Şekil 3.27 SEM Analizi Sonucu Elde Edilen Örnek SEM Görüntüsü
(Referans-Asit Deneyi Numunesi)



Smart Quant Results

Element	Weight %	Atomic %	Net Int.	Error %	Kratio	Z	A	F
O K	48.76	62.85	3497.48	7.72	0.1885	1.0596	0.3648	1.0000
NaK	10.10	9.07	826.55	7.99	0.0390	0.9636	0.4002	1.0014
AlK	10.84	8.29	1689.31	5.44	0.0643	0.9443	0.6263	1.0034
SiK	24.61	18.07	4031.45	4.87	0.1557	0.9652	0.6546	1.0012
CaK	2.39	1.23	260.43	5.12	0.0204	0.9120	0.9210	1.0154
FeK	0.56	0.21	37.24	11.96	0.0050	0.8135	0.9997	1.0938
AuL	2.74	0.29	24.11	30.94	0.0158	0.5437	1.0446	1.0145

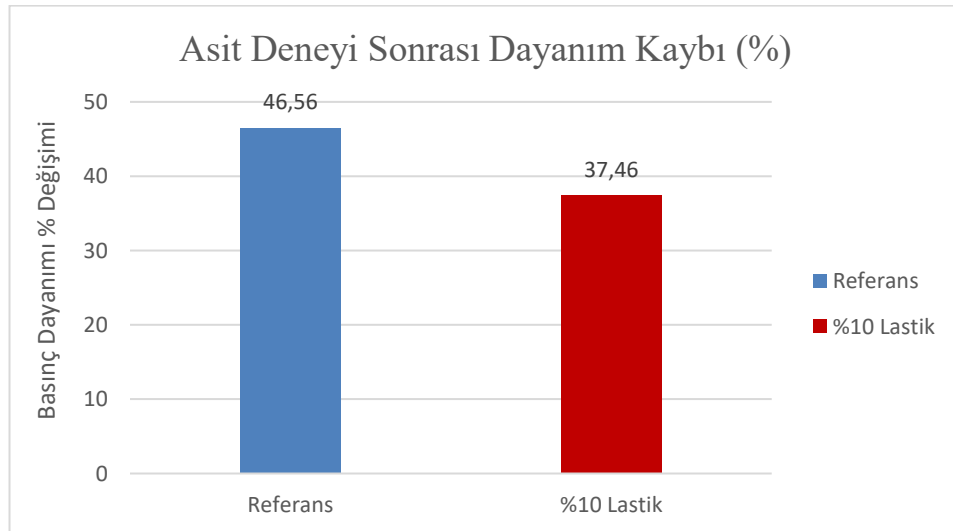
Şekil 3.28 Referans Numunesi Örnek SEM-EDX Analizi Sonucu

4. ARAŞTIRMA BULGULARI

28 günlük numunelerin 30 gün asit ve sülfat deneyi sonucunda elde edilen numuneler üzerinde yapılan basınç dayanımı sonuçları bulunmaktadır. Standart betonun birim hacim yoğunluğu $2,4 \text{ g/cm}^3$ iken çalışmada imal edilen betonların birim hacim yoğunlukları referans numune ve lastikli numune olarak sırasıyla $1,833 \text{ g/cm}^3$ ve $1,623 \text{ g/cm}^3$ olmaktadır. Ardından ilgili deneyler sonucu elde edilen sonuçların grafikleri aşağıda gösterilmiştir. İlk olarak hiçbir işleme tabi tutulmayan numunelerin basınç dayanım testleri ele alındığı zaman, Referans numune 30,8 MPa dayanım, %10 kauçuk lastik atığı içeren numune ise 27,2 MPa olarak Referans numuneye göre daha düşük değerde bir dayanım göstermektedir. Ardından asit deneyine tabi tutulan numunelerin basınç dayanım testleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen veriler Tablo 4.1’de olmak üzere aşağıda verilmiştir.

Tablo 4.1 Asit Deneyi Numuneleri Basınç Dayanım Değerleri Tablosu (N/mm^2)

Numune	Asit Öncesi Dayanım	Asit Sonrası Dayanım -1	Asit Sonrası Dayanım -2	Asit Sonrası Dayanım -3	Asit Sonrası Dayanım -Ort.
Referans	30,8	17,72	19,43	12,22	16,46
%10 Lastik	27,2	13,84	18,57	18,63	17,01

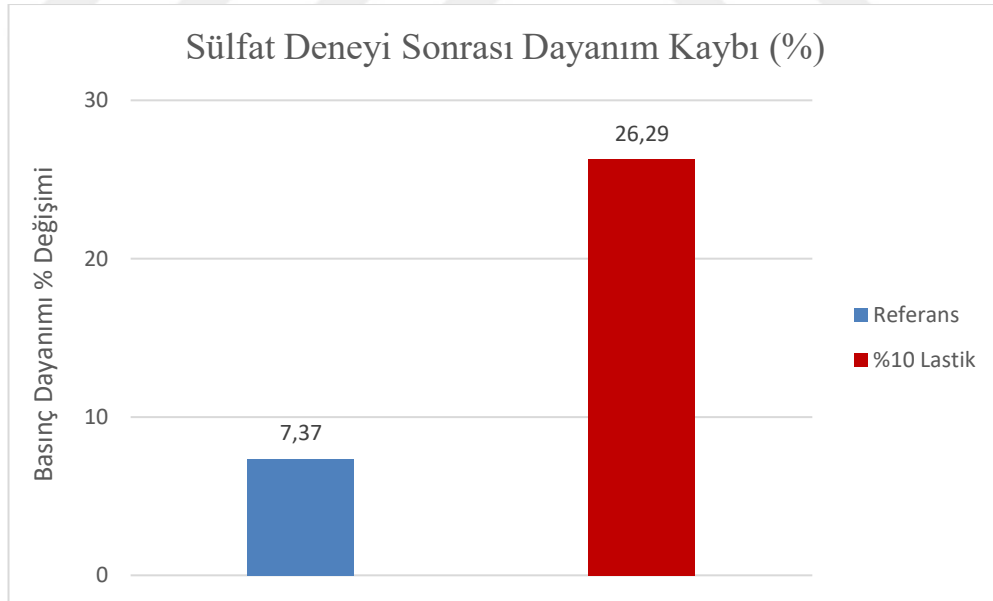


Şekil 4.1 Asit Deneyi Numuneleri Yüzdece Basınç Dayanım Kayıpları

30 gün boyunca %5 asit çözeltilerinde bekleyen numunelerin verdiği sonuçlara göre; numunelerde asit deneyi sonrasında numunelerin basınç dayanım değerlerinde azalma gözlenmiştir. Ancak Referans numunelerde bu azalma %10 kauçuk lastik atığı içeren L-10 numunelerdekine kıyasla daha fazladır. Referans numunelerde 30,8 MPa'dan 16,46 MPa'ya bir düşüş söz konusudur. L-10 numunelerinde ise 27,2 Mpa'dan 17,01 MPa'ya bir düşüş gerçekleşmiştir. Bu değişim yüzde olarak Referans ve L-10 numunelerinde sırasıyla %43,60 ve %19,82 olarak gözlemlenmiştir. Bu değişim yüzde olarak Referans ve L-10 numunelerinde sırasıyla %46,56 ve %37,46 olarak gerçekleşmiştir.

Tablo 4.2 Sülfat Deneyi Numuneleri Basınç Dayanım Değerleri (N/mm²)

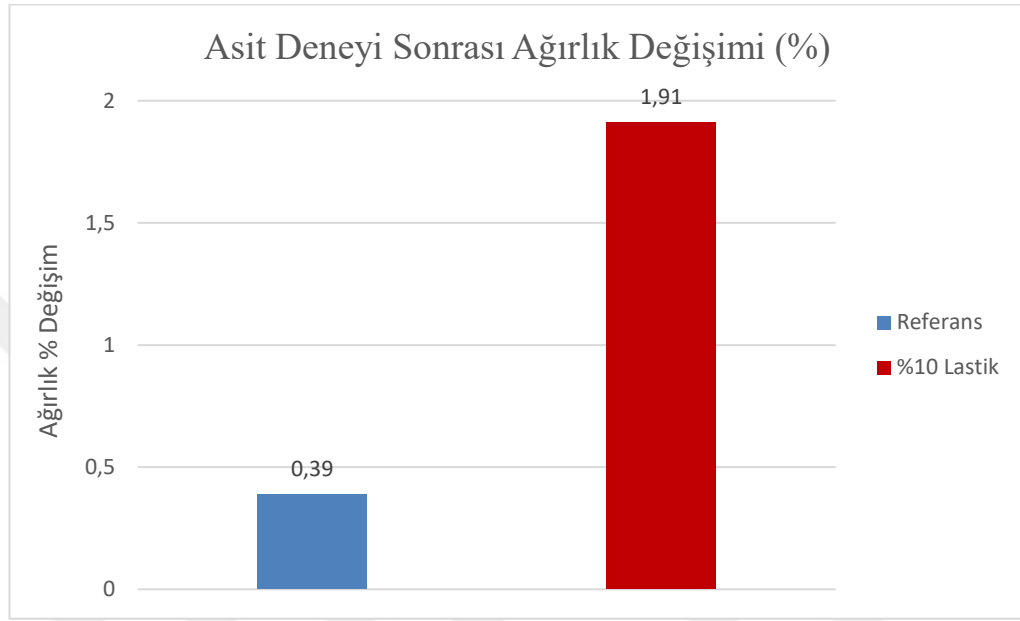
Numune	Sülfat Öncesi Dayanım	Sülfat Sonrası Dayanım -1	Sülfat Sonrası Dayanım -2	Sülfat Sonrası Dayanım-Ort.
Referans	30,8	37,06	20,00	28,53
%10 Lastik	27,2	17,49	22,6	20,05



Şekil 4.2 Sülfat Deneyi Numuneleri Yüzdece Basınç Dayanım Kayıpları

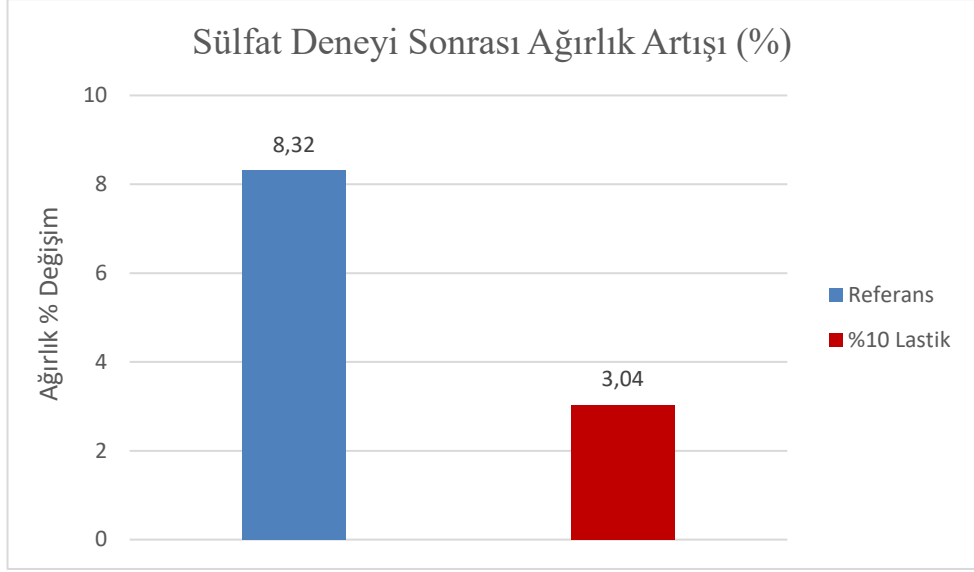
30 gün boyunca %5 sülfat çözeltilerinde bekleyen numunelerin verdiği sonuçlara göre; numunelerde sülfat deneyi sonrasında numunelerin basınç dayanım değerlerinde azalma gözlenmiştir. Ancak %10 kauçuk lastik atığı içeren L-10 numunelerinde bu

azalma Referans numunelerdekine kıyasla daha fazladır. Referans numunelerde 30,8 MPa'dan 28,53 MPa'ya bir düşüş söz konusudur. %10 lastik atık içeren L-10 numunelerinde ise 27,2 Mpa'dan 20,05 MPa'ya bir düşüş görülmektedir. Bu değişim yüzde olarak Referans ve L-10 numunelerinde sırasıyla %7,37ve %26,29 olarak gözlemlenmiştir.



Şekil 4.3 Asit Deneyi Sonrası Yüzdece Ağırlık Değişimi

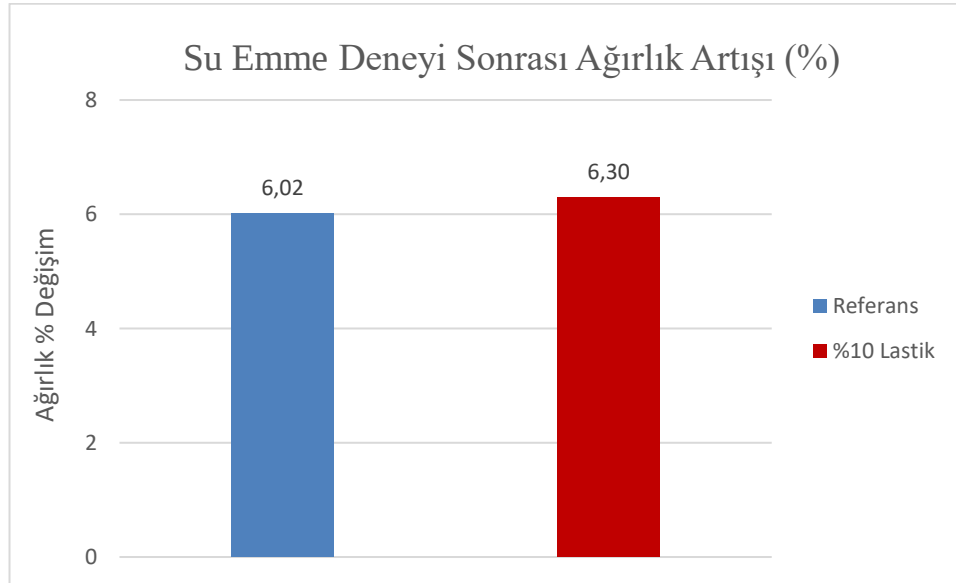
30 gün boyunca %5 asit çözeltilerinde bekleyen numunelerin verdiği sonuçlara göre; numunelerde asit deneyi sonrasında numunelerin ağırlıklarında artış gözlenmiştir. Ancak %10 kauçuk lastik atığı içeren L-10 numunelerinde bu artış Referans numunelerdekine kıyasla daha fazladır. Referans numunelerde yaklaşık %0,39 L-10 numunelerinde ise yaklaşık %1,91 oranında bir artış mevcuttur.



Şekil 4.4 Sülfat Deneyi Sonrası Yüzdece Ağırlık Artışı

30 gün boyunca %5 sülfat çözeltilerinde bekleyen numunelerin verdiği sonuçlara göre; numunelerde sülfat deneyi sonrasında numunelerin ağırlıklarında artış gözlenmiştir.

Referans numunelerinde bu artış %10 kauçuk lastik atığı içeren L-10 numunelerine kıyasla daha fazladır. Referans numunelerde yaklaşık %8,32 L-10 numunelerinde ise yaklaşık %3,04 oranında bir artış gözlemlenmiştir.

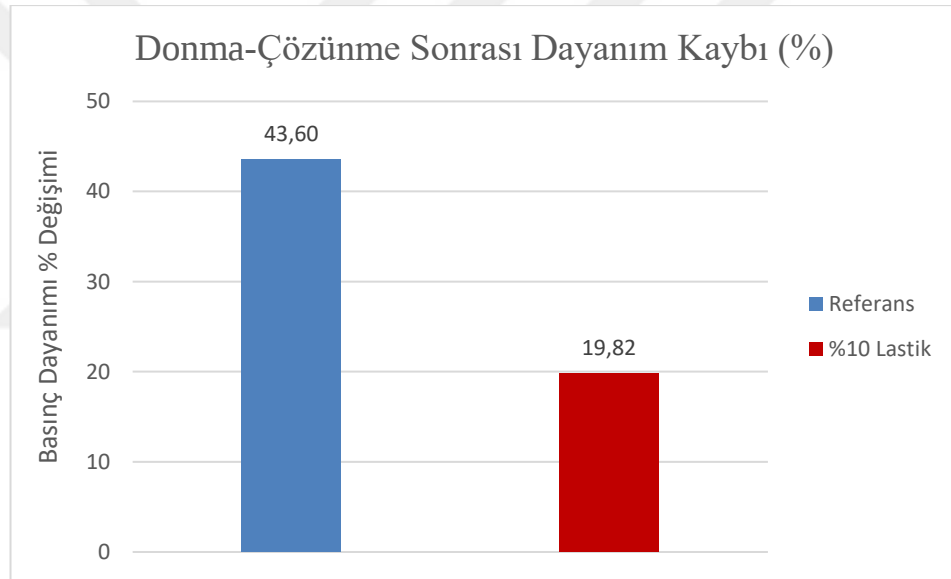


Şekil 4.5 Su Emme Deneyi Sonrası Yüzdece Ağırlık Artışı

Yapılan su emme deneyi sonucu, 28 gün suda bekletilen numunelerden alınan sonuca göre; Referans numunelerinde oluşan ağırlık artışı, L-10 numunelerine kıyasla daha az olmaktadır. Referans numunelerinde bu değer yaklaşık %6,02 iken L-10 numunelerinde bu değer yaklaşık %6,3 olarak gözlemlenmiştir.

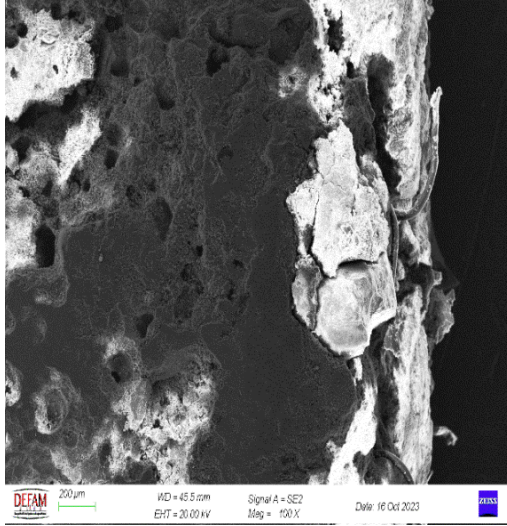
Tablo 4.3 Donma-Çözünme Numuneleri Basınç Dayanım Değerleri (N/mm²)

Numune	D/Ç Öncesi	D/Ç Sonrası-1	D/Ç Sonrası-2	D/Ç Sonrası Ort.
Referans	30,8	17,37	23,85	19,59
%10 Lastik	27,2	21,81	28,99	26,42

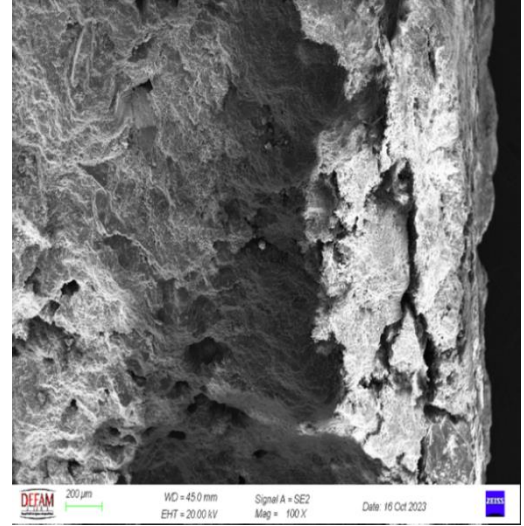


Şekil 4.6 Donma-Çözünme Numuneleri Yüzdece Basınç Dayanımı Kayıpları

Donma çözünme deneyi sonrası elde edilen verilere göre; numunelerde donma çözünme deneyi sonrasında numunelerin basınç dayanım değerlerinde azalma gözlenmiştir. Ancak Referans numunelerde bu azalma %10 kauçuk lastik atığı içeren L-10 numunelerdekine kıyasla daha fazladır. Referans numunelerde 30,8 MPa'dan 19,59 MPa'ya bir düşüş söz konusudur. L-10 numunelerinde ise 27,2 Mpa'dan 26,42 MPa'ya bir düşüş gerçekleşmiştir. Bu değişim yüzde olarak Referans ve L-10 numunelerinde sırasıyla %43,60 ve %19,82 olarak gözlemlenmiştir.



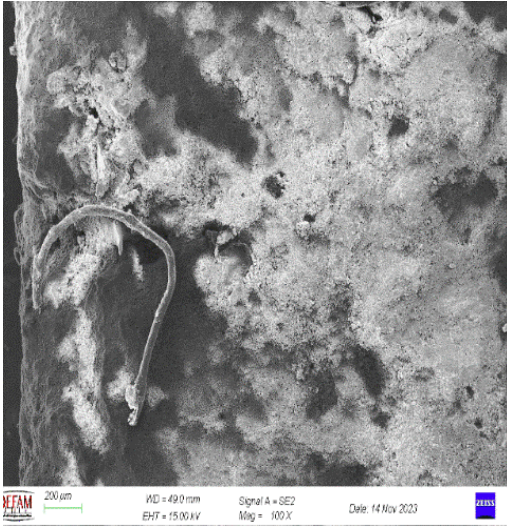
(a)



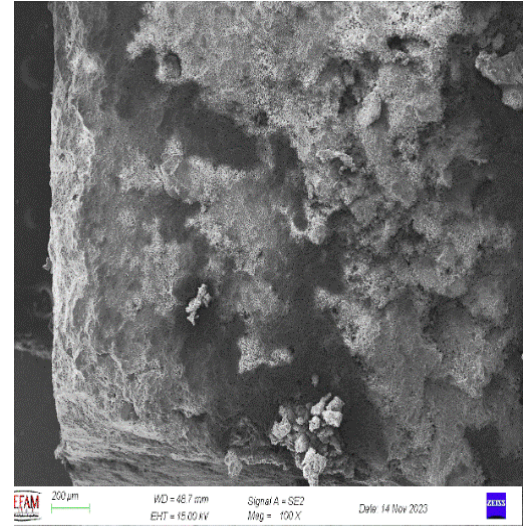
(b)

Şekil 4.7(a) L-10 ve Şekil 4.8(b) Referans Numuneleri Asit Deneyi Sonrası SEM Görüntüleri-100X/20kV

Referans numunesinin görüntüsünde(b) gözlemlendiği üzere asit etkisinin ve penetrasyonunun Referans numunesine göre daha yüksek olduğu sonucuna varılmıştır.



(a)



(b)

Şekil 4.9(a) L-10 ve 4.10(b) Referans Numunelerin Sülfat Deneyi Sonrası SEM Görüntüleri-100X/15kV

L-10 numunesinin görüntüsünde(a) gözlemlendiği üzere sülfat etkisinin ve penetrasyonunun Referans numunesine göre daha yüksek olduğu sonucuna varılmıştır.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Asit ve sülfat deneyinde numunelerin ilgili çözeltilerde bekletilmesi sonucu oluşan değişimler gerçekleşmiştir. İlgili numunelerin yüzeylerinde beyaz lekelenmeler ve bozulmalar meydana geldiği gözlenmiştir.

Kauçuk lastik atığı ile imal edilen numunelerin, asit ve sülfat deneyleri sonucu Referans numunelerden daha düşük dayanım gösterdikleri belirlenmiştir. Ayrıca sülfata maruz bırakılan numunelerin gösterdikleri dayanım, asite maruz kalmış numunelerin dayanımından yüksektir. Ancak, kauçuk lastik atığı içeren numunelerin asit deneyi sonucunda kaybettikleri dayanım miktarı, referans numunelerin kaybettikleri dayanımdan daha az bir seviyede gerçekleşmiştir. Bu durumda lastik atığı kullanımının betonun asite karşı direncini geliştirdiği sonucuna varılmaktadır.

Su emme deneyi sonucunda kauçuk lastik atığı içeren numunelerde, kauçuk lastik atığının betonun iç yapısındaki boşlukları dolduracağından ve su itici özelliği olan bir malzeme olduğundan dolayı daha az ağırlık artışı beklenmesine rağmen, Referans numunelere kıyasla daha fazla ağırlık artışı göstermiştir. Bu durumda 3 boyutlu yazıcı yöntemiyle üretilen beton ile kauçuk lastik atığı arasındaki aderansın da önemli bir etkileyici faktör olduğunu göstermektedir.

Donma çözünme deneyi sonucunda kauçuk lastik atığı içeren numuneler, referans numunelere göre daha az dayanım kaybı göstermişlerdir. Asit deneyi sonucuna benzer bir şekilde kauçuk lastik atığı içeren numuneler donma çözünme işlemi sonucunda daha az dayanım kaybetmişlerdir. Bundan yola çıkarak, kauçuk lastik atığı kullanımının, betonun donma çözünme etkisine karşı direnç özelliğini geliştirdiği sonucuna varılmaktadır.

Asit deneyi sonucunda genellikle uygulama sonrası ağırlık kaybına rastlanmasına rağmen bu çalışmada 3 boyutlu baskı ile üretilen numunelerde ağırlık artışı gerçekleşmiştir. Bu artışın, betonun imalat yönteminden kaynaklı olarak oluşan katmanlar arası boşlukları, asit ile betonun tepkimesi sonucu oluşan tuzların doldurması ile gerçekleştiği sonucuna varılmaktadır.

Asit deneyinde kullanılan numunelerin SEM görüntülerinin verdiği sonuca göre, asit etkisi ve penetrasyonunun kauçuk lastik atığı içeren numunelerde daha az olduğu gözlemlenmektedir. İlgili deney sonrası basınç dayanım sonuçları ele alındığında bu çıkarım desteklenmektedir.

Sülfat deneyinde kullanılan numunelerin SEM görüntülerinin verdiği sonuca göre, sülfat etkisi ve penetrasyonunun kauçuk lastik atığı içermeyen Referans numunelerde daha az olduğu gözlemlenmiştir. İlgili deney sonrası dayanım sonuçları ele alındığında bu çıkarım desteklenmektedir.

Üç boyutlu yazıcı yöntemi ile daha yüksek dayanımlı ve kaliteli beton elde edilmesi için üç boyutlu basım sürecinin optimal ilerlemesi, 4 filament arası boşlukların azaltılması ve sürece daha uygun harç imal edilmesi noktalarında iyileştirilmeler yapılması gerekmektedir. Karışımın reolojik özellikleri geliştirilerek betonun mukavemeti arttırılıken bir yandan baskıya daha uygun ve işlenebilir hale getirilebilir. Uygun malzeme seçimi, liflerin ve yapı kimyasallarının kullanılması bu durumun çözülmesine katkı sağlamaktadır.

KAYNAKLAR

- Adesina, A. (2019). Durability enhancement of concrete using nanomaterials: An overview. *Materials Science Forum*, 967 MSF, 221-227. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.967.221>
- Al-Akhras, N. M., & Smadi, M. M. (2004). Properties of tire rubber ash mortar. *Cement and Concrete Composites*, 26(7), 821-826. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2004.01.004>
- Angelin, A. F., Lintz, R. C. C., Gachet-Barbosa, L. A., & Osório, W. R. (2017). The effects of porosity on mechanical behavior and water absorption of an environmentally friendly cement mortar with recycled rubber. *Construction and Building Materials*, 151, 534-545. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.06.061>
- Anell, L. H. (2015). Concrete 3D Printer.
- ASTM, A. (2008). C666/C666M-03 Standard Test Method for resistance of concrete to rapid freezing and thawing. ASTM.
- ASTM C1012, Standard Test Method for Length Change of Hydraulic-Cement Mortars Exposed to a Sulfate Solution., West Conshohocken, PA (2013)
- ASTM C267. Standard test methods for chemical resistance of mortars, grouts, and monolithic surfacings and polymer concretes. West Conshohocken, PA: American Society for Testing and Materials: (ASTM) International; 2001.
- Attiogbe, E. K., & Rizkalla, S. H. (1988). Response of Concrete to Sulfuric Acid Attack.
- Buswell, R. A., Leal de Silva, W. R., Jones, S. Z., & Dirrenberger, J. (2018). 3D printing using concrete extrusion: A roadmap for research. *Çinde Cement and Concrete Research* (C. 112, ss. 37-49). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.05.006>
- DEMİREL, S., & ÖZ, H. Ö. (2017). Effect of Waste Materials on Performance of Self Compacting Concrete. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 20(3), 40-48. <https://doi.org/10.17780/ksujes.309442>
- Erdem Çerçevik, A., Cengiz Toklu, Y., Yerel Kandemir, S., & Özgür Yaylı Geliş Tarihi, M. (2018). 3B Beton Üretimi İçin Mermer Tozu ve Seramik Artıklarının Kullanılmasının Araştırılması. *Çinde Sdu International Journal Of Technological Science* (C. 10, Sayı 2).

- Enstitüsü, T. S. (2012). TS EN 933-1: 2012 (EN): Agregaların geometrik özellikleri için deneyler bölüm 1: Tane büyüklüğü dağılımı tayini-Eleme metodu. Ankara: Türk Standardları Enstitüsü.
- Enstitüsü, T. S. (2020). TS EN 1015-11: Kâgir harcı-deney yöntemleri-bölüm 11: sertleşmiş harcın eğilmede çekme ve basınç dayanımının tayini. TSE, Ankara.
- EN, T. 1015-10 (2001). Kâgir Harcı-Deney Metotları-Bölüm, 10.
- Fares, G., Albaroud, M. H., & Khan, M. I. (2019). Fine limestone dust from ornamental stone factories: A potential filler for a high-performance cementitious matrix. *Construction and Building Materials*, 224, 428-438. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.07.027>
- Fattuhi, N. I., & Hughes, B. P. (1988). The Performance Of Cement Paste And Concrete Subjected To Sulphuric Acid Attack Abstract. *İçinde Cement And Concrete Research* (C. 18).
- Figueiredo, S. C., Rodríguez, C. R., Ahmed, Z. Y., Bos, D. H., Xu, Y., Salet, T. M., Çopuroglu, O., Schlangen, E., & Bos, F. P. (2020). Mechanical behavior of printed strain hardening cementitious composites. *Materials*, 13(10). <https://doi.org/10.3390/ma13102253>
- Girskas, G., & Nagrockienė, D. (2017). Crushed rubber waste impact of concrete basic properties. *Construction and Building Materials*, 140, 36-42. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.02.107>
- Gupta, T., Chaudhary, S., & Sharma, R. K. (2014). Assessment of mechanical and durability properties of concrete containing waste rubber tire as fine aggregate. *Construction and Building Materials*, 73, 562-574. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.09.102>
- Güneyisi, E., Gesoğlu, M., & Özturan, T. (2004). Properties of rubberized concretes containing silica fume. *Cement and Concrete Research*, 34(12), 2309-2317. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.04.005>
- Horoz, A. (2020). Harran Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi Şanlıurfa Yöresinde Bulunan Kalker Ocaklarında Atıl Durumdaki Elenmiş Malzemelerin (Taş Unu) Taze Ve Sertleşmiş Betona Etkisi.
- Hou, S., Duan, Z., Xiao, J., & Ye, J. (2021). A review of 3D printed concrete: Performance requirements, testing measurements and mix design. *İçinde Construction and Building Materials* (C. 273). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121745>
- Karagözoğlu, M. B., Özyonar, F., Yılmaz, A., & Atmaca, E. (2009). Katı atıkların yeniden kazanımı ve önemi. *Türkiye’de katı atık yönetimi sempozyumu*, (s 2).

- Köroğlu, M. A. (2016). Mechanical Characterization of Recycled Tires in Concrete. *Selcuk University Journal of Engineering, Science and Technology*, 4(4), 330-330. <https://doi.org/10.15317/scitech.2016.62>
- Kristiawan, R. B., Imaduddin, F., Ariawan, D., Ubaidillah, & Arifin, Z. (2021). A review on the fused deposition modeling (FDM) 3D printing: Filament processing, materials, and printing parameters. *İçinde Open Engineering* (C. 11, Sayı 1, ss. 639-649). De Gruyter Open Ltd. <https://doi.org/10.1515/eng-2021-0063>
- Kristombu Baduge, S., Navaratnam, S., Abu-Zidan, Y., McCormack, T., Nguyen, K., Mendis, P., Zhang, G., & Aye, L. (2021). Improving performance of additive manufactured (3D printed) concrete: A review on material mix design, processing, interlayer bonding, and reinforcing methods. *İçinde Structures* (C. 29, ss. 1597-1609). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2020.12.061>
- Le, T. T., Austin, S. A., Lim, S., Buswell, R. A., Law, R., Gibb, A. G. F., & Thorpe, T. (2012). Hardened properties of high-performance printing concrete. *Cement and Concrete Research*, 42(3), 558-566. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2011.12.003>
- Liu, B., Xie, Y., & Li, J. (2005). Influence of steam curing on the compressive strength of concrete containing supplementary cementing materials. *Cement and Concrete Research*, 35(5), 994-998. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.05.044>
- Mather, B. (2004). Concrete durability. *Cement and Concrete Composites*, 26(1), 3-4. [https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(02\)00122-1](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(02)00122-1)
- Mikula, K., Skrzypczak, D., Izydorczyk, G., Warchoł, J., Moustakas, K., Chojnacka, K., & Witek-Krowiak, A. (2020). 3D printing filament as a second life of waste plastics-a review. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-10657-8>/Published
- Mohan, M. K., Rahul, A. V., De Schutter, G., & Van Tittelboom, K. (2021). Extrusion-based concrete 3D printing from a material perspective: A state-of-the-art review. *Cement and Concrete Composites*, 115. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2020.103855>
- Mohan, M. K., Rahul, A. V., van Dam, B., Zeidan, T., De Schutter, G., & Van Tittelboom, K. (2022). Performance criteria, environmental impact and cost assessment for 3D printable concrete mixtures. *Resources, Conservation and Recycling*, 181. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2022.106255>
- Najim, K. B., & Hall, M. R. (2010). A review of the fresh/hardened properties and applications for plain- (PRC) and self-compacting rubberised concrete (SCRC). *İçinde Construction and Building Materials* (C. 24, Sayı 11, ss. 2043-2051). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.04.056>

- Qin, Y. (2022). The development and application of 3d printing technology.
- Neville, A. M. (1995). Properties of concrete (Vol. 4, p. 1995). London: Longman.
- Rajan, R. G., Sakthieswaran, N., & Babu, O. G. (2020). Experimental investigation of sustainable concrete by partial replacement of fine aggregate with treated waste tyre rubber by acidic nature. *Materials Today: Proceedings*, 37(Part 2), 1019-1022. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.06.279>
- Rubio, M., Sonebi, M., Rubio, M., & Amziane, S. (2017). EcoGRAFI Second International Conference on Bio-based Building Materials 3D Printing Of Fibre Cement-Based Materials: Fresh And Rheological Performances. <https://www.researchgate.net/publication/338127120>
- Sambucci, M., & Valente, M. (2021). Influence of waste tire rubber particles size on the microstructural, mechanical, and acoustic insulation properties of 3d-printable cement mortars. *Civil Engineering Journal (Iran)*, 7(6), 937-952. <https://doi.org/10.28991/cej-2021-03091701>
- Senin, M. S., Shahidan, S., Leman, A. S., & Hannan, N. I. R. R. (2016). Properties of Cement Mortar Containing Rubber Ash as Sand Replacement. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 160(1). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/160/1/012055>
- Shahrubudin, N., Lee, T. C., & Ramlan, R. (2019). An overview on 3D printing technology: Technological, materials, and applications. *Procedia Manufacturing*, 35, 1286-1296. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2019.06.089>
- Shen, W., Shan, L., Zhang, T., Ma, H., Cai, Z., & Shi, H. (2013). Investigation on polymer-rubber aggregate modified porous concrete. *Construction and Building Materials*, 38, 667-674. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.09.006>
- Su, A., & Al'Aref, S. J. (2018). History of 3D printing. *İçinde 3D Printing Applications in Cardiovascular Medicine* (ss. 1-10). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803917-5.00001-8>
- Tay, Y. W. D., Panda, B., Paul, S. C., Noor Mohamed, N. A., Tan, M. J., & Leong, K. F. (2017). 3D printing trends in building and construction industry: a review. *İçinde Virtual and Physical Prototyping* (C. 12, Sayı 3, ss. 261-276). Taylor and Francis Ltd. <https://doi.org/10.1080/17452759.2017.1326724>
- Topçu, İ. B., & Unverdi, A. (2018). Scrap tires/crumb rubber. *Waste and Supplementary Cementitious Materials in Concrete: Characterisation, Properties and Applications*, 51-77. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102156-9.00002-X>
- Öztürk, A. U. (2009). Çimento harçlarının mikroyapı-basınç dayanımı ilişkisinin incelenmesi (Doctoral dissertation, Dokuz Eylül Üniversitesi (Turkey))

- Uygunoğlu, T., & Özgüven, S. B. 3D Teknolojisiyle İnşaa Edilen Yapıların Harç Özelliklerinin Araştırılması.
- Uygunoğlu, T., Özgüven, S., & Topçu, İ. B. (2019). 3D Teknolojisi ile Yapı Malzemesi Üretimindeki Gelişmeler. *International Journal Of 3d Printing Technologies And Digital Industry*, 3(3), 279-288.
- Ünal, A. (2007). Atık'tan Ürün'e Demir-Çelik Cürufu Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı Metalurji ve Malzeme Mühendisliği (Türkçe) Programı Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Wang, B., Yao, X., Yang, M., Zhang, R., Huang, J., Wang, X., Dong, Z., & Zhao, H. (2022). Mechanical Performance of 3D Printed Concrete in Steam Curing Conditions. *Materials*, 15(8). <https://doi.org/10.3390/ma15082864>
- Wu, P., Wang, J., & Wang, X. (2016). A critical review of the use of 3-D printing in the construction industry. *İçinde Automation in Construction* (C. 68, ss. 21-31). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2016.04.005>
- Yilmaz, A., & Degirmenci, N. (2009). Possibility of using waste tire rubber and fly ash with Portland cement as construction materials. *Waste Management*, 29(5), 1541-1546. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2008.11.002>
- Zeranka, S., Cho, S., Kruger, J., Witteveen bos, S. Z., & Van Zijl, G. (2019). 3D Printing Concrete Technology and Mechanics. <https://www.researchgate.net/publication/336021780>
- Zeynep Savas, B., Ahmad, S., & Fedroff, D. (1997). Freeze-Thaw Durability of Concrete with Ground Waste Tire Rubber.
- Zhang, Y., Qiao, H., Qian, R., Xue, C., Feng, Q., Su, L., Zhang, Y., Liu, G., & Du, H. (2022). Relationship between water transport behaviour and interlayer voids of 3D printed concrete. *Construction and Building Materials*, 326. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.126731>

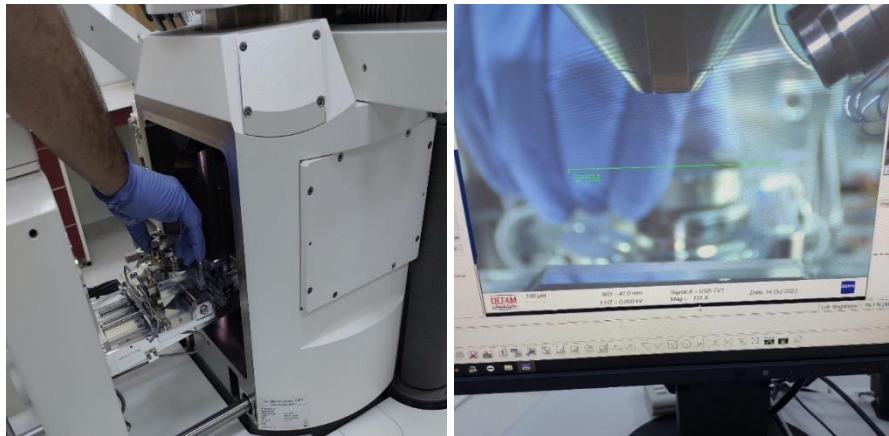
EKLER



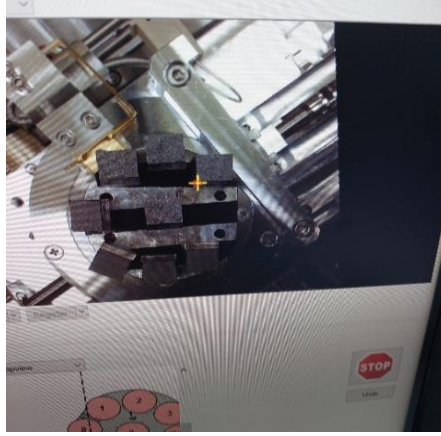
Şekil E.1 ve Şekil E.2 İSTON A.Ş 3B Yazıcı ile Üretilmiş Bazı Ürünler



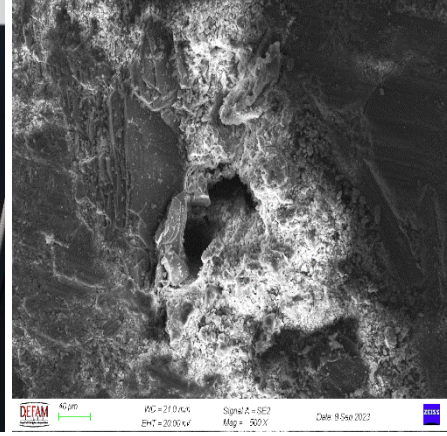
Şekil E.3 ve Şekil E.4 İSTON A.Ş 3B Yazıcı ile Üretilmiş Bazı Ürünler



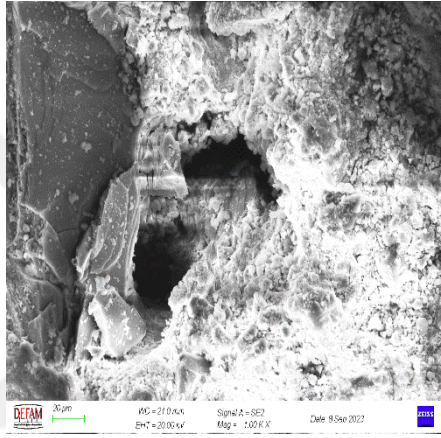
Şekil E.5 ve Şekil E.6 SEM Analizi Esnasında Alınan Görüntüler



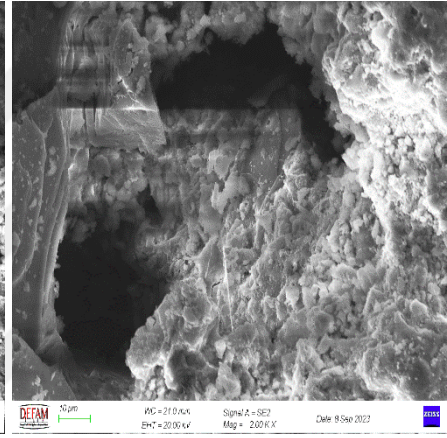
Şekil E.7 SEM Analizi Esnasında Alınan Görüntü



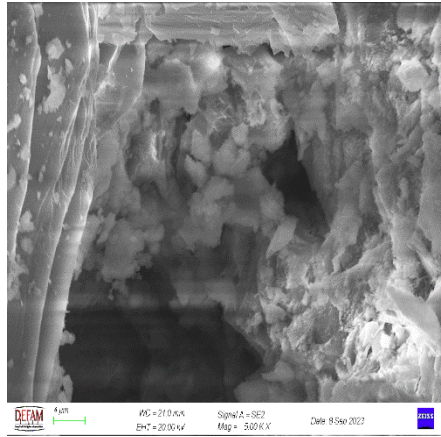
Şekil E.8 Asit ve Sülfat Öncesi L-10 Numunesi SEM Analizi Görüntüsü 500X/20kV



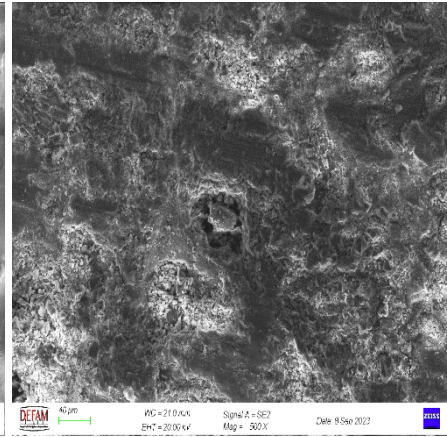
Şekil E.9 Asit ve Sülfat Öncesi L-10 Numunesi SEM Analizi Görüntüsü 1000X/20kV



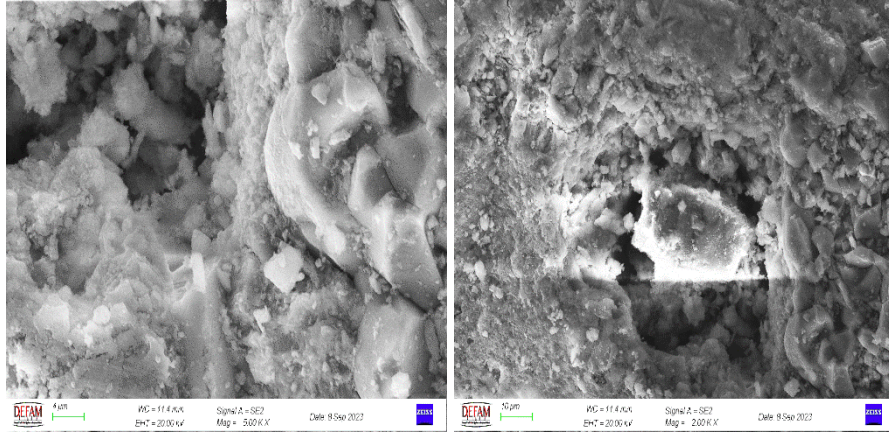
Şekil E.10 Asit ve Sülfat Öncesi L-10 Numunesi SEM Analizi Görüntüsü 2000X/20kV



Şekil E.11 Asit ve Sülfat Öncesi L-10 Numunesi SEM Analizi Görüntüsü 5000X/20kV

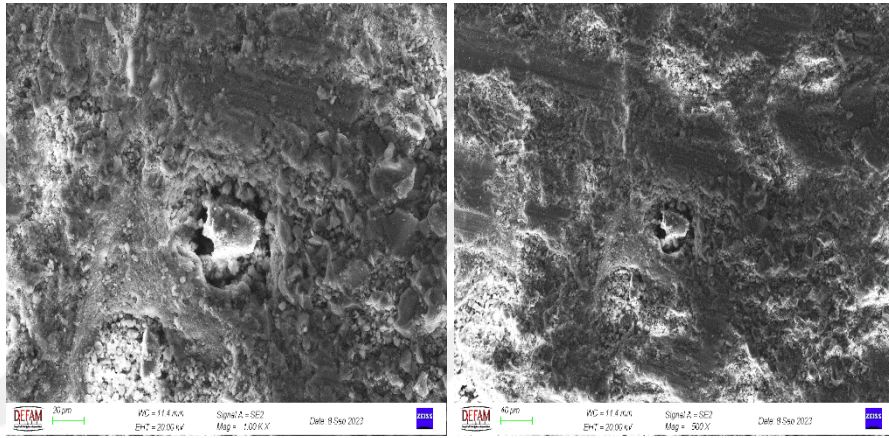


Şekil E.12 Asit ve Sülfat Öncesi L-10 Numunesi SEM Analizi Görüntüsü 500X/20kV



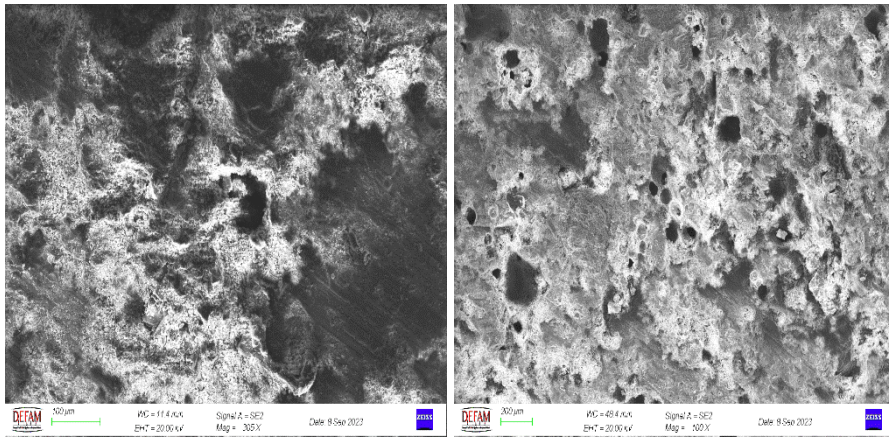
Şekil E.13 Asit ve Sülfat Öncesi L-10 Numunesi SEM Analizi Görüntüsü 500X/20kV

Şekil E.14 Asit ve Sülfat Öncesi L-10 Numunesi SEM Analizi Görüntüsü 2000X/20kV



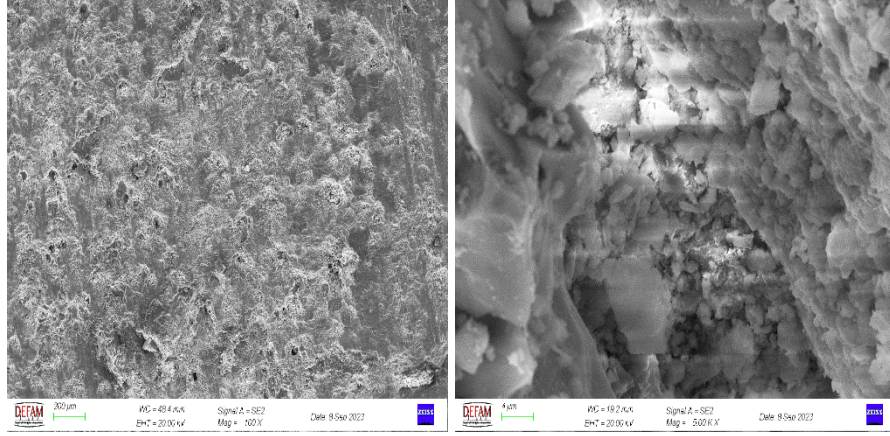
Şekil E.15 Asit ve Sülfat Öncesi L-10 Numunesi SEM Analizi Görüntüsü 1000X/20kV

Şekil E.16 Asit ve Sülfat Öncesi L-10 Numunesi SEM Analizi Görüntüsü 500X/20kV



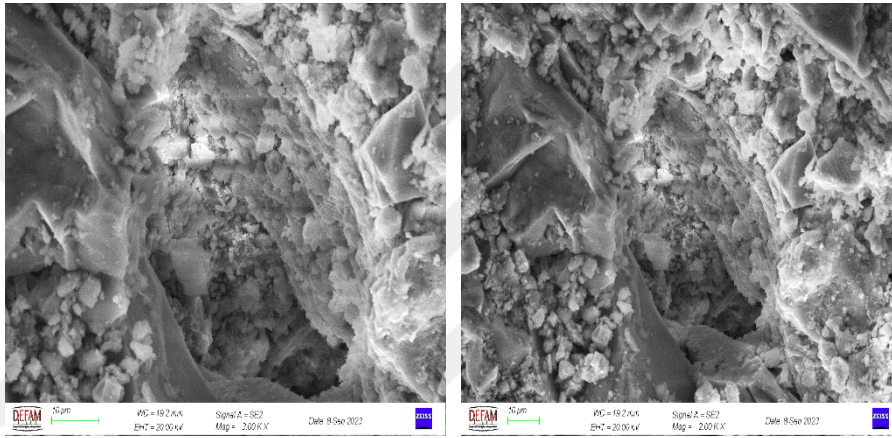
Şekil E.17 Asit ve Sülfat Öncesi L-10 Numunesi SEM Analizi Görüntüsü 305X/20kV

Şekil E.18 Asit ve Sülfat Öncesi Referans Numunesi SEM Analizi Görüntüsü 100X/20kV



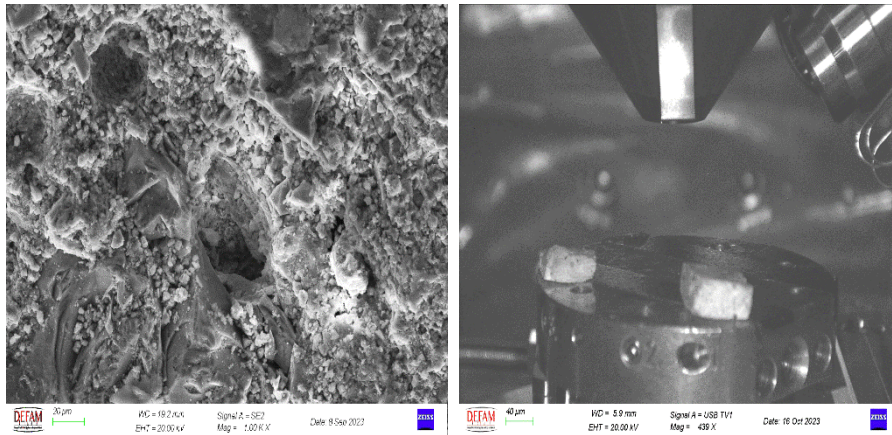
Şekil E.19 Asit ve Sülfat Öncesi Referans Numunesi SEM Analizi Görüntüsü 100X/20kV

Şekil E.20 Asit ve Sülfat Öncesi Referans Numunesi SEM Analizi Görüntüsü 5000X/20kV



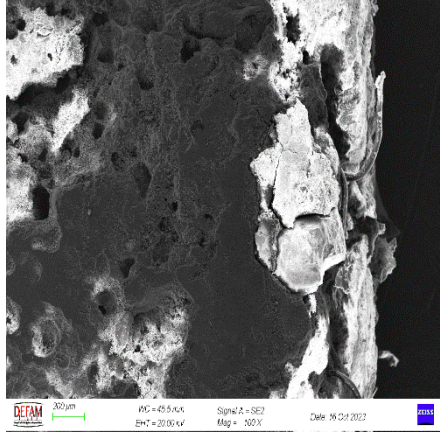
Şekil E.21 Asit ve Sülfat Öncesi Referans Numunesi SEM Analizi Görüntüsü 3000X/20kV

Şekil E.22 Asit ve Sülfat Öncesi Referans Numunesi SEM Analizi Görüntüsü 2000X/20kV

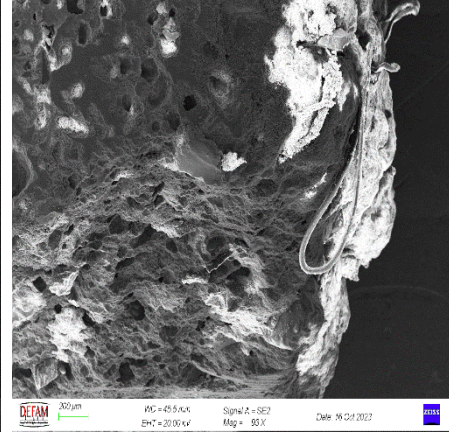


Şekil E.23 Asit ve Sülfat Öncesi Referans Numunesi SEM Analizi Görüntüsü 1000X/20kV

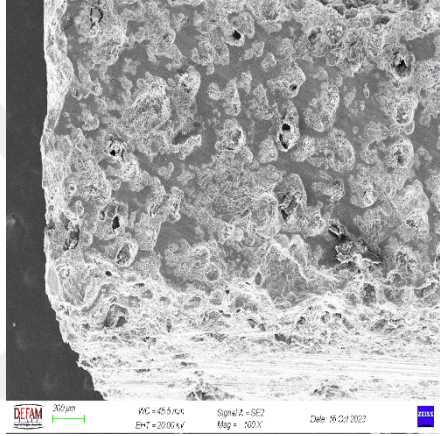
Şekil E.24 Asit Sonrası L-10 Numunesi SEM Analizi Görüntüsü 439X/20kV



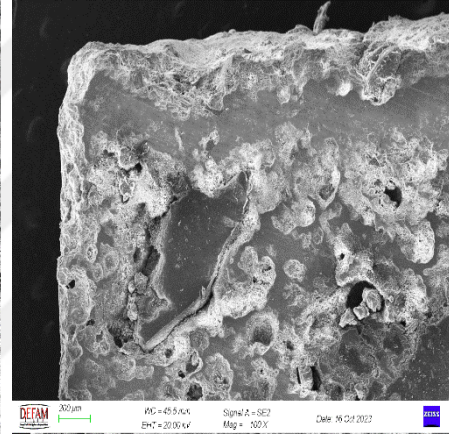
Şekil E.25 Asit Sonrası L-10 Numunesi SEM Analizi Görüntüsü 100X/20kV



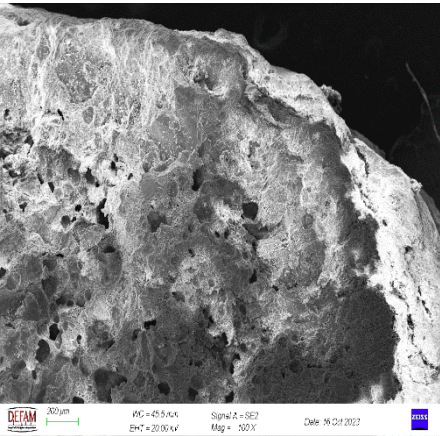
Şekil E.26 Asit Sonrası L-10 Numunesi SEM Analizi Görüntüsü 93X/20kV



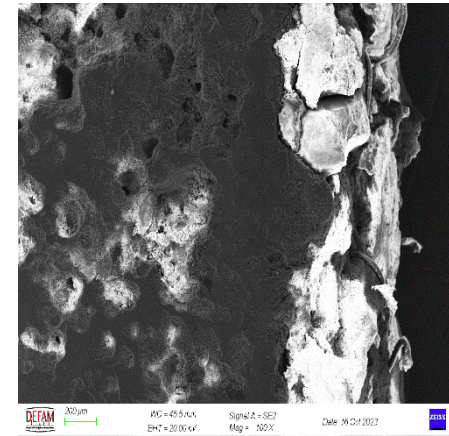
Şekil E.27 Asit Sonrası L-10 Numunesi SEM Analizi Görüntüsü 100X/20kV



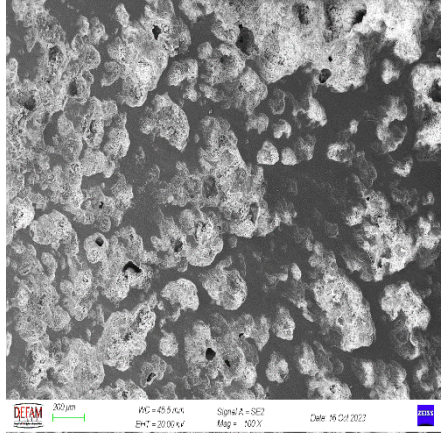
Şekil E.28 Asit Sonrası L-10 Numunesi SEM Analizi Görüntüsü 100X/20kV



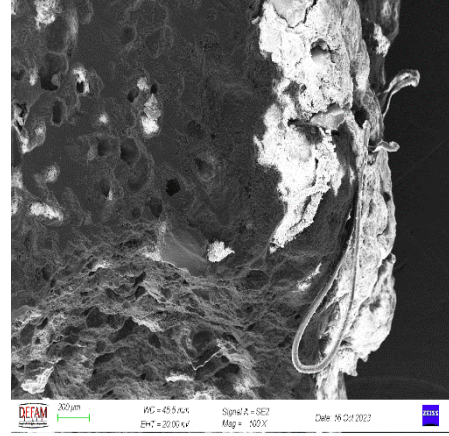
Şekil E.29 Asit Sonrası L-10 Numunesi SEM Analizi Görüntüsü 100X/20kV



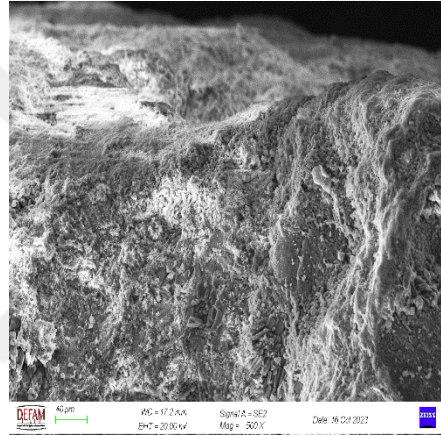
Şekil E.30 Asit Sonrası L-10 Numunesi SEM Analizi Görüntüsü 100X/20kV



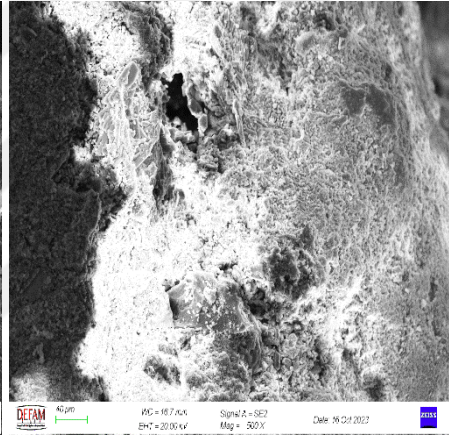
Şekil E.31 Asit Sonrası L-10 Numunesi SEM Analizi Görüntüsü 100X/20kV



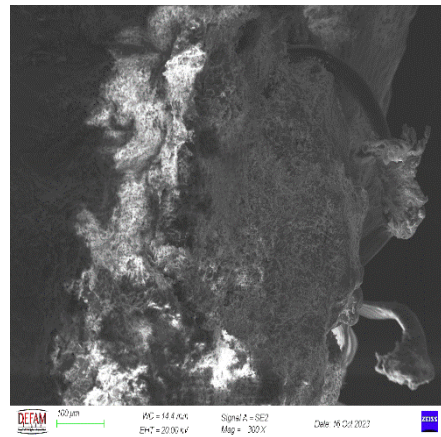
Şekil E.32 Asit Sonrası L-10 Numunesi SEM Analizi Görüntüsü 100X/20kV



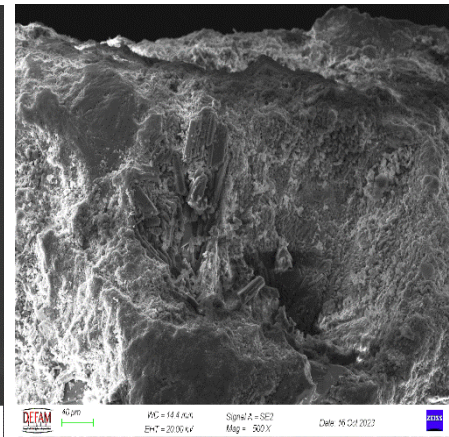
Şekil E.33 Asit Sonrası L-10 Numunesi SEM Analizi Görüntüsü 500X/20kV



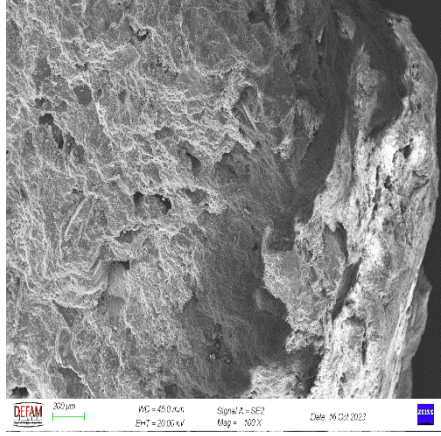
Şekil E.34 Asit Sonrası L-10 Numunesi SEM Analizi Görüntüsü 500X/20kV



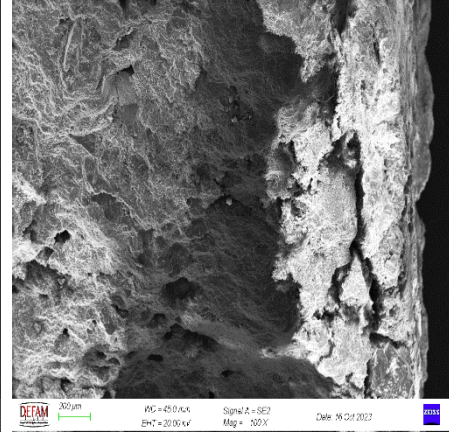
Şekil E.35 Asit Sonrası L-10 Numunesi SEM Analizi Görüntüsü 300X/20kV



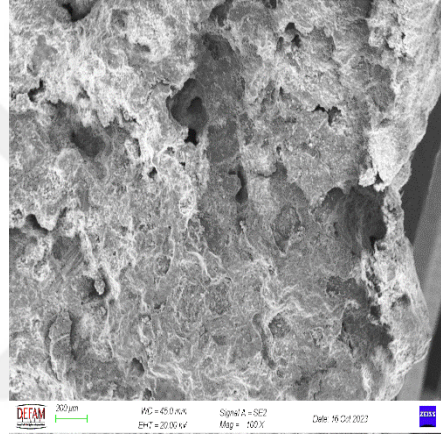
Şekil E.36 Asit Sonrası L-10 Numunesi SEM Analizi Görüntüsü 500X/20kV



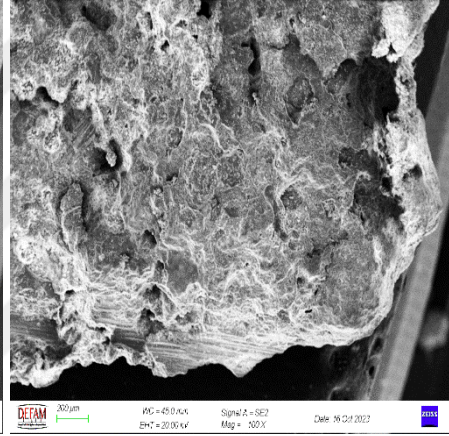
Şekil E.37 Asit Sonrası Referans Numunesi SEM Analizi Görüntüsü 500X/20kV



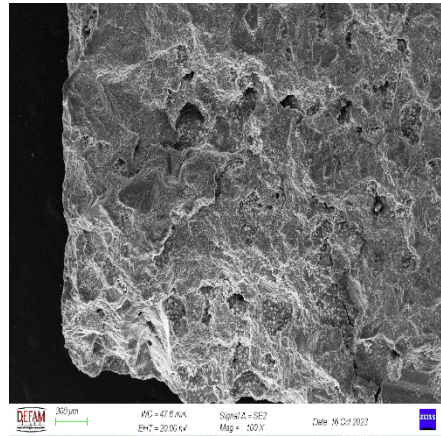
Şekil E.38 Asit Sonrası Referans Numunesi SEM Analizi Görüntüsü 100X/20kV



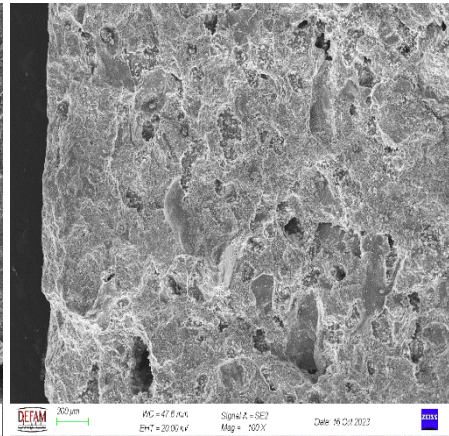
Şekil E.39 Asit Sonrası Referans Numunesi SEM Analizi Görüntüsü 100X/20kV



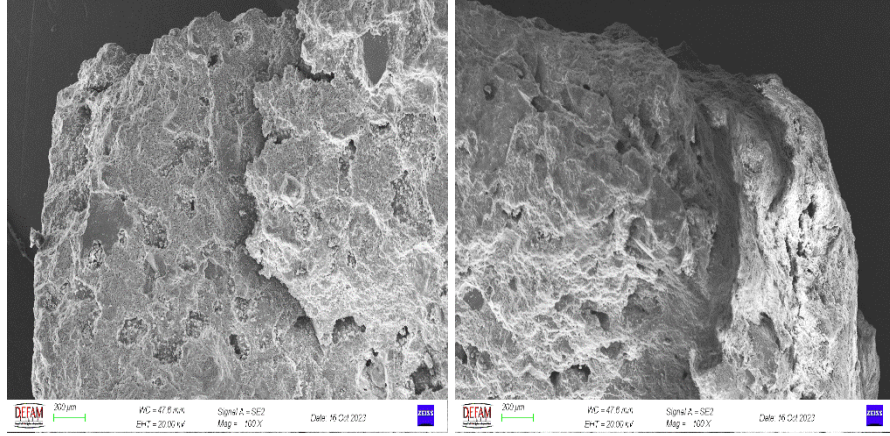
Şekil E.40 Asit Sonrası Referans Numunesi SEM Analizi Görüntüsü 100X/20kV



Şekil E.41 Asit Sonrası Referans Numunesi SEM Analizi Görüntüsü 100X/20kV

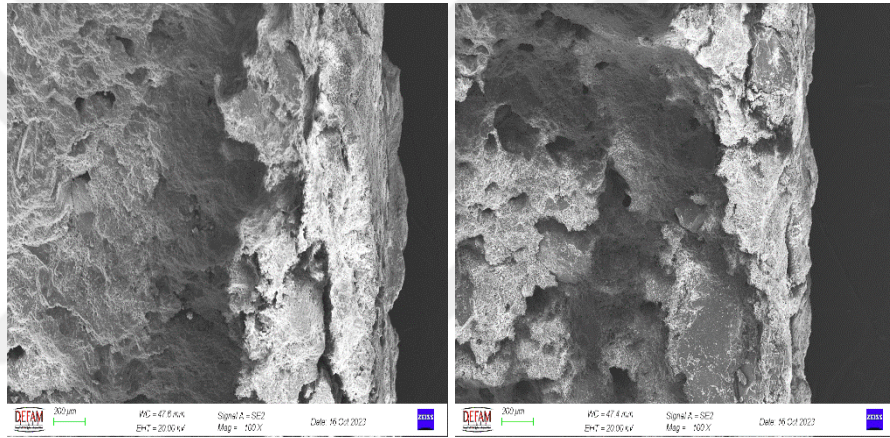


Şekil E.42 Asit Sonrası Referans Numunesi SEM Analizi Görüntüsü 100X/20kV



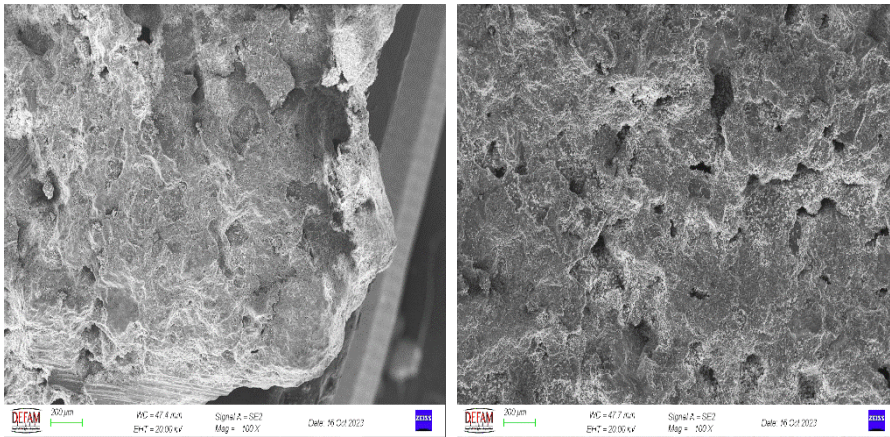
Şekil E.43 Asit Sonrası Referans Numunesi SEM Analizi Görüntüsü 100X/20kV

Şekil E.44 Asit Sonrası Referans Numunesi SEM Analizi Görüntüsü 100X/20kV



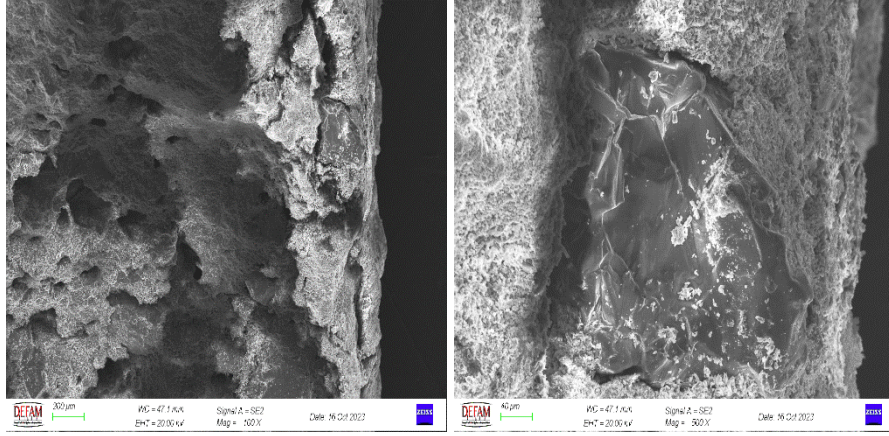
Şekil E.45 Asit Sonrası Referans Numunesi SEM Analizi Görüntüsü 100X/20kV

Şekil E.46 Asit Sonrası Referans Numunesi SEM Analizi Görüntüsü 100X/20kV

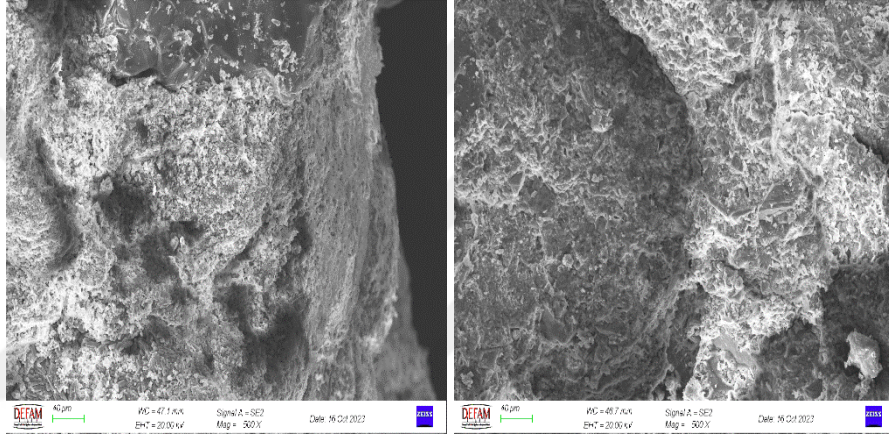


Şekil E.47 Asit Sonrası Referans Numunesi SEM Analizi Görüntüsü 100X/20kV

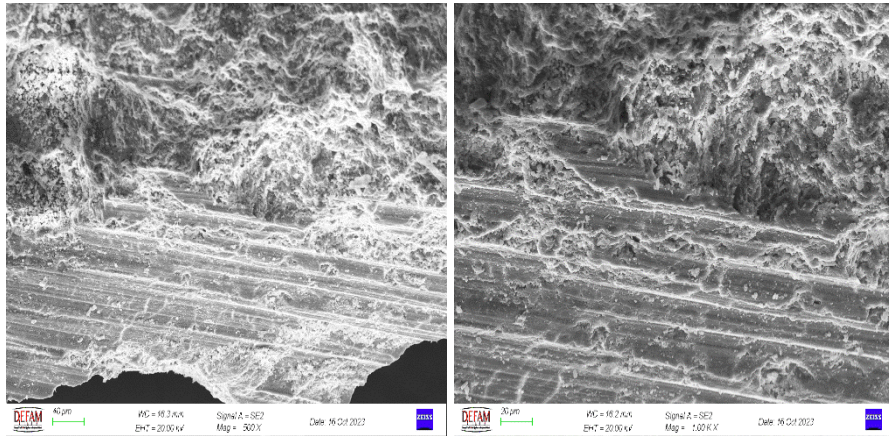
Şekil E.48 Asit Sonrası Referans Numunesi SEM Analizi Görüntüsü 100X/20kV



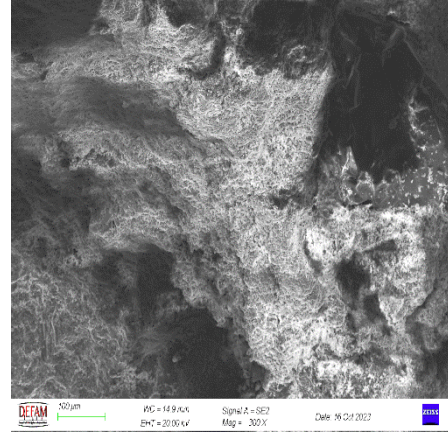
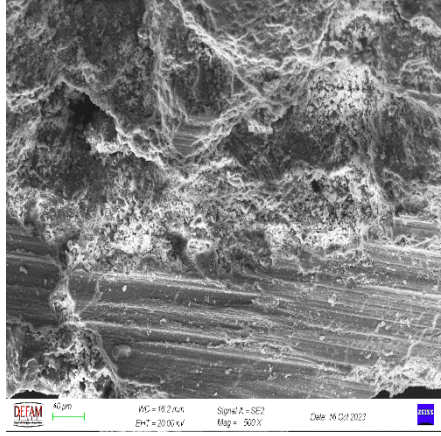
Şekil E.49 Asit Sonrası Referans Numunesi SEM Analizi Görüntüsü 100X/20kV
 Şekil E.50 Asit Sonrası Referans Numunesi SEM Analizi Görüntüsü 500X/20kV



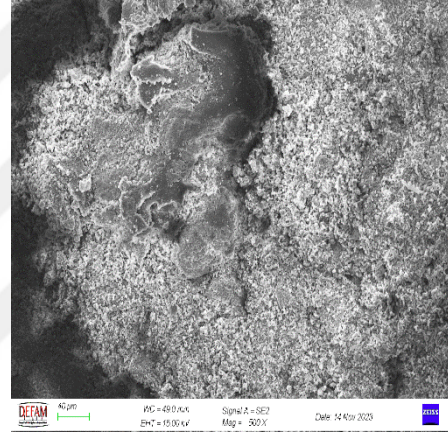
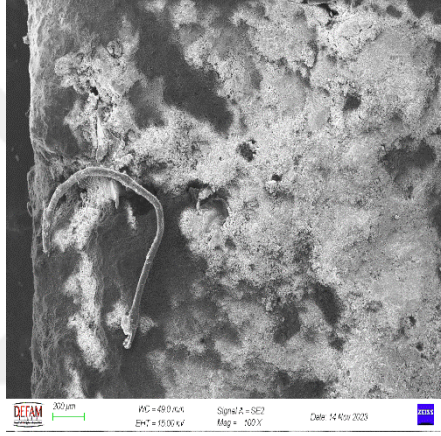
Şekil E.51 Asit Sonrası Referans Numunesi SEM Analizi Görüntüsü 500X/20kV
 Şekil E.52 Asit Sonrası Referans Numunesi SEM Analizi Görüntüsü 500X/20kV



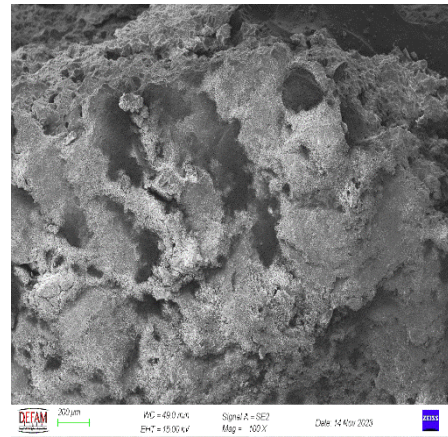
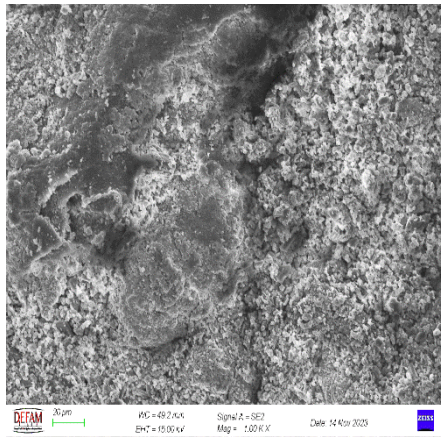
Şekil E.53 Asit Sonrası Referans Numunesi SEM Analizi Görüntüsü 500X/20kV
 Şekil E.54 Asit Sonrası Referans Numunesi SEM Analizi Görüntüsü 1000X/kV



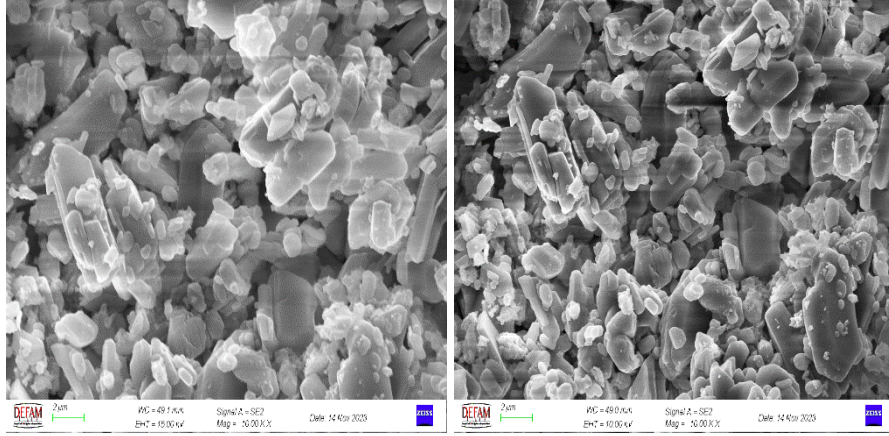
Şekil E.55 Asit Sonrası Referans Numunesi SEM Analizi Görüntüsü 500X/20kV
 Şekil E.56 Asit Sonrası Referans Numunesi SEM Analizi Görüntüsü 300X/20kV



Şekil E.57 Sülfat Sonrası L-10 Numunesi SEM Analizi Görüntüsü 100X/15kV
 Şekil E.58 Sülfat Sonrası L-10 Numunesi SEM Analizi Görüntüsü 500X/15kV

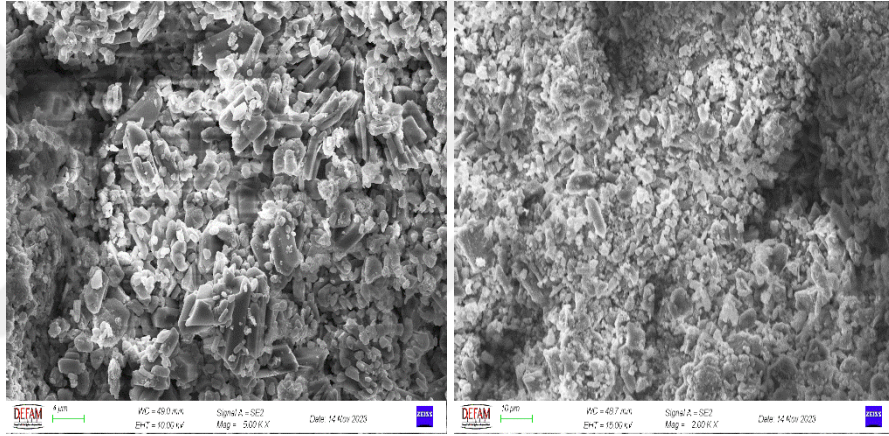


Şekil E.59 Sülfat Sonrası L-10 Numunesi SEM Analizi Görüntüsü 1000X/15kV
 Şekil E.60 Sülfat Sonrası L-10 Numunesi SEM Analizi Görüntüsü 500X/15kV



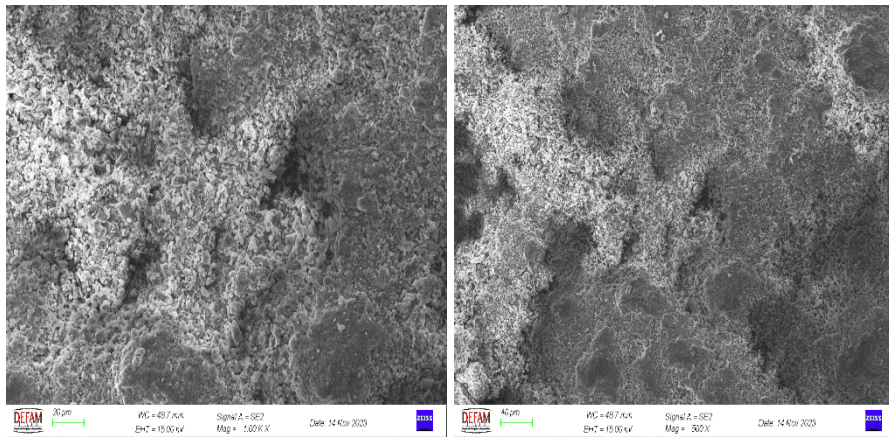
Şekil E.61 Sülfat Sonrası L-10 Numunesi SEM Analizi Görüntüsü 10000X/15kV

Şekil E.62 Sülfat Sonrası L-10 Numunesi SEM Analizi Görüntüsü 10000X/10kV



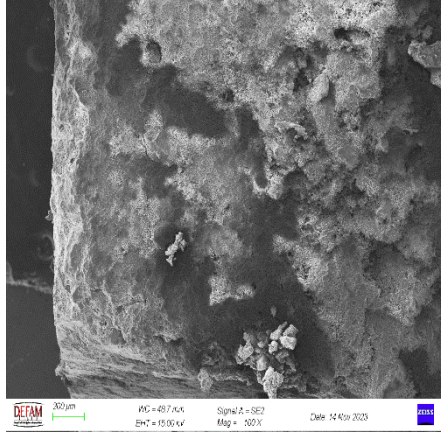
Şekil E.63 Sülfat Sonrası L-10 Numunesi SEM Analizi Görüntüsü 5000X/10kV

Şekil E.64 Sülfat Sonrası L-10 Numunesi SEM Analizi Görüntüsü 2000X/15kV

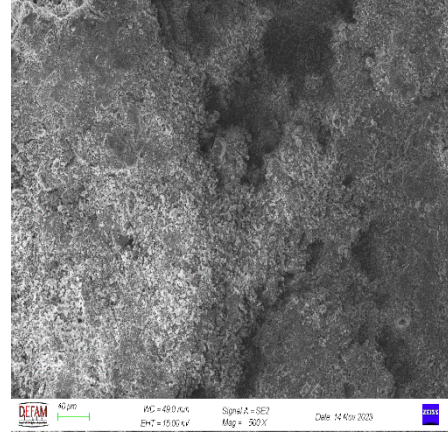


Şekil E.65 Sülfat Sonrası L-10 Numunesi SEM Analizi Görüntüsü 1000X/15kV

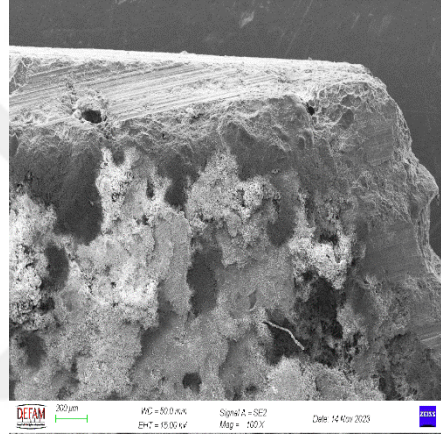
Şekil E.66 Sülfat Sonrası L-10 Numunesi SEM Analizi Görüntüsü 500X/15kV



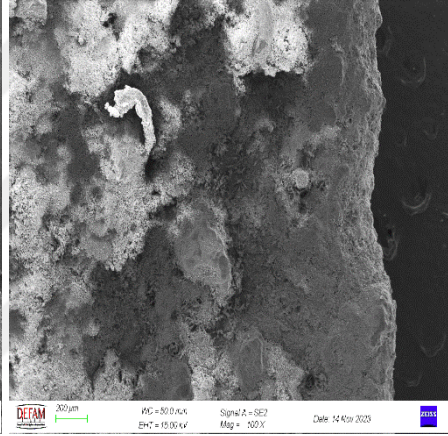
Şekil E.67 Sülfat Sonrası L-10 Numunesi SEM Analizi Görüntüsü 100X/15kV



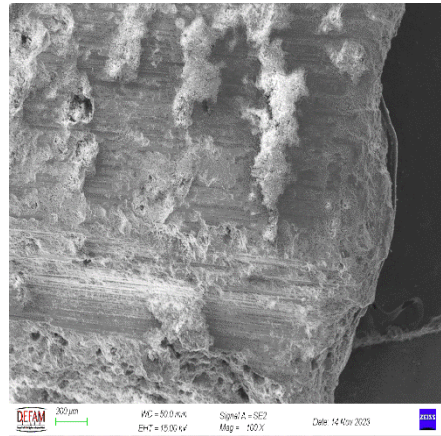
Şekil E.68 Sülfat Sonrası Referans Numunesi SEM Analizi Görüntüsü 500X/15kV



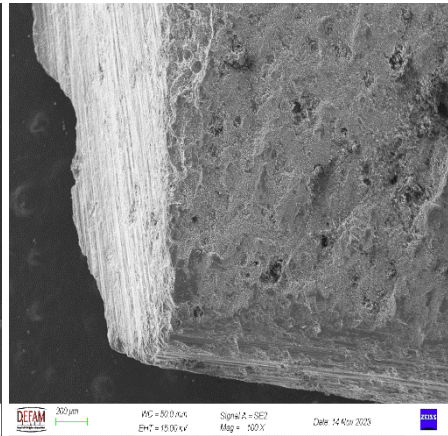
Şekil E.69 Sülfat Sonrası Referans Numunesi SEM Analizi Görüntüsü 100X/15kV



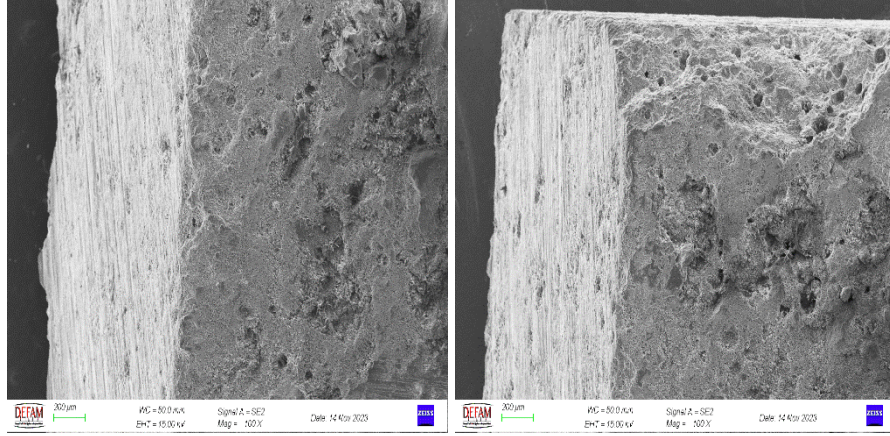
Şekil E.70 Sülfat Sonrası Referans Numunesi SEM Analizi Görüntüsü 100X/15kV



Şekil E.71 Sülfat Sonrası Referans Numunesi SEM Analizi Görüntüsü 100X/15kV

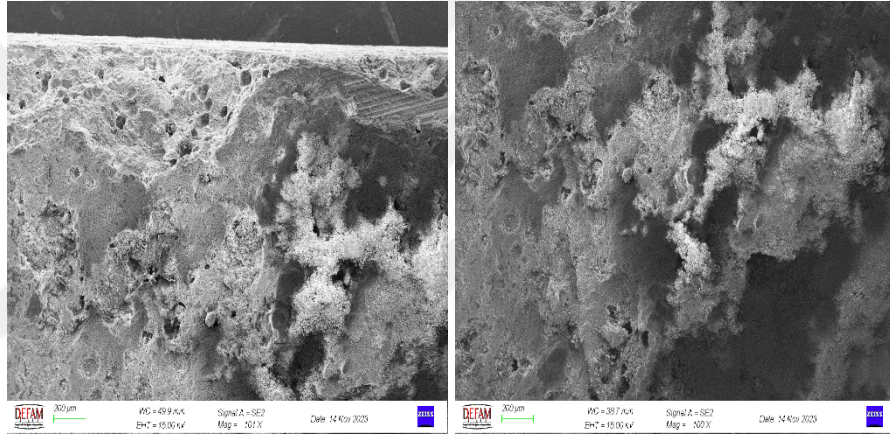


Şekil E.72 Sülfat Sonrası Referans Numunesi SEM Analizi Görüntüsü 100X/15kV



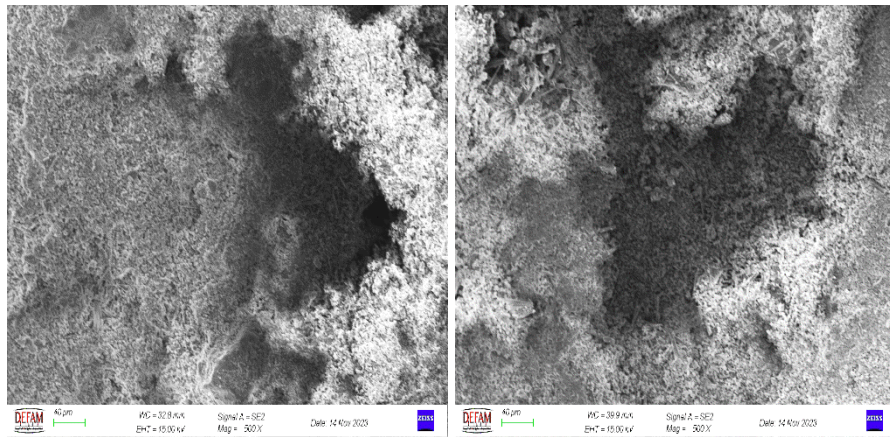
Şekil E.73 Sülfat Sonrası Referans Numunesi SEM Analizi Görüntüsü 100X/15kV

Şekil E.73 Sülfat Sonrası Referans Numunesi SEM Analizi Görüntüsü 100X/15kV



Şekil E.74 Sülfat Sonrası Referans Numunesi SEM Analizi Görüntüsü 101X/15kV

Şekil E.75 Sülfat Sonrası Referans Numunesi SEM Analizi Görüntüsü 100X/15kV



Şekil E.76 Sülfat Sonrası Referans Numunesi SEM Analizi Görüntüsü 500X/15kV

Şekil E.77 Sülfat Sonrası Referans Numunesi SEM Analizi Görüntüsü 500X/15kV