

**T.C.**  
**KASTAMONU ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**  
**İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**



**İNŞAAT YIKINTI ATIKLARININ İKAME MALZEMESİ VE**  
**AGREGA OLARAK SİLİNDİRLE SIKIŞTIRILMIŞ LİFLİ**  
**BETON YOLLARDA KULLANILABİLİRLİĞİ**

**MEHTİALİ AHISKALI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**DOÇ. DR. OĞUZHAN YAVUZ BAYRAKTAR**

**HAZİRAN - 2025**

**KASTAMONU**



## TAAHHÜTNAME

*Bu tezin tasarımı, hazırlanması, yürütülmesi, araştırmalarının yapılması ve bulgularının analizlerinde bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu; ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını, bilimsel etiğe uygun olarak kaynak gösterildiğini bildirir ve taahhüt ederim.*

**Mehtiali AHISKALI**

## ÖZET

### YÜKSEK LİSANS TEZİ

#### İNŞAAT YIKINTI ATIKLARININ İKAME MALZEMESİ VE AGREGA OLARAK SİLİNDİRLE SIKIŞTIRILMIŞ LİFLİ BETON YOLLARDA KULLANILABİLİRLİĞİ

MEHTİALİ AHISKALI

KASTAMONU ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

DANIŞMAN: DOÇ. DR. OĞUZHAN YAVUZ BAYRAKTAR

İnşaat yıkıntı atıkları, inşaat sektöründeki geri dönüşüm uygulamaları açısından önemli bir kaynaktır. Bu atıklar, uygun şekilde işlenip yeniden kullanıldığında hem çevresel etkilerin azaltılmasına hem de doğal kaynakların korunmasına katkıda bulunabilir. Silindirle Sıkıştırılmış Lifli Beton Yollar: Silindirle sıkıştırılmış lifli beton hem dayanıklılığı artırmak hem de çatlama ve deformasyonları önlemek amacıyla lif takviyeli bir beton türüdür. Lifler, betona eklenen malzemelerdir ve genellikle tekstil veya polimer kökenli olabilir. Bu tür betonun, yol yapımında kullanılabilmesi için birkaç önemli faktör vardır: Malzeme İkamesi: İnşaat yıkıntı atıkları, silindirle sıkıştırılmış lifli betonun agrega olarak kullanılması için uygun bir alternatif olabilir. Bu atıklar, taş, kum veya diğer doğal agregalar ile yer değiştirilerek düşen maliyetlerin yanı sıra çevresel faydalar sağlar. Dayanıklılık ve Performans: Yıkıntı atıklarının lifli betonda kullanılması, erken dönemdeki mühendislik özellikleri, dayanıklılık ve yük taşıma kapasitesine etkisini değerlendirir. Araştırmalar, bu tür karışımların yeterli statik ve dinamik dayanıklılığa sahip olabileceğini göstermektedir. Çevresel Etkiler: İnşaat yıkıntı atıklarının geri kazanımı, depo alanı ihtiyacını azaltır ve bu tür atıkların doğaya olan olumsuz etkilerini en aza indirir. Ayrıca, doğal kaynakların korunmasına katkı sağlar. Ekonomik Boyut: Bu uygulama, inşaat projelerinin maliyetlerini düşürme potansiyeline sahiptir. Yıkıntı atıklarının yerel düzeyde kullanılması, taşıma maliyetlerini azaltarak ekonomik bir avantaj sağlar. Sonuç olarak, inşaat yıkıntı atıkları ile ikame malzeme kullanarak silindirle sıkıştırılmış lifli beton yollar oluşturmak hem çevresel sürdürülebilirliği hem de ekonomik verimliliği artırma potansiyeline sahip bir yaklaşımdır. Ancak, bu tür uygulamaların etkili olabilmesi için daha fazla araştırma ve laboratuvar çalışması gereklidir.

**ANAHTAR KELİMELER:** Silindirle Sıkıştırılmış Beton, İnşaat ve Yıkım Atıkları, Atık Beton Tozu, Mekanik Özellikler, Dayanıklılık Performansı.

Haziran 2025, 100 Sayfa

## **ABSTRACT**

### **MSC THESIS**

#### **THE FEASIBILITY OF USING CONSTRUCTION DEMOLITION WASTE AS REPLACEMENT MATERIAL AND AGGREGATE IN ROLLER COMPACTED FIBER CONCRETE ROADS**

**MEHTIALI AHISKALI**

**KASTAMONU UNIVERSITY INSTITUTE OF SCIENCE**

**DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING**

**SUPERVISOR: ASSOC. PROF. DR. OĞUZHAN YAVUZ BAYRAKTAR**

Construction demolition waste is an important resource for recycling practices in the construction sector. When properly processed and reused, this waste can contribute to both reducing environmental impacts and conserving natural resources. Roller Compacted Fiber Concrete Roads: Roller compacted fibre concrete is a type of concrete that is reinforced with fibers to increase durability and prevent cracking and deformation. Fibers are materials added to concrete and are usually of textile or polymer origin. There are several important factors for this type of concrete to be used in road construction: Material Substitution: Construction demolition waste can be a suitable alternative for use as aggregate for roller compacted fibrous concrete. These wastes can be replaced with stone, sand or other natural aggregates, providing environmental benefits as well as reduced costs. Durability and Performance: The use of demolition waste in fibrous concrete evaluates its effect on early engineering properties, durability and load-bearing capacity. Research shows that such mixes can have adequate static and dynamic durability. Environmental Impacts: The recovery of construction demolition waste reduces the need for landfill space and minimizes the negative impact of such waste on the environment. It also contributes to the conservation of natural resources. Economic Dimension: This practice has the potential to reduce the costs of construction projects. The use of demolition waste at the local level provides an economic advantage by reducing transportation costs. In conclusion, creating roller compacted fibrous concrete roads using construction demolition waste as a substitute material is an approach that has the potential to improve both environmental sustainability and economic efficiency. However, more research and laboratory studies are required for such applications to be effective.

**KEYWORDS:** Roller-Compacted Concrete, Construction and Demolition Waste, Waste Concrete Powder, Mechanical Properties, Durability Performance.

June 2025, 100 Page

## TEŞEKKÜR

Bu yüksek lisans tez çalışmasının gerçekleştirilmesinde bana destek olan tüm kişi ve kuruluşlara içten teşekkürlerimi sunarım. Her şeyden önce, çalışmanın her aşamasında değerli görüşleri, özverili rehberliği ve sonsuz sabrı ile beni yönlendiren tez danışmanım Sayın Doç. Dr. Oğuzhan Yavuz BAYRAKTAR'a en derin minnettarlığımı ifade ederim. Tez jürimde yer alan değerli hocalarım Sayın Doç. Dr. Gökhan KAPLAN ve Sayın Dr. Öğr. Üyesi Mehmet Uğur YILMAZOĞLU'na vakit ayırdıkları ve yapıcı eleştirileri için teşekkür ederim. Çalışmalarım sırasında fikir alışverişı yapma fırsatı bulduğum, katkılarından faydalandığım Sayın Doç. Dr. Ahmet BENLİ ve Kastamonu Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü öğretim üyelerine teşekkürü bir borç bilirim.

Son olarak, bu uzun ve meşakkatli yolculukta her zaman yanımda olan, bana inanan, sabır, sevgi ve maddi-manevi desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen çok sevgili aileme sonsuz teşekkürlerimi ve sevgilerimi sunarım.

MEHTİALİ AHISKALI

Kastamonu, 2025

# İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
<b>TEZ ONAYI</b> .....	<b>ii</b>
<b>TAAHHÜTNAME</b> .....	<b>iii</b>
<b>ÖZET</b> .....	<b>iv</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>v</b>
<b>TEŞEKKÜR</b> .....	<b>vi</b>
<b>İÇİNDEKİLER</b> .....	<b>vii</b>
<b>ŞEKİLLER DİZİNİ</b> .....	<b>ix</b>
<b>TABLolar DİZİNİ</b> .....	<b>x</b>
<b>SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ</b> .....	<b>xi</b>
<b>1. GİRİŞ</b> .....	<b>1</b>
1.1 Çalışmanın Hedefi ve Özeti .....	5
1.2 Çalışmanın Boyutu.....	6
<b>2. LİTERATÜR TARAMASI</b> .....	<b>8</b>
2.1 Silindirle Sıkıştırılmış Beton Yollar (SSB).....	10
2.1.1 Genel Nitelikleri .....	11
2.1.2 Malzeme Seçimi, Karışım Tasarımı ve Laboratuvar Üretimi.....	12
2.1.3 SSB Kaplamalarının Fiziksel ve Mekanik Performansı .....	14
2.1.4 SSB Üretim Aşamaları.....	17
2.1.4.1 Proje tasarım ve malzeme seçimi .....	17
2.1.4.2 Zemin hazırlığı .....	17
2.1.4.3 Silindirle sıkıştırılmış beton karışımları.....	18
2.1.4.4 Silindirle sıkıştırılmış betonun taşınması .....	18
2.1.4.5 Sıkıştırma .....	19
2.1.4.6 Yüzey cila çıkarma.....	19
2.1.4.7 Kürleme işlemi .....	19
2.1.4.8 Test ve kontrol .....	20
2.1.5 SSB Uygulama Alanları.....	20
2.1.5.1 Karayolları .....	20
2.1.5.2 Havaalanı .....	21
2.1.5.3 Limanlar .....	21
2.1.5.4 Diğer hususi alanlar .....	22
2.1.6 SSB Avantaj ve Dezavantajları.....	26
2.1.6.1 SSB yolların avantajları .....	26
2.1.6.2 SSB yolların dezavantajları.....	28
2.2 Atık Beton Agregaları.....	30
2.3 Atık Beton Tozu.....	31
2.4 Polipropilen Lifler.....	32
<b>3. DENEYSEL ÇALIŞMA PROGRAMI</b> .....	<b>35</b>
3.1 Malzemeler .....	35
3.1.1 Çimento.....	35
3.1.2 Beton Tozu.....	37
3.1.3 Polipropilen Lif.....	38
3.1.4 Agregalar .....	39
3.1.4.1 İri agregalar .....	40

3.1.4.1.1	Kalker agregası (5-15mm).....	40
3.1.4.1.2	Atık beton agregası (5-15mm).....	40
3.1.4.2	İnce agrega.....	41
3.1.4.2.1	Kalker agregası (0-5 mm).....	41
3.1.4.2.2	Atık beton agregası (0-5mm).....	42
3.2	Numune Hazırlama ve Oransal Dağılım.....	43
3.2.1	Taguchi Tasarımı.....	43
3.3	Deneysel Yöntemler.....	47
3.3.1	İşlenebilirlik (Vebe Süresi).....	48
3.3.2	Mekanik Özellikler.....	48
3.3.3	Fiziksel Özellikler.....	49
3.3.4	Sorptivite.....	49
3.3.5	Aşınma Direnci.....	49
3.3.6	Sülfat Saldırı Direnci.....	49
3.3.7	Donma-Çözülme Dayanıklılığı.....	50
3.3.8	Klorür Direnci.....	50
3.3.9	Mikroyapısal Analiz.....	50
<b>4.</b>	<b>BULGULAR VE TARTIŞMA.....</b>	<b>51</b>
4.1	Basınç Mukavemeti.....	51
4.2	Yarma-Çekme Mukavemeti.....	54
4.3	Su İçinde, Doygun Kuru Yüzey ve Kuru Ağırlık.....	57
4.4	Sorptivite (Kılcallık).....	61
4.5	28 Günlük Mikroyapılar.....	63
4.6	Magnezyum Sülfat (Mgso4) Direnci.....	67
4.6.1	MgSO <sub>4</sub> 'e Maruz Kalan SSB'lerin Mikro Yapısı.....	73
4.7	Islama Kurumada 60 Döngü NaCl Etkisi.....	77
4.7.1	Islama Kurumada NaCl Etkisinin SSB'de Mikro Yapısı.....	82
4.8	Donma-Çözülme Direnci.....	88
4.9	Aşınma Direnci.....	92
<b>5.</b>	<b>SONUÇLAR.....</b>	<b>95</b>
	<b>KAYNAKLAR.....</b>	<b>97</b>
	<b>ÖZGEÇMİŞ.....</b>	<b>100</b>

## ŞEKİLLER DİZİNİ

### Sayfa

Şekil 2.1 Çimento dozajının SSB karışımı üzerine etkisi (a, b, c, d).....	14
Şekil 2.2 SSB işlenebilme süresi (a, b) .....	15
Şekil 2.3 a) KPB Kavramı b) Beton için çatlak yayılma mekanizmaları.....	16
Şekil 3.1 Kullanılan çimento görünüşü.....	37
Şekil 3.2 Atık beton tozu görünüşü.....	37
Şekil 3.3 Atık beton (ABT) XRD modeli .....	38
Şekil 3.4 Polipropilen lif .....	38
Şekil 3.5 SSB yol üretiminde agrega gradasyonu.....	39
Şekil 3.6 Kalker agregası (5-15 mm ) .....	40
Şekil 3.7 Atık beton (5-15 mm) .....	41
Şekil 3.8 İnce kalker agregası (0-5 mm) .....	42
Şekil 3.9 Atık beton agregası (0-5 mm) .....	43
Şekil 4.1 Basınç dayanımları.....	54
Şekil 4.2 Yarma-Çekme deney sonuçları.....	56
Şekil 4.3 a) Su içi ve su emme, b) Basınç dayanımları.....	59
Şekil 4.4 a) Kuru ağırlık, b) Basınç dayanımı.....	61
Şekil 4.5 a) Sorptivity (Kılcallık), b) Basınç dayanımı.....	63
Şekil 4.6 28 gün sonra (0C-0P-0F) SEM görüntüleri .....	64
Şekil 4.7 28 gün sonra (100C-40P-75F) SEM görüntüleri .....	65
Şekil 4.8 28 gün sonra (0C-10P-50F) SEM görüntüleri .....	67
Şekil 4.9 a) Basınç dayanımı, b) MgSO <sub>4</sub> sonrası dayanım değişimi (%) .....	70
Şekil 4.10 a) MgSO <sub>4</sub> sonrası ağırlık değişimi, b) Ağırlık değişimi, dayanımı .....	72
Şekil 4.11 MgSO <sub>4</sub> sonrası (0C-0P-0F) SEM görüntüleri .....	74
Şekil 4.12 MgSO <sub>4</sub> sonrası (100C-40P-75F) SEM görüntüleri .....	75
Şekil 4.13 MgSO <sub>4</sub> sonrası (0C-10P-50F) SEM görüntüleri .....	77
Şekil 4.14 a) Basınç dayanımı, b) NaCl sonrası dayanım değişimi (%) .....	80
Şekil 4.15 a) NaCl sonrası ağırlık değişimi, b) Basınç dayanımı-ağırlık kaybı.....	82
Şekil 4.16 Islama-Kuruma sonrası (0C-0P-0F) SEM görüntüleri .....	84
Şekil 4.17 Islama-Kuruma sonrası (100C-40P-75F) SEM görüntüleri .....	86
Şekil 4.18 Islama-Kuruma sonrası (0C-10P-50F) SEM görüntüleri .....	87
Şekil 4.19 a) D-Ç sonrası basınç dayanımı, b) Basınç dayanım değişimi .....	90
Şekil 4.20 D-Ç sonrası ağırlık değişimi, b) Basınç dayanımı-ağırlık değişimi .....	92
Şekil 4.21 a) Aşınma deney sonucu, b) Basınç dayanımı-ağırlık kaybı .....	93

## TABLULAR DİZİNİ

	<b><u>Sayfa</u></b>
Tablo 2.1 Esnek ve rijit üstyapı parametreleri .....	11
Tablo 3.1 Çimentonun kimyasal özellikleri .....	36
Tablo 3.2 Çimentonun mekanik ve fiziksel özellikleri .....	36
Tablo 3.3 SSB karışım oranları ve malzeme miktarları .....	47
Tablo 3.4 Yapılması planlanan deneyler.....	48



## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

### Simgeler

°C	: Santigrat derece
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	: Alüminyum oksit
KAO	: Kalsiyum oksit
SiO <sub>2</sub>	: Silisyum dioksit (silika)
SO <sub>3</sub>	: Kükürt trioksit
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	: Demir oksit
MgO	: Magnezyum oksit
MgSO <sub>4</sub>	: Magnezyum sülfat
Na <sub>2</sub> O	: Sodyum oksit
Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	: Sodyum sülfat
NaCl	: Sodyum klorür
CO <sub>2</sub>	: Karbondioksit
C-S-H	: Kalsiyum silikat hidrat
s/b	: Su-bağlayıcı oranı
mm	: Milimetre
g/cm <sup>3</sup>	: Gram/santimetreküp
kg/m <sup>3</sup>	: Kilogram/metreküp
MPa	: Mega Pascal
kN	: Kilo Newton

### Kısaltmalar

ACI	: Amerikan Beton Enstitüsü
NRMKA	: Ulusal Beton Yol Birliği
ASTM	: American Society For Testings And Materials
TS-EN	: Avrupa Birliği standartlarıyla uyumlu Türk Standartları
AASHTO	: American Association of State Highway Officers (Amerika Eyalet Yolları ve Ulaşım Çalışanları Kurumu)
KGM	: Karayolu Genel Müdürlüğü
SEM	: Taramalı elektron mikroskobu
AGB	: Arayüz geçiş bölgesi
OD	: Ortogonal dizin
SSB	: Silindirle sıkıştırılmış beton
GDA	: Geri dönüştürülmüş agrega
ABT	: Atık beton tozu
PPF	: Polipropilen lifler
XRD	: X-ışını kırınım
KA	: İri(Kaba) agrega
İA	: İnce agrega
ABT	: Atık beton tozu
i-İYA	: İnce geri dönüştürülmüş inşaat ve yıkım atığı
k-İYA	: İri(Kaba) geri dönüştürülmüş inşaat ve yıkım atığı
D-Ç	: Donma-çözülme

## 1. GİRİŞ

Yük taşıma sektörünün %76' sını ve yolcu taşımacılığının %95'inin ülkemiz genelinde karayolu ulaşım ağı içerisinde yapılmaktadır. Ülkemiz genelinde karayolu ulaşım ağının yaklaşık 35569 km'si sathi kaplama yol; 29879 km'si asfalt; 3206 km'si ise beton, toprak, parke ve stabilize yollar ile toplamda 68654 km olarak bilinmektedir (Karayolları Genel Müdürlüğü, 2024). Yıllara göre çevre ve hava şartlarının ağırlaşmasından dolayı özellikle ağır tonajlı yük taşıtlarının geçişinde üstyapıda oluşan hasarların tamiri, zaman ve ekonomik olarak zarar vermektedir. Ülkemizde asfalt satıh kaplama yerine alternatif olarak sunulabilecek birçok öneri vardır. Bunlardan biri Silindirle Sıkıştırılmış Beton (SSB) olarak bilinmektedir. Bunun yanı sıra git gide artan inşaat atık malzemelerinin âtil bir şekilde kalması da büyük bir sorun olmaya başlamıştır. İnşaat atık malzemelerinin silindirle sıkıştırılmış beton yollarda kullanılmasını sağlamak çevresel etkilerden ve ekonomik boyutta kazançlar sağlamaktadır. Yıkıntı içerisinde çıkan ve zamanla dayanımının azalmasından dolayı insan sağlığına zararlı olmaya başlayan birçok yapı malzemesinin geri dönüştürülüp, dayanımının arttırılarak silindirle sıkıştırılmış beton yollarda kullanımı sağlanabilir. İnşaat yıkıntı malzemelerini ikame olarak kullanılması, çıkan beton kalıntılarının tane boyutlarına ayrılması, ayrıca çimento katkı yerine geçebilecek alternatif olan yüksek fırın cürufu ile desteklenmesi, çıkacak silindirle sıkıştırılmış beton yolların deneysel olarak sonuçlarını gözlemlemek gerekmektedir (Yetim ve Yılmaz , 2019).

İnşaat atık ürünlerinin yapıda tekrardan agrega olarak kullanıldığı bilinmektedir. Kullanılan bu agregaların parçalama, eleklerden tane boyutlarına göre ayrılıp sınıflandırılması, yeniden kullanıma hazır hale gelmesi sağlanmaktadır. Günümüzde de sık sık kullanılan yapı malzemelerinin geri dönüşümü karayollarına da birçok konuda yenilik getirmiştir. Bu yeniliklerden biriside silindirle sıkıştırılmış beton yollardır. Silindirle sıkıştırılmış beton yollar ülkemizde kullanımı yeni yeni artmaya başlamıştır. Bu çalışmada bu sürecin daha hızlı olması için yapılan deneysel çıkarımlar sunmaktadır. Sürdürülebilir inşaat uygulamalarına yönelik acil küresel talep, geri dönüştürülmüş malzemelerin çimentolu kompozitlere dahil edilmesini hızlandırdı. Çeşitli alternatifler arasında, inşaat ve yıkım atıkları (İYA), doğal agrega tükenmesi

ve katı atık birikimi gibi ikiz zorlukları ele alan son derece uygun bir kaynak olarak ortaya çıkmıştır. Silindirle sıkıştırılmış beton (SSB), sıfır çökme kıvamı ve yüksek yoğunluklu sıkıştırma ile karakterize edilir ve doğası gereği düşük su-bağlayıcı (s/b) oranı ve altyapı uygulamalarında sağlamlığı nedeniyle bu tür geri dönüştürülmüş malzemelerin değerlendirilmesi için ideal bir platform sunar.

Sırasıyla doğal ince agrega (İA) ve kaba agrega (KA) yerine ince ve kaba geri dönüştürülmüş agregaların (i-İYA ve k-İYA) kullanılması, önemli çevresel ve ekonomik faydalar sunar. İYA'nın SSB'ye geri dönüştürülmesi, yalnızca büyük hacimli atıkları çöplüklerden uzaklaştırmakla kalmaz, aynı zamanda işlenmemiş agregaların çıkarılmasını da azaltarak taş ocakçılığı operasyonlarıyla ilişkili çevresel bozulmayı azaltır. Bununla birlikte, geri dönüştürülmüş agregalar genellikle doğal agregalara kıyasla daha yüksek gözeneklilik, su emme ve açısallık sergileyerek işlenebilirliği, mekanik mukavemeti ve dayanıklılığı olumsuz etkiler. Sonuç olarak, bu olumsuz etkileri azaltmak için s/b oranını optimize etmek, partikül paketlemeyi geliştirmek ve ek bağlayıcı fazları dahil etmek gibi dikkatli karışım tasarımı ayarlamaları gereklidir.

Buna paralel olarak, İYA işleme sırasında üretilen atık beton tozu (ABT), Portland çimentosu (PC) için kısmi bir ikame olarak araştırılmıştır. ABT, uygun koşullar altında gizli hidrolik veya puzolanik aktivite sunan kalıntı hidratlanmamış çimentolu fazlar ve ince dolgu partikülleri içerir. Kuruluşu, çimento üretimiyle ilişkili karbon ayak izini azaltarak sürdürülebilirlik hedefleriyle uyumludur. Ayrıca, ABT'nin dolgu etkisi, en uygun şekilde dozlandığında gözenek yapısını iyileştirebilir ve matris yoğunluğunu artırabilir. Bununla birlikte, aşırı değiştirme seviyeleri, reaktif bağlayıcı içeriğini seyreltebilir ve uygun şekilde yönetilmezse mekanik ve dayanıklılık performansından ödün verilmesine neden olabilir.

Özellikle polipropilen elyaflar (PPF) ile elyaf takviyesi, geri dönüştürülmüş malzemeler içeren SSB karışımlarını daha da geliştirir. PPF, çatlama sonrası tokluğu, büzülme direncini ve gerilimin yeniden dağılımını iyileştirerek çevresel saldırılara karşı gelişmiş mekanik esnekliğe ve dayanıklılığa katkıda bulunur. Lifler, termal, mekanik veya kimyasal stresler altında gelişen mikro çatlakları köprüleyebilir, böylece

malzemenin yük taşıma kapasitesini ve hizmet ömrünü artırabilir. Bununla birlikte, özellikle düşük işlenebilirlikli, sıfır çökmeli karışımlarda kritik olan lif topaklanması, düşük sıkıştırma verimliliği ve boşluk oluşumu gibi sorunları önlemek için lif dozu dikkatli bir şekilde kontrol edilmelidir.

Bununla birlikte, sıfır çökme SSB teknolojisi bağlamında çoklu geri dönüştürülmüş bileşenlerin (ince ve kaba agregalar, atık toz) ve elyaf takviyesinin sinerjik entegrasyonu ile ilgili önemli bir araştırma boşluğu bulunmaktadır. Ayrıca, bu tür yeşil SSB sistemlerinin birleşik çevresel ve mekanik stresler altındaki performansı yeterince anlaşılmamıştır.

Mekanik özelliklere ek olarak, ıslatma-kurutma döngüleri, sülfat saldırısı, klorür girişi ve donma-çözülme (D-Ç) etkisi dahil olmak üzere agresif çevresel maruziyetler altında dayanıklılık performansı büyük önem taşır. SSB kaplamaları, barajlar ve endüstriyel zeminler genellikle döngüsel nem değişimlerine, buz çözücü tuzlara, sülfat bakımından zengin topraklara ve sıcaklık dalgalanmalarına maruz kalır ve bu da bu tür bozulma mekanizmalarına karşı direnci kritik bir tasarım kriteri haline getirir. Bu bozulma mekanizmalarını anlamak, gerçek dünya altyapı uygulamalarında geri dönüştürülmüş SSB'nin uzun vadeli performansını ve sürdürülebilirliğini sağlamak için çok önemlidir.

Birkaç çalışma, geri dönüştürülmüş agregaları içeren geleneksel betona odaklanmış olsa da, sınırlı araştırma, düşük s/b oranları, yüksek sıkıştırma talepleri ve SSB'nin kuru kıvamının ortaya çıkardığı belirli zorlukları ele almaktadır. SSB'nin yoğun sıkıştırma kuvvetleri ve düşük işlenebilirlik koşulları altında geri dönüştürülmüş agregaların davranışı, özellikle ara yüzey geçiş bölgesi (AGB) gelişimi ve mikroyapısal bütünlük ile ilgili olarak yeterince keşfedilmemiş bir alan olmaya devam etmektedir.

Bu çalışma, birleşik i-İYA, k-İYA, ABT ve PPF birleşmelerinin SSB karışımlarının mekanik, fiziksel ve dayanıklılık performansı üzerindeki etkisini sistematik olarak değerlendirerek bu bilgi boşluklarını ele almayı amaçlamaktadır. Aşağıdakiler de dahil olmak üzere kapsamlı bir deneysel program yürütülmüştür:

Basınç dayanımı ve yarıma çekme dayanımı gelişiminin değerlendirilmesi, Fırın-kuru yoğunluğun, su emme ve gözenekliliğin değerlendirilmesi, Sorptivite, aşınma direnci ve termal stabilite ölçümü, Sülfat maruziyetine, klorür kaynaklı ıslatma-kurutma döngülerine ve donma-çözülme döngüsüne karşı dayanıklılığın araştırılması.

Deneysel tasarım, doğal ince ve iri agregalar için i-İYA ve k-İYA'nın ikame seviyelerinin, Portland çimentosu için ABT'nin ikame oranlarının ve PPF ilave seviyelerinin değiştirilmesini içeriyordu. Saha koşullarında SSB yerleştirme ve sıkıştırmanın pratik gereksinimlerini yansıtan tüm karışımlarda sıfır çökme tutarlılığının korunmasına önem verildi. Ayrıca, çalışma, geri dönüştürülmüş agregaların yüksek emilim özelliklerinden kaynaklanan dahili etkili s/b oranı varyasyonlarını dikkatlice izledi ve bunları mukavemet gelişimi ve dayanıklılık sonuçlarıyla ilişkilendirdi.

Özellikle, çalışma, agrega absorpsiyon özelliklerinden kaynaklanan dahili etkili s/b oranı varyasyonlarının rolünü ve bunların mikroyapısal yoğunlaşma ve dayanıklılık performansı üzerindeki etkisini vurgulamaktadır. Basınç dayanımı ve temel dayanıklılık göstergeleri (örneğin, sorptivite, kilo kaybı, sülfat direnci) arasındaki ilişkiler, yöneten bozulma mekanizmalarını aydınlatmak için istatistiksel olarak analiz edilir.

Ayrıca bu çalışma, sürdürülebilirlik, mekanik bütünlük ve uzun vadeli dayanıklılık arasında bir denge sağlamak için karışım tasarımlarını optimize etmeye yönelik pratik bilgiler önermektedir. Bulgular, bağlayıcı reaktivitesi, lif içeriği ve agrega derecelendirmesi gibi karışım parametrelerinin dikkatli bir şekilde optimize edilmesi koşuluyla, doğal agregaların geri dönüştürülmüş muadilleriyle tamamen değiştirilmesinin bile SSB'de mümkün olduğunu göstererek sürdürülebilir beton teknolojisi alanının ilerlemesine katkıda bulunur.

Sonuç olarak, bu araştırma, beton altyapının çevresel ayak izini azaltmak, inşaat sektöründe dögüsel ekonomi uygulamalarını teşvik etmek ve zorlu hizmet koşullarında yeşil silindirle sıkıştırılmış betonların mühendislik uygulaması için yönergeler sağlamak için daha geniş çabaları desteklemektedir.

Ayrıca, mekanik davranışın yanı sıra mikroyapısal ve taşıma özelliklerini araştıran çalışma, geri dönüştürülmüş agrega özelliklerinin, çimento ikame seviyelerinin ve elyaf takviyesinin performansı sinerjik olarak nasıl etkilediğine dair daha kapsamlı bir anlayış sunmaktadır. Böyle entegre bir yaklaşım, çeşitli hizmet ortamları altında sürdürülebilir SSB karışımlarının uzun vadeli davranışı için tahmine dayalı modeller geliştirmek için kritik öneme sahiptir.

Bu araştırma sayesinde, inşaat ve yıkım atıklarının ve çimentolu yan ürünlerin yapısal dereceli silindire sıkıştırılmış betonda kullanılmasının uygulanabilirliği gösterilmekte ve küresel sürdürülebilirlik hedefleri doğrultusunda altyapı geliştirme için çevre dostu, dayanıklı ve uygun maliyetli çözümlerin önünü açmaktadır.

## **1.1 Çalışmanın Hedefi ve Özeti**

İnşaat hızla büyüyor, kırsaldan kente göç, kentsel genişleme, sanayileşme günümüzde inşaatı yönlendiren faktörlerden birisi olarak karşımıza çıkmaktadır. Artan nüfus, atıklarla ve çevresel etkilerle başa çıkmayı zorlaştırdı. İnşaat atıkları sadece çevresel bozulmaya neden olmakla kalmıyor, aynı zamanda doğal kaynakları da tüketiyor. İnşaat atıkları, sürdürülebilir kalkınmanın önemli bir kısmından sorumludur ve yılda milyonlarca tona ulaşmaktadır. Bina atıkları sadece çevresel açıdan değil aynı zamanda ekonomik açıdan da büyük bir sorun haline geliyor. Hızlı inşaat, insanların kırsal alanlardan kentsel alanlara göçünün yanı sıra kentsel genişleme ve sanayileşmenin bir sonucudur. Nüfus arttıkça atıkların ve çevresel etkilerin yönetilmesi zorlaşıyor. İnşaat atıkları çevre ve sağlık açısından kötüdür, kaynakları tüketir ve aynı zamanda doğal dünyayı da emer. İnşaat atıkları sürdürülebilir kalkınmaya büyük katkı sağlıyor. Bina atığı, yalnızca ekolojik etkisi açısından değil aynı zamanda ekonomik kazancı açısından da giderek daha önemli hale geliyor. Çeşitli lifli beton karışımlarında inşaat artıklarının dolgu maddesi olarak kullanılma potansiyelini inceleyen ve bu yöntemin çevresel ve ekonomik etkilerini değerlendiren bir çalışma yapılmak istenmiştir. Organik ve suni lifler, lifli beton, betonun dayanıklılığını, çatlama direncini ve mekanik özelliklerini artırır. İnşaat atıklarından lifli beton karışımlarına kadar mevcut atıkların potansiyelini değerlendirmek ve uygun fiyata yeni malzemeler oluşturmak avantaj sağlayacaktır (Khan vd., 2024).

Çalışmada hedeflenen, inşaat yıkıntı atıklarının silindirle sıkıştırılmış beton yollarda hem ikame hem de agrega olarak kullanılmasını sağlamak, bu amaç doğrultusunda elde edilecek verilerin inşaat mühendisliği alanına katkı sağlamasıdır. Geri dönüştürülmüş agregaların (GDA) yapı alanında kullanılmış örnekleri mevcuttur. Karayolu ulaşım ağında da sürdürülebilirliğe katkıda bulunacak adımların atıldığı görülmektedir. Sürdürülebilirlik seferberliğinin inşaat yıkıntı atıklarının ikame ve agrega olarak kullanılması ile planlanan, bu atıklarının silindirle sıkıştırılmış beton yollarda uygulanması, alınacak verim ve zaman tasarrufunun hesaplanmasıdır. Bunun yanı sıra ekonomik olarak yüksek beklenen giderlerin sanılan aksine altında kalarak yarar sağlaması gözletilmektedir. Geri dönüşüm agregası ile geri dönüşüm beton tozunun lifli beton yollarda kullanılabilirliği hususunda oransal olarak hazırlanan karışımların mekanik ve fiziksel sonuçlarının incelenmesidir. Bu araştırmada, silindirle sıkıştırılmış beton yolları, Karayolu Genel Müdürlüğü tarafından belirlenen yol standartlarına, silindirle sıkıştırılmış beton yollar için teknik yönergelere göre uygun hazırlanmıştır.

## **1.2 Çalışmanın Boyutu**

Çalışmada ilerleyecek süreçlerin hangi aşamalardan oluşacağını ve detaylandırılmasının nasıl olacağına dair bilgiler verilmektedir.

Çalışmada ilk bölüm olarak, bu konudaki sorunların tez çalışması ile çözüm alternatiflerinin sunulması, çalışmanın amaç ve özetinin aktarılmasıdır.

Çalışmada ikinci bölümde ise, silindirle sıkıştırılmış beton yollar hakkında literatür araştırması, çalışmada kullanılacak malzemelerin özelliklerinin incelenmesi yer almaktadır.

Çalışmanın üçüncü bölümünde, metot ve yöntem yer alır. Çalışma içerisindeki deneysel uygulamaların malzeme miktarları, yapılış ve bitimdeki sonuçlar verilmektedir.

Çalışmanın dördüncü bölümünde, uygulaması yapılan deneyler ile taraması yapılan çalışmaların karşılaştırılması, avantaj ve dezavantajlarının bulunmasıdır.

Çalışmada beşinci bölüm, deneysel sonuçların incelenmesi, günümüzde uygulama alanlarında kullanılabilirliğinin aşamalı olarak yapılmasının değerlendirilmesi yapılır. Deneylein sonuçlarına göre, alınan verilerin analizleri yapılır. Geri dönüşümlü agregaların tane boyutlarına göre kıyaslanması, beton tozuna göre değerlendirilmesi yapılması. Bağlayıcı olarak kullanılan malzemelerin birbirleri arasındaki korelasyonu inceleyip sağlıklı bir veri analizi yapmaktır.



## 2. LİTERATÜR TARAMASI

Araç sahibi sayısı ve mutlak sayıda artış gösteren araç türlerinin giderek artması nedeniyle daha fazla seyahat talep edilmektedir. Ayrıca akıllı ulaşım sistemlerinin hayatımızda oluşturduğu bu ihtiyaca uyum sağlamak amacıyla ulaştırma politikaları da bu yönde değişmektedir. Ancak, mevcut üstyapı sistemleri optimizasyon yoluyla yenilediği zaman yenilenebilir ve daha az karbon salınımıyla seyahat etmek mümkündür. Bu bağlamda doğru bakım ve onarım ile eskiyen mevcut üstyapının yenilenmesi, mevcut üstyapıların o optimizasyonu yapılması, mevcut karayolları üzerine akıllı ulaşım sistemleri entegrasyonu, geri dönüştürülmüş malzemenin kullanımı ile düşük karbonlu modern ulaşım ağı yapımının gerçekleşmesi öncelikli stratejiler arasındadır. Bu stratejilerin en önemli unsuru içerdikleri ham maddelerdir. Özellikle 1970'lerde petrol krizinin ardından beton yolların yaygın bir şekilde yapımı Avrupa'da yoğunlaşmıştır. Beton yollar şehir içi ulaşım ağlarında sıkça kullanılmasının yanı sıra, ağır taşıtların yoğun olarak geçişi olan durumlarda alternatif çözüm olarak kullanılmaktadır. Yollar, servis süresi boyunca ağır yüklere maruz kalmaktadır. Birçok bozulma olgusuna yol açmaktadır. Özellikle çatlama, çatlağı ve tekerlek izi gibi hasarlardır (Wang vd., 2019).

Araştırmaların yapılmasının ardından oluşan birçok sonuçlarda değişkenlik gösteren bağlayıcı ürünler ve agregalar, SSB üzerindeki etkileri olumlu veya olumsuz olarak sıralanmıştır. Bu konu üzerinde yapılan çalışmalarda ikame olarak kullanılan geri dönüşüm beton tozları ile sağlanması uygunluk göstermiştir (Abut, 2017).

Yapılan çalışmalarda kullanılan malzemelerin lifli olarak kullanılması özellikle SSB içerisinde yüksek dayanım elde edilmesine olanak sağlamaktadır. Bu olanaklar açısında irdelendiğinde, özellikle çelik liflerin eğilme ve basma deney sonuçları kullanılan deneylerdeki referansa göre daha fazla olduğu gözlemlenmiştir.

Beton yollarda kullanılan agregaların ve ikame malzemelerinin geri dönüşümden faydalanılarak yapılması, özellikle yüksek maliyetler açısından bakıldığında birçok yarar sağlamaktadır. Yapılan çalışmalarda katkısız olarak kullanılan çimentonun Cem I 42,5 R olduğu ve daha fazla dayanım elde edilmesi için böyle bir çalışmada

kullanıldığı belirtilmektedir. GDA (Geopolymer Transportable Agregate) betonunun 28 ve 90 günlük basınç dayanımını, ıslanma ve kurumadan sonraki dayanım kaybını ve 90 günlük betonun yapışma dayanımını inceledik. GDA'nın diğerlerine göre daha yüksek su emme özelliğine sahip olması, taze betonun çökme değerinin artmasıyla ilişkilidir. Yani GDA oranı arttıkça betonun çökme değeri azalmaktadır. Kontrol betonumuz (KB) tüm yaş grupları arasında en yüksek dayanıma sahip olmasına rağmen GDA değiştirildiğinde dayanımda azalma gözlemlendi. Ayrıca betonun GDA kullanılarak ıslatılmasından sonraki yapışma ve basınç dayanımının kontrol betona göre daha düşük olduğu tespit edilmiştir.

Bu bulgular, GDA'yı kullanırken dikkate alınması gereken önemli noktaları ve bunun malzeme seçim sürecine etkisini ortaya koymaktadır (Sefidehkan ve Şimşek, 2018).

Silindirle sıkıştırılmış beton, özel makinelerle sıkıştırılarak yerleştirilen bir beton türüdür. Bu yöntem, genellikle barajlar, yollar, havaalanları ve fabrikalar gibi çeşitli yapısal uygulamalarda kullanılmaktadır. Özellikle yüksek trafik yüklerine dayanıklılığı ile dikkat çekmektedir. SSB'nin karışım oranları, farklı tasarım yöntemlerine göre belirlenmektedir. Normal betona kıyasla farklı üretim teknikleri gerektiren SSB'ler, malzeme seçimi ve karışım tasarımı açısından dikkatli bir planlama gerektirir. Bu bağlamda, malzeme özellikleri ve karışım tasarımı üzerine yapılan araştırmalar (Şengün vd., 2017), SSB'nin performansını artırmak için kritik öneme sahiptir. Silindirle sıkıştırılmış betonun dayanıklılığı, donma-çözülme döngülerine karşı gösterdiği direnç ile ölçülmektedir (Aghabaglou vd., 2020). Araştırmalar, SSB'nin bu tür çevresel etkilere karşı yüksek dayanıklılık gösterdiğini ortaya koymuştur. Ayrıca, yüzey özellikleri de yol güvenliği açısından önem taşımaktadır (Paglia, 2023). SSB yolların inşaat süreci, konvansiyonel asfaltlama makineleri ile benzerlik göstermektedir. Ancak, beton kaplama kalınlığı genellikle 25 cm civarındadır ve bu kalınlık, yolun dayanıklılığını artırmaktadır. Uygulama aşamasında dikkat edilmesi gereken en önemli faktörlerden biri, sıkıştırma işleminin doğru bir şekilde gerçekleştirilmesidir (Calis ve Yıldız, 2019).

SSB'nin çeşitli biokütle ürünleri ikamesi yapılarak çalışmalarda bulunmaktadır. Çevresel kirliliğin yüksek olduğu günümüzde ortaya çıkan biokütle ürünlerinin atık

malzemelerinin bütünü de SSB'de kullanılması tam olarak mümkün değildir. Fabrika atık ürünlerini de bu kategoriye girdiği bilinmektedir. Aynı zamanda atık malzemelerin bir yerde saklanması içinde harcanacak ekonomik zorluklara çözüm olarak, geri dönüştürülmesi daha uygun olarak görülmektedir. Endüstriyel katı atık olarak bilenen bu ürünler SSB için uygulaması daha uygun gibi görünmektedir. Bu uygulamanın çevresel olarak temizlik gibi görünse de uygulanabilirliği konusunda çalışmaların devam etmesi gerekmektedir. Bu atıklara örnek verilmesi gerekirse kül, cüruf, metal kırıntıları, ahşap ve tekstil parçaları atık lastik gibi ürünlerdir. Bu ürünler çevresel etkilerinin zaman geçtikçe zararlı olması da bu tür çalışmalarda göz ardı edilmeyecek bir husustur. Doğa olaylarından rüzgârında depolanan konumlarından farklı yerlere sürüklenmesi de bunun sadece orada zararlı olduğu değil, taşınabilir bir etkisinin de olduğu görülmektedir. Bu ürünlerin zaman geçtikçe hava, su ve toprak için hayat akışını etkileyecek birçok olumsuz sonuçları vardır. Endüstriyel atıkların, en çok bilinen ve inşaat sektöründe kullanılan ürünü puzolanlardır (Ram Kumar ve Ramakrishna, 2022).

Yapılan çalışmada kullanılan puzolanların özelliklerine bakıldığında, oluşan kimyasal yapıların beton içerisinde birden çok nedenle kullanıldığı, asıl amacın dayanım arttırmak için denenmesidir. Silindirle sıkıştırılmış beton yollarda kullanılan puzolanlarında dayanımı ve gelen yükleri absorbe etmesi istenmektedir (Shayma Al Baghdady, 2018).

## **2.1 Silindirle Sıkıştırılmış Beton Yollar (SSB)**

Silindirle sıkıştırılmış beton yollarda doğru koşullar ve yapı kalitesi mevcut olduğunda, ağır hizmet, düşük ila orta hacimli uygulamalar için çok dayanıklı, daha az bakım gerektiren bir seçenek olarak öne çıkmaktadır (Summaira vd., 2019). Geleneksel asfalt yollarla karşılaştırıldığında daha yüksektir ancak uzun vadeli tasarruflar, uzatılmış hizmet ömrü ve azaltılmış bakım onarım sayesinde tercih edilebilir olmaktadır (American Concrete Institute, 2024).

Karayolları için üst yapı tercihlerinin en fazla tercih edilenleri arasında yer alan geleneksel beton yollar ile silindirle sıkıştırılmış beton yollar ve bitümlü sıcak

karışımlar yer almaktadır (Antunes vd., 2025). Bitümlü sıcak karışımlar diğerlerine göre daha esnek bir üst yapı olarak bilinmektedir. Esnek ve rijit olarak yapılan üst yapılar arasında da farklılıklar bulunmaktadır. Bunlar Tablo 2.1 de verilmiştir.

Tablo 2.1 Esnek ve rijit üstyapı parametreleri (Taşkınsu, 2019)

Parametre	Esnek Üstyapı	Rijit Üstyapı
Trafiğe çabuk açılabilme	++	-
Demir donatı kullanabilme	-	+
Onarım sıklığı	-	++
Dayanıklılık	+	++
Islak halde kayma sürtünme katsayısı	-	+
Zayıf taban zemininin bulunması	--	+
Yapım sırasında ısı kaybının yol açacağı sorunlar	--	+
Kaliteli agrega gereksinimi	-	+
Derz yapma zorunluluğu	+	-
Seyir konforu	++	+
Gece seyirde görüş olanakları	-	++
Yaşlanma ve kimyasal maddelerden etkilenme	--	+
Yapım sırasında çevre kirliliğini artırıcı etki	-	+
Enerji azlığından etkilenme	-	+
Taban zeminindeki ıslaklık	-	+
İklim koşullarına bağımlılık	--	++
Trafikte yüksek yıllık artış oranı	-	++
Trafikte düşük yıllık artış oranı	+	-
Trafikte yüksek ağır taşıt oranı	-	++
Üstyapı kaplama takviyesi	+	-
Üstyapı temel+kaplama değişimi	+	+
Yüksek iskonto oranı ve sınırlı yatırım kaynakları	+	-

### 2.1.1 Genel Nitelikleri

Silindirle sıkıştırılmış beton, geleneksel asfalt yollarına göre daha yüksek bir dayanım sunar. Bu, daha az bakım sağlanması ve daha uzun bir hizmet ömrüne sahip olduğu anlamına gelir. Silindirle sıkıştırılmış beton, agrega, çimento ve benzeri ucuz malzemelerle yapılabilir. Bu, onu düşük düzeyde bir seçenek haline getirir. Silindirle

sıkıştırılmış beton, ayrılabilir enerji kaynakları, geri dönüştürülmüş yöntemler ve azaltılmış karbon ayak izi ile çevresel zararın minimum düzeyde kalmasına katkı sağlar (Bayraktar vd., 2025). Zararlı kimyasallar, atık su, gürültü veya diğer çevre sorunlarına neden olmayan kayıtsız teknolojilerle üretilmiştir. Silindirle sıkıştırılmış beton yollar, yüksek trafik değişimi taşımaya dayanıklı ve ağır yükler için idealdir. Silindirle sıkıştırılmış beton, su geçirmezdir ve bu, tekerlek izi oluşumunu önleyerek uzun ömürlü olmasını sağlar. Minimum bakım gerektirdiği için anında müdahale edilerek, tıkanıklık ve onarım gerektirmeden uzun yıllar boyunca hizmet vermektedir (Taşlıgil ve Şahin, 2022). Hızlı bir şekilde uygulanabilir olduğundan inşaat süresinin kısaltılması ve trafik veriminin azaltılmasına yardımcı olur.

### **2.1.2 Malzeme Seçimi, Karışım Tasarımı ve Laboratuvar Üretimi**

Malzeme seçimi, karışım tasarımı ve laboratuvar üretimi, beton teknolojisi ve inşaat mühendisliği alanında önemli kavramlardır (Ay ve Tekin, 2023). Her biri hakkında önemli noktalar olup, bunlar açıklayıcı maddeler şeklinde şöyle devam etmektedir:

Malzeme Seçimi:

- Çimento türleri: Sıradan portland çimentosu (OPC), karıştırılmış çimentolar, özel çimentolar (düşük ısı, hızlı sertleşme).
- Agregası (ince, iri): Kaynak, sınıflandırma, şekil, yüzey dokusu, temizlik.
- Katkı maddeleri (kimyasal, mineral): Katkı türleri, dozajları, fonksiyonları (geciktirici, hızlandırıcı).
- Su: Temiz, içilebilir, sıcaklığı kontrol edilebilir, katkılarda arındırılmış.
- Tamamlayıcı Çimentolu Malzemeler (TÇM): Uçucu kül, silis dumanı, cüruf, doğal puzolan.
- Elyaf takviyesi: Lif tipleri (çelik, polipropilen), özelliklere etkileri.

#### Karışım Tasarımı:

- Oranlama: Karışım bileşenlerinin, oranlarının belirlenmesi.
- İşlenebilirliği (akışkanlık, çökme): dengeleme, iyileştirme.
- Mukavemet geliştirme: Kürlenme, test. Basınç, çekme, eğilme.
- Dayanıklılık: Geçirgenliğin, dirençlerin (örneğin sülfat, asit) en aza indirilmesi.
- Taze özellikler: Yoğunluk, sıcaklık, hava içeriği, priz süreleri.
- Sertleştirilmiş özellikler: Mukavemet, modül, büzülme, sürünme.

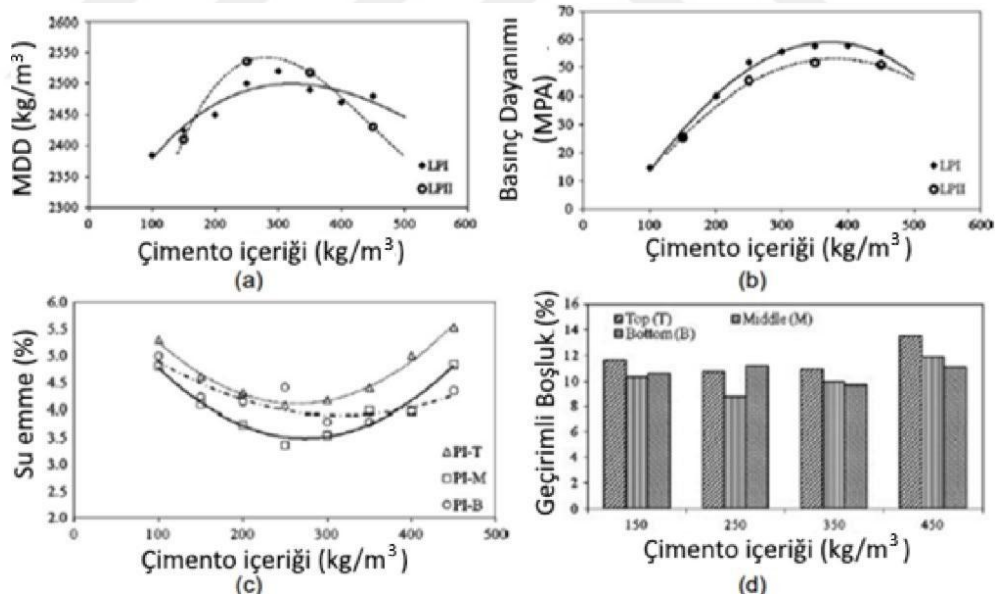
#### Laboratuvar Üretimi:

- Ölçek: Mini mikserler, parti mikserleri, beton mikserleri.
- Karıştırma kontrolü: Enerji girişi, bileşenlerin eklenme sırası.
- Kürlenme: Sıcaklık, nem, dış etkenler.
- Döküm: Kalıplar (küpler, silindirler, prizmalar), konsolidasyon yöntemleri.
- Test: Basınç dayanımı, eğilme dayanımı, yoğunluk, geçirgenlik.
- Hızlandırılmış testler: Hızlı klorür göçü, sülfat direnci gibi.

Bunlar, çeşitli uygulamalar için istenen özelliklere sahip bir beton karışımı geliştirme de temel hususlardır. Kullanılan malzemeler, bunları birleştirme yolları ve üretim süreçleri, nihai ürünü etkiler (Bakırcı ve Aydoğdu, 2023). Laboratuvar testleri, saha koşullarını simüle eder ve tam ölçekli üretimden önce performansı değerlendirmeye yardımcı olur.

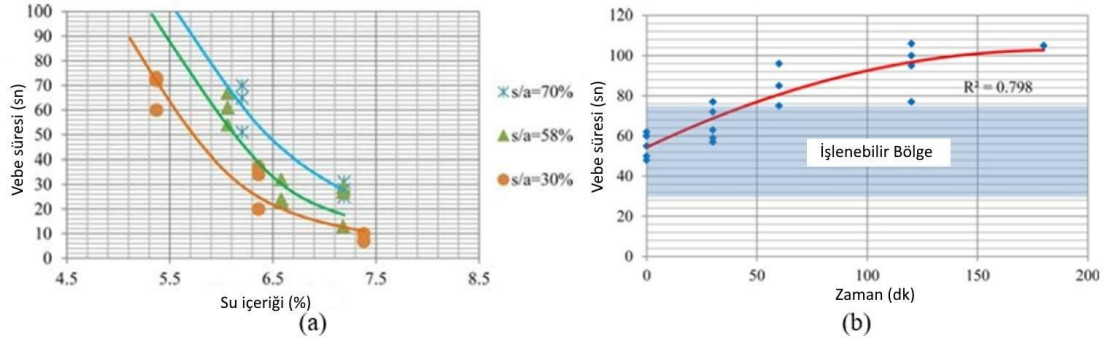
### 2.1.3 SSB Kaplamalarının Fiziksel ve Mekanik Performansı

Üretilen SSB kaplamalarının performansının kapsamlı bir şekilde karakterize edilmesini içerir. Bu karakterizasyon, çeşitli test yöntemleri kullanılarak gerçekleştirilir ve kaplamanın mekanik dayanıklılığını (çekme dayanımı, basınç dayanımı, sertlik, esneklik), termal dayanıklılığını (ısı dayanımı, ısı iletkenliği), kimyasal dayanıklılığını (korozyon direnci, çözücü dayanımı), optik özelliklerini (ışığın geçirgenliği, yansımaları), yüzey özelliklerini (pürüzlülük, ıslanabilirlik) ve diğer ilgili özelliklerini belirlemeyi kapsar (European Concrete Paving Association, 2019). Elde edilen veriler, kaplamanın nihai uygulamada beklenen performansını değerlendirmek ve iyileştirme alanlarını belirlemek için kullanılır. Bu aşama aynı zamanda kaplamanın uzun süreli dayanıklılığının ve çevresel faktörlere karşı direncinin değerlendirilmesini de içerir. Bu veriler, kaplamanın çeşitli endüstriyel uygulamalardaki kullanım uygunluğunu belirlemek için kullanılır. Alınan veriler, SSB çalışmalarında kullanılan çimentonun dozajının etkisi Şekil 2.1 de verilmiştir.



Şekil 2.1 Çimento dozajının SSB karışımı üzerine etkisi (a, b, c, d)

Verilerin incelenmesi sonrasında SSB de oluşacak su emme ve vebe süreleri de incelenmiştir. İncelenen verilerde vebe sürelerinin 120sn geçmiş numuneler analize alınamamıştır. Alınan bu verilerin analizleri Şekil 2.2 de agrega gradasyonunun su oranlarına bağlı vebe süre değişimleri ile vebe süresinin zamanla değişimi verilmiştir.

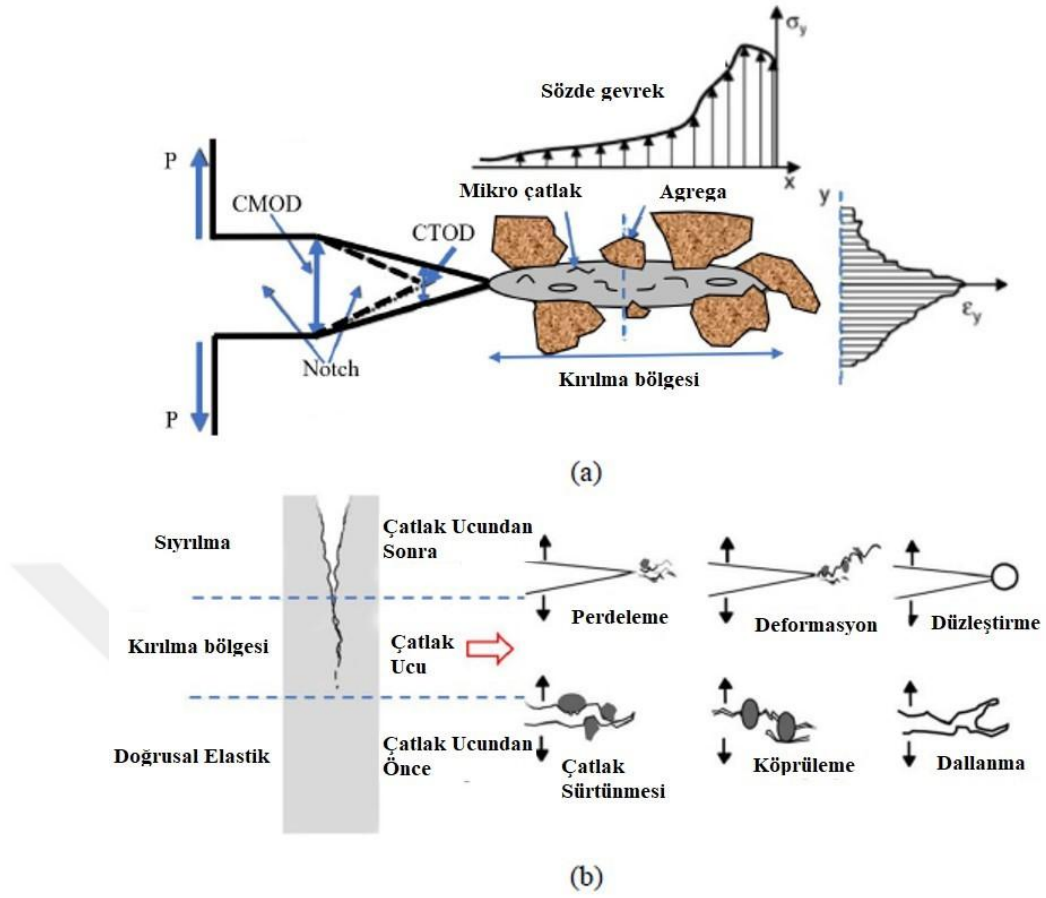


Şekil 2.2 SSB işlenebilme süresi (a, b)

SSB'nin çatlak özelliklerine dair literatürde yer alan çalışmaların sayısı oldukça sınırlıdır. Kırılma parametrelerinin belirlenmesi üzerine yapılan araştırmaların çoğunun, metal malzemelerle ilişkili olarak konvansiyonel beton üzerinde yoğunlaştığı görülmektedir. Ancak, en belirgin sertlik ve kırılma parametrelerini etkileyen liflerin kullanımıyla ilgili araştırmalar, SSB'ler açısından oldukça yenidir.

Bunun yanı sıra, geleneksel beton alanı bile araştırmacılar için önemli zorluklar içermektedir. Çelik malzemelerden farklı olarak, beton heterojen bir yapıya sahiptir. Bu durum, betonda kullanılmayan homojen malzemeler için standart prosedürlerin uygulanmasını ve sonuçların yorumlanmasını oldukça güçleştirmektedir.

SSB'lerin çatlak özellikleri üzerine daha fazla araştırma yapılması gerekmektedir. Bu alandaki bilgi eksikliklerinin giderilmesi, hem teorik hem de pratik açıdan önemli katkılar sağlayabilir. Ayrıca, betonun karmaşık yapısının anlaşılması, mühendislik uygulamalarında daha etkili ve güvenilir sonuçlar elde edilmesine olanak tanıyacaktır. Bununla ilgili mekanik ve fiziksel özelliklerine karşı betonda ve SSB de oluşan kırılmalar Şekil 2.3 de verilmiştir.



Şekil 2.3 a) KPB Kavramı b) Beton için çatlak yayılma mekanizmaları

Bu tür mekanizmaların varlığı, yarı kırılğan malzemeler olan betonun kırılma özelliklerini belirlemede yetersiz kalmasına neden olmuştur. Bu durum, araştırmacıları çeşitli doğrusal olmayan kırılma modelleri geliştirmeye yönlendirmiştir.

Kırılma tokluğu gibi mekanizmaların etkisi, beton gibi yarı kırılğan malzemelerin kırılma davranışlarını anlamada sınırlamalar ortaya çıkarmaktadır. Bu nedenle, bu malzemelerin kırılma özelliklerini daha iyi açıklamak amacıyla birçok farklı doğrusal olmayan kırılma modeli tasarlanmıştır.

Sonuç olarak, yarı kırılğan malzemelerin kırılma özelliklerini belirlemek için mevcut mekanizmaların yetersizliği, araştırmacıların yeni ve çeşitli doğrusal olmayan kırılma modelleri geliştirmesine zemin hazırlamıştır. Bu modeller, malzemelerin kırılma davranışlarını daha kapsamlı bir şekilde incelemeye olanak tanımaktadır.

## **2.1.4 SSB Üretim Aşamaları**

### **2.1.4.1 Proje tasarım ve malzeme seçimi**

Yol tasarımında, esnek yoğunluklar, trafik akışı, zemin durumu ve iklim koşulları gibi çeşitli unsurlar dikkate alınmaktadır. Proje tasarımının tamamlanmasının ardından, gerekli malzemelerin (çimento, agrega, su) yanı sıra, inşaat sürecinde kullanılacak ekipmanların (beton santrali, transmikser, sıkıştırma silindiri) belirlenmesi süreci başlar.

Bu aşamada, yolun dayanıklılığı ve uzun ömürlülüğü için uygun malzeme ve ekipman seçimi büyük önem taşımaktadır. Zemin koşulları ve iklim faktörleri, yolun yapısal bütünlüğünü etkileyen kritik unsurlar olduğundan, bu unsurların titizlikle analiz edilmesi gerekmektedir. Böylece, yolun performansı ve güvenliği artırılabilir.

Yol tasarımında dikkate alınması gereken faktörler, projenin başarısını doğrudan etkileyen unsurlar olarak öne çıkmaktadır. Doğru malzeme ve ekipman seçimi, yolun işlevselliğini ve dayanıklılığını artırarak, uzun vadede bakım ve onarım maliyetlerini azaltma potansiyeline sahiptir. Bu nedenle, tasarım sürecinin her aşamasında detaylı bir değerlendirme yapılması elzemdir.

### **2.1.4.2 Zemin hazırlığı**

Yol inşaatının başlangıç aşaması, zemin hazırlığı ile başlar. Bu süreçte, zemin drenaj sistemleri, geotekstil ve geogrid gibi unsurlar yerleştirilerek zemin yapısının güçlendirilmesi sağlanır. Bu uygulamalar, yolun dayanıklılığını artırmak ve suyun etkilerini minimize etmek amacıyla gerçekleştirilir. Zemin hazırlığı tamamlandıktan sonra, istinat duvarları inşa edilir ve drenaj sistemleri oluşturulur. Bu aşama, zemin stabilitesini sağlamak ve olası su birikintilerinin önüne geçmek için kritik öneme sahiptir. İstinat duvarları, zemin kaymalarını önleyerek yolun güvenliğini artırır. Zemin, belirli bir yoğunlukta sıkıştırılarak yol inşaatına hazır hale getirilir. Sıkıştırma işlemi, zemin yapısının sağlamlığını artırarak yolun uzun ömürlü olmasını sağlar. Bu aşama, yolun taşıma kapasitesini ve genel performansını etkileyen önemli bir faktördür.

#### **2.1.4.3 Silindirle sıkıştırılmış beton karışımları**

Çimento, agrega, su ve kimyasal katkı maddeleri, belirli oranlarda bir araya getirilir. Karışımın homojen bir yapıya sahip olabilmesi için konik santralde gerekli ayarlamalar yapılır. Bu süreç, malzemelerin etkili bir şekilde karıştırılmasını sağlamak amacıyla önemlidir.

Karışımın kalitesinin sağlanabilmesi için titiz bir kalite kontrol süreci uygulanır. Bu aşama, inşaat malzemelerinin dayanıklılığını ve performansını etkileyen kritik bir faktördür. Kalite kontrol, hem malzeme bileşenlerinin uygunluğunu hem de karışımın genel özelliklerini değerlendirmek için gereklidir. Çimento ve diğer bileşenlerin doğru oranlarda birleştirilmesi, inşaat projelerinin başarısı için hayati öneme sahiptir. Homojen karışım elde edilmesi ve kalite kontrol süreçlerinin etkin bir şekilde yürütülmesi, yapıların güvenilirliğini artırır ve uzun ömürlü olmasını sağlar. Bu nedenle, her aşamanın dikkatlice yönetilmesi gerekmektedir.

#### **2.1.4.4 Silindirle sıkıştırılmış betonun taşınması**

Beton karışımları, transmikseler aracılığıyla damalı yolların başlangıç noktalarına taşınmaktadır. Bu süreç, betonun taşınmasında kullanılan yöntemlerin çeşitliliğini göstermektedir. Beton taşımacılığı, hem geleneksel yöntemlerle hem de robotik sistemlerle gerçekleştirilebilmektedir. Robotik sistemler, beton taşımacılığında önemli bir rol oynamaktadır. Robotlu vektörler, betonun daha düzgün bir yüzeye yerleştirilmesini sağlamakta ve bu sayede inşaat süreçlerinde kaliteyi artırmaktadır. Bu tür sistemlerin kullanımı, iş gücünü azaltırken aynı zamanda verimliliği de artırmaktadır. Teknolojinin de gelişmesiyle belirli bir hat üzerinde robotların gerekli görülen betonu serim yapması yeni bir teknolojidir. Beton karışımlarının taşınmasında kullanılan yöntemler, inşaat sektöründe önemli bir gelişim göstermektedir. Transmikseler ve robotlu vektörler, bu süreçteki yenilikçi yaklaşımları temsil etmekte ve inşaat projelerinin daha hızlı ve etkili bir şekilde tamamlanmasına katkıda bulunmaktadır. Bu durum, sektördeki rekabeti artırmakta ve kalite standartlarını yükseltmektedir.

#### **2.1.4.5 Sıkıştırma**

Betonun taşınmasının ardından, kesin sıkıştırma işlemleri devreye girer. Bu aşamada, sıkıştırma silindiri, üzerindeki ağırlıkların etkili bir şekilde depolanmasını temin eder. Sıkıştırma işlemi, hem boyuna hem de enine yönlerde gerçekleştirilir. Bu yöntem, betonun dayanıklılığını artırmak ve yapısal bütünlüğünü sağlamak amacıyla kritik bir öneme sahiptir. Sıkıştırma süreci, betonun kalitesini ve performansını doğrudan etkileyen bir faktördür. Bu nedenle, uygulamanın titizlikle yapılması, inşaat projelerinin başarısı açısından hayati bir rol oynamaktadır.

#### **2.1.4.6 Yüzey cila çıkarma**

Sıkıştırma işlemi sonrasında, sonuç elde edilene kadar yüzeyin cilalanması gerçekleştirilir. Bu işlem, hem otomatik sistemler hem de manuel yöntemler kullanılarak yapılabilir. Otomatik silme makineleri, bu süreçte çıkartma işleminin düzgün bir şekilde gerçekleştirilmesini sağlar. Bu makineler, iş akışını hızlandırarak verimliliği artırır. Manuel yöntemler ise, operatörün dikkatini ve becerisini gerektirir. Her iki yöntem de, nihai ürünün kalitesini etkileyen önemli aşamalardır.

#### **2.1.4.7 Kürlenme işlemi**

Cilalama işlemi tamamlandıktan sonra, yolun 7 ila 10 gün boyunca kürlenme sürecine tabi tutulması gerekmektedir. Bu süre zarfında, yolun dayanıklılığını artırmak ve yüzeyin kalitesini korumak amacıyla gerekli önlemler alınır.

Kürlenme sürecinin sonunda, yolun yüzeyine kapanma kimyasalı uygulanır. Bu kimyasal, yolun uzun ömürlü olmasını sağlamak ve dış etkenlere karşı direnç kazandırmak için kritik bir rol oynamaktadır. Cilalama ve kürlenme işlemleri tamamlandığında, yolun hem estetik hem de fonksiyonel özellikleri en üst düzeye çıkarılmış olur. Bu süreç, yolun kullanım ömrünü uzatırken, aynı zamanda bakım maliyetlerini de azaltmaktadır.

#### **2.1.4.8 Test ve kontrol**

Yolun trafiğe açılabilmesi için belirli süreçlerin tamamlanması gerekmektedir. Bu süreçler arasında, testlerin sonuçlarının sıcaklık açısından değerlendirilmesi önemli bir yer tutar. Sıcaklık kontrolü, yolun güvenli bir şekilde kullanılabilmesi için kritik bir aşamadır. Sertlik testi ve kalite kontrolü, yolun dayanıklılığını ve güvenilirliğini sağlamak amacıyla gerçekleştirilen diğer önemli adımlardır. Bu testler, yolun yapısal bütünlüğünü ve uzun ömürlü olmasını garanti altına alır. Bu aşamaların tamamlanmasının ardından yol, trafiğe açılmaya hazır hale gelir.

Sonuç olarak, yolun açılması için gerekli olan tüm testlerin ve kontrollerin titizlikle yapılması, hem sürücülerin hem de yayaların güvenliğini sağlamak açısından büyük önem taşımaktadır. Bu süreçlerin eksiksiz bir şekilde tamamlanması, yolun güvenli bir şekilde kullanılabilmesi için yapılaması hassasiyet taşımaktadır.

#### **2.1.5 SSB Uygulama Alanları**

##### **2.1.5.1 Karayolları**

Karayolları, dayanıklılık ve uzun ömürlülük açısından önemli bir gereksinim taşımaktadır. Bu bağlamda, silindirle sıkıştırılmış beton, karayolu inşaatında sıklıkla tercih edilen bir malzeme haline gelmiştir. Bu tür yollar, ağır taşıma kapasitesine sahip olmalarıyla dikkat çekmekte ve uzun süreli kullanım imkânı sunmaktadır.

Sıkıştırılmış beton yollar, karayollarının performansını artırmak amacıyla tasarlanmıştır. Bu yollar, yüksek trafik yoğunluğuna dayanabilecek şekilde inşa edilmekte ve bu sayede uzun yıllar boyunca güvenli bir ulaşım sağlamaktadır. Silindirle sıkıştırılmış betonun kullanımı, bu yolların dayanıklılığını ve işlevselliğini artırmaktadır. Karayollarında kullanılan sıkıştırılmış beton, hem ekonomik hem de pratik bir çözüm sunmaktadır. Ağır yük taşıma kapasitesi ve uzun ömürlülüğü sayesinde, bu tür yollar, modern ulaşım altyapısının vazgeçilmez bir parçası haline gelmiştir. Bu nedenle, karayolu projelerinde silindirle sıkıştırılmış betonun tercih edilmesi, sürdürülebilir bir ulaşım sistemi için kritik bir öneme sahiptir.

### **2.1.5.2 Havaalanı**

Havaalanı pistlerinin tasarımında, yüksek dayanıklılık ve uzun ömürlülük önemli kriterlerdir. Bu ihtiyaçları karşılamak amacıyla silindirle sıkıştırılmış beton malzemesi tercih edilmektedir. Bu tür beton, havaalanı pistlerinin zorlu koşullarına dayanacak şekilde geliştirilmiştir. Havaalanı pistlerinin inşasında kullanılan malzemelerin kalitesi, pistlerin performansını doğrudan etkiler. Silindirle sıkıştırılmış beton, bu bağlamda, hem dayanıklılığı hem de uzun ömürlü yapısıyla öne çıkmaktadır. Bu özellikleri sayesinde, hava trafiğinin yoğun olduğu bölgelerde güvenli bir kullanım sağlar. Havaalanı pistlerinin sürdürülebilirliği açısından, kullanılan malzemelerin seçimi kritik bir rol oynamaktadır. Silindirle sıkıştırılmış beton, havaalanı pistlerinin gereksinimlerini karşılamakla kalmayıp, aynı zamanda bakım maliyetlerini de azaltarak ekonomik bir çözüm sunmaktadır. Bu nedenle, havaalanı inşaatlarında bu malzemenin yaygın olarak tercih edilmesi kaçınılmazdır.

### **2.1.5.3 Limanlar**

Limanlar, yoğun trafik ve ağır yüklerle karşı karşıya kalmaktadır. Bu tür zorluklarla başa çıkabilmek için silindirle sıkıştırılmış beton kullanımı, bu yapılar için önemli bir çözüm sunmaktadır. Bu malzeme, limanların dayanıklılığını artırarak, uzun süreli bir kullanım imkânı tanımaktadır. Limanların işlevselliği, yüksek hacimli taşıma ve ağır yüklerin yönetimi ile doğrudan ilişkilidir. Bu bağlamda, silindirle sıkıştırılmış beton, limanların yapısal bütünlüğünü korumak için kritik bir rol oynamaktadır. Bu tür beton, limanların maruz kaldığı zorlu koşullara karşı direnç göstererek, uzun ömürlü bir altyapı sağlamaktadır.

Limanların sürdürülebilirliği açısından, kullanılan malzemelerin kalitesi büyük önem taşımaktadır. Silindirle sıkıştırılmış beton, hem dayanıklılığı hem de uzun süreli performansı ile limanların gereksinimlerini karşılamaktadır. Bu nedenle, liman inşaatlarında bu tür malzemelerin tercih edilmesi, hem ekonomik hem de yapısal açıdan avantajlar sunmaktadır.

#### 2.1.5.4 Diğer hususi alanlar

Depo alanları, ağır yüklerin taşınması ve uzun süreli kullanıma uygun bir yapı gerektirmektedir. Bu tür alanlarda, dayanıklılık ve sağlamlık ön planda tutulmalıdır. Silindirle sıkıştırılmış beton, bu ihtiyaçları karşılamak için ideal bir malzeme olarak öne çıkmaktadır. Depo sahalarının tasarımında, yük taşıma kapasitesinin yanı sıra, malzemenin uzun ömürlü olması da önemlidir. Silindirle sıkıştırılmış beton, bu özellikleri sayesinde depo alanlarının zorlu koşullarına dayanıklılık gösterir. Bu tür beton, hem yük taşıma hem de aşınma direnci açısından avantajlar sunar. Depo sahalarında kullanılan malzemelerin seçimi, işlevsellik ve dayanıklılık açısından kritik bir rol oynamaktadır. Silindirle sıkıştırılmış beton, bu alanların gereksinimlerini karşılayarak, uzun süreli ve güvenilir bir kullanım sağlar. Bu nedenle, depo sahalarının inşasında bu tür betonun tercih edilmesi, yapının genel performansını artırmaktadır.

Sanayi alanları, belirli durumlarda ağır yüklerin taşınması ve uzun süreli kullanım için özel gereksinimlere sahiptir. Bu tür alanlarda, silindirle sıkıştırılmış beton, dayanıklılığı ve sağlamlığı ile bu ihtiyaçları karşılamakta önemli bir rol oynamaktadır. Ağır sanayi sahalarında, zemin yapısının dayanıklılığı kritik bir öneme sahiptir. Silindirle sıkıştırılmış beton, bu tür zeminlerin inşasında tercih edilen bir malzeme olarak, uzun ömürlü ve güvenilir bir çözüm sunmaktadır. Bu tür sanayi sahalarının tasarımında, yük taşıma kapasitesinin yanı sıra, zemin malzemesinin uzun süreli dayanıklılığı da göz önünde bulundurulmalıdır. Silindirle sıkıştırılmış beton, bu gereksinimleri karşılayarak, sanayi alanlarının verimliliğini artırmaktadır.

Otoparklar, yoğun trafik akışının yaşandığı alanlar olduğundan, bu mekanların zemin yapısının dayanıklı olması büyük önem taşımaktadır. Bu bağlamda, silindirle sıkıştırılmış beton, otoparkların zemininde aranan dayanıklılık kriterlerini karşılamakta etkili bir malzeme olarak öne çıkmaktadır. Otoparkların işlevselliği ve güvenliği açısından, zemin malzemesinin kalitesi kritik bir rol oynamaktadır. Yoğun araç trafiği altında zemin deformasyonlarının önlenmesi için, silindirle sıkıştırılmış beton gibi sağlam ve dayanıklı malzemelerin kullanılması gerekmektedir. Bu tür zemin uygulamaları, otoparkların uzun ömürlü olmasını sağlarken, aynı zamanda bakım maliyetlerini de azaltmaktadır. Dolayısıyla, otopark projelerinde silindirle

sıkıştırılmış beton tercih edilmesi hem ekonomik hem de pratik bir çözüm sunmaktadır.

Spor tesislerinin inşasında, zemin dayanıklılığı önemli bir faktördür. Özellikle atletizm pistleri gibi belirli spor alanlarında, zemin malzemesinin kalitesi performansı doğrudan etkileyebilir. Bu nedenle, bu tür tesislerde genellikle silindirle sıkıştırılmış beton tercih edilmektedir. Dayanıklı zeminler, sporcuların güvenli bir şekilde antrenman yapabilmesi ve yarışmalara katılabilmesi için kritik öneme sahiptir. Atletizm pistleri, yüksek düzeyde performans gerektiren bir spor dalı olduğundan, zemin yapısının sağlamlığı ve uygunluğu büyük bir rol oynamaktadır. Silindirle sıkıştırılmış beton, bu ihtiyacı karşılamak için ideal bir çözüm sunmaktadır. Spor tesislerinde zemin seçimi, sadece dayanıklılık değil, aynı zamanda sporcuların performansını artırma açısından da dikkate alınmalıdır. Silindirle sıkıştırılmış beton, atletizm pistleri için sağladığı sağlamlık ve uzun ömürlülük ile bu alandaki standartları belirlemektedir. Bu tür zeminler, sporcuların en iyi performanslarını sergileyebilmeleri için gerekli olan güvenli ve istikrarlı bir ortam sunar.

Askeri tesislerin inşasında, dayanıklılık ve uzun ömürlülük önemli bir gereklilik olarak öne çıkmaktadır. Bu tür yapılar, zorlu koşullara ve uzun süreli kullanıma dayanacak şekilde tasarlanmalıdır. Bu bağlamda, silindirle sıkıştırılmış beton, bu ihtiyaçları karşılamak için ideal bir malzeme olarak değerlendirilmektedir. Askeri yapılar hem stratejik hem de operasyonel açıdan kritik öneme sahip olduğundan, inşaat malzemelerinin seçimi büyük bir titizlikle yapılmalıdır. Silindirle sıkıştırılmış beton, yüksek dayanıklılığı ve uzun ömürlü yapısıyla, askeri tesislerin gereksinimlerini karşılamakta etkili bir çözüm sunmaktadır. Bu malzeme, çeşitli iklim koşullarında ve zorlu çevresel şartlarda bile performansını koruyabilmektedir. askeri tesislerin inşasında kullanılan malzemelerin kalitesi, bu yapıların işlevselliği ve güvenliği açısından hayati bir rol oynamaktadır. Silindirle sıkıştırılmış beton hem dayanıklılığı hem de uzun ömürlülüğü ile askeri tesislerin gereksinimlerini karşılamakta önemli bir yer tutmaktadır. Bu nedenle, askeri inşaat projelerinde bu tür malzemelerin tercih edilmesi, stratejik bir yaklaşım olarak değerlendirilmektedir.

Baraj inşaatında, suya karşı dayanıklı ve uzun ömürlü malzemelerin kullanılması büyük önem taşımaktadır. Bu bağlamda, silindirle sıkıştırılmış beton, bu tür gereksinimleri karşılayabilen ideal bir malzeme olarak öne çıkmaktadır. Barajların sağlam temellerinin oluşturulabilmesi için, suya dayanıklılık ve uzun ömürlülük özelliklerine sahip malzemelerin seçilmesi gerekmektedir. Silindirle sıkıştırılmış beton, bu özellikleri barındırarak baraj yapımında tercih edilen bir yapı malzemesi haline gelmiştir. Su yapılarının güvenliği ve dayanıklılığı açısından, barajların temellerinde kullanılan malzemelerin kalitesi kritik bir rol oynamaktadır. Bu noktada, silindirle sıkıştırılmış beton hem suya karşı dirençli olması hem de uzun süreli dayanıklılık sunması nedeniyle önemli bir seçenek olarak değerlendirilmektedir.

Gaz ve petrol tesislerinin inşasında, zemin dayanıklılığı büyük bir önem taşımaktadır. Bu tür tesislerin güvenli ve verimli bir şekilde çalışabilmesi için, zemin yapısının sağlam olması gerekmektedir. Bu bağlamda, silindirle sıkıştırılmış beton, bu dayanıklılık ihtiyacını karşılamak için ideal bir malzeme olarak öne çıkmaktadır. Silindirle sıkıştırılmış beton, gaz ve petrol tesislerinin zemininde sağladığı yüksek dayanıklılık ve stabilite ile dikkat çekmektedir. Bu malzeme, zemin yapısının yük taşıma kapasitesini artırarak, tesislerin uzun ömürlü olmasına katkıda bulunmaktadır. Ayrıca, bu tür beton uygulamaları, zemin deformasyonlarını minimize ederek, tesislerin güvenliğini de artırmaktadır. Gaz ve petrol tesislerinde kullanılan zemin malzemeleri, tesislerin genel performansı üzerinde doğrudan etkiye sahiptir. Silindirle sıkıştırılmış beton, bu tesislerin gereksinimlerini karşılayarak hem güvenlik hem de dayanıklılık açısından önemli bir rol oynamaktadır. Bu nedenle, bu tür tesislerin inşasında bu malzemenin tercih edilmesi, mühendislik açısından akıllıca bir seçimdir.

Rıhtım inşaatlarında, suya karşı dayanıklı ve uzun ömürlü malzemelerin kullanımı büyük önem taşımaktadır. Bu bağlamda, silindirle sıkıştırılmış beton, bu tür gereksinimleri karşılayabilen ideal bir malzeme olarak öne çıkmaktadır. Rıhtımların dayanıklılığı ve işlevselliği, kullanılan malzemelerin kalitesine doğrudan bağlıdır. Suyu maruz kalan yapılar için, silindirle sıkıştırılmış beton hem dayanıklılığı hem de uzun ömürlülüğü ile tercih edilen bir seçenek haline gelmektedir. Suyu dayanıklı malzemelerin seçimi, rıhtım projelerinin başarısı açısından kritik bir faktördür.

Silindirle sıkıştırılmış beton, bu alandaki ihtiyaçları karşılayarak, rıhtım yapılarının güvenli ve sürdürülebilir olmasını sağlamaktadır.

Köprülerin inşasında, dayanıklılık ve uzun ömür, temel unsurlar olarak öne çıkmaktadır. Bu bağlamda, silindirle sıkıştırılmış beton, köprülerin hem temeli hem de yapısal elemanları için gerekli olan bu özellikleri sağlamakta önemli bir rol oynamaktadır. Köprülerin güvenli ve sürdürülebilir bir şekilde inşa edilebilmesi için, kullanılan malzemelerin kalitesi büyük bir önem taşımaktadır. Silindirle sıkıştırılmış beton, bu malzemeler arasında yer alarak, köprülerin uzun ömürlü olmasını ve çeşitli çevresel etkilere karşı dayanıklılığını artırmaktadır. Köprülerin tasarımında ve inşasında, silindirle sıkıştırılmış betonun kullanımı hem yapısal bütünlüğü hem de uzun ömürlülüğü sağlamak açısından kritik bir öneme sahiptir. Bu malzeme, köprülerin güvenliğini ve işlevselliğini artırarak, mühendislik alanında önemli bir katkı sunmaktadır.

Demiryolu projelerinde, zemin kalitesinin artırılması amacıyla silindirle sıkıştırılmış beton kullanımı yaygınlaşmaktadır. Bu malzeme hem dayanıklılığı hem de uzun ömürlülüğü ile demiryolu altyapısının güvenilirliğini artırmaktadır. Dayanıklı bir zemin, demiryolu sistemlerinin güvenli ve verimli bir şekilde çalışabilmesi için kritik bir unsurdur. Silindirle sıkıştırılmış beton, bu tür zeminlerin oluşturulmasında sağladığı avantajlarla dikkat çekmektedir. Demiryolu altyapısında, sağlam bir zemin yapısının varlığı son derece önemlidir. Bu bağlamda, silindirle sıkıştırılmış beton, demiryolu inşaatlarının gereksinimlerini karşılamakta etkili bir malzeme olarak öne çıkmaktadır.

Apron zeminleri için en uygun malzeme, silindirle sıkıştırılmış betondur. Bu tür beton, yüksek dayanıklılığı ve yük taşıma kapasitesi ile havaalanı apronlarının gereksinimlerini etkili bir şekilde karşılar. Ayrıca, bu malzeme, hava koşullarına ve yoğun trafiğe karşı direnç göstererek, apronların uzun süreli kullanımını destekler. Uçakların park etmesi ve yükleme-boşaltma işlemlerinin gerçekleştirilmesi için kritik öneme sahip alanlardır. Bu alanların zemin yapısının dayanıklı olması, hem uçakların güvenli bir şekilde hareket etmesi hem de uzun ömürlü bir kullanım sağlaması açısından son derece önemlidir. Havaalanı apronlarının inşasında kullanılan silindirle

sıkıştırılmış beton, bakım maliyetlerini de azaltma potansiyeline sahiptir. Bu sayede, havaalanı işletmecileri hem güvenliği artırırken hem de ekonomik açıdan daha verimli bir çözüm elde etmiş olurlar. Dolayısıyla, apron zeminlerinin tasarımında bu malzemenin tercih edilmesi, havaalanı operasyonlarının sürdürülebilirliği açısından önemli bir faktördür.

Silindirle sıkıştırılmış beton, askeri havaalanlarının ihtiyaç duyduğu dayanıklılık ve uzun ömür özelliklerini sağlamak için ideal bir malzeme olarak değerlendirilmektedir. Bu beton türü, yüksek mukavemeti ve düşük bakım gereksinimi ile dikkat çekmektedir. Ayrıca, çeşitli iklim koşullarına karşı gösterdiği direnç, askeri havaalanlarının performansını artırmaktadır. Askeri havaalanlarının inşasında, dayanıklılık ve uzun ömürlülük önemli bir gereklilik olarak öne çıkmaktadır. Bu tür havaalanları, zorlu hava koşulları ve yoğun kullanım gibi faktörlere maruz kalmaktadır. Bu nedenle, inşaat malzemelerinin seçimi büyük bir titizlikle yapılmalıdır. Askeri havaalanlarının inşasında kullanılan malzemelerin kalitesi, operasyonel verimlilik açısından kritik bir rol oynamaktadır. Silindirle sıkıştırılmış beton, bu bağlamda hem dayanıklılığı hem de uzun ömürlülüğü ile askeri havaalanlarının gereksinimlerini karşılamada önemli bir çözüm sunmaktadır. Bu nedenle, bu tür havaalanlarının inşasında bu malzemenin tercih edilmesi, stratejik bir yaklaşım olarak değerlendirilmektedir.

## **2.1.6 SSB Avantaj ve Dezavantajları**

### **2.1.6.1 SSB yolların avantajları**

Silindirle sıkıştırılmış beton, yüksek dayanıklılık özelliği ile dikkat çekmektedir. Bu tür beton, zamanla karşılaştığı olumsuz koşullara karşı direnç göstererek uzun ömürlü bir yapı malzemesi olarak öne çıkar. Silindirle sıkıştırılmış beton, sağlamlığı ve uzun ömürlülüğü ile inşaat projelerinde güvenilir bir seçenek sunmaktadır. Bu dayanıklılık hem ekonomik hem de yapısal açıdan önemli avantajlar sağlamaktadır. Uzun yıllar boyunca, çeşitli çevresel etkilere ve mekanik yüklere karşı dayanıklılığını korur. Bu özellik, inşaat sektöründe bu malzemenin tercih edilmesinin başlıca nedenlerinden biridir.

Uzun ömürlü yapıları sayesinde, silindirle sıkıştırılmış beton yollar, yıllar boyunca ek maliyetler gerektirmeden hizmet verebilir. Bu durum hem kamu hem de özel sektör projelerinde bütçe yönetimini kolaylaştırmaktadır. Yatırımcılar, bu yolların uzun vadeli avantajlarını göz önünde bulundurarak daha sürdürülebilir çözümler arayışına girmektedir. Silindirle sıkıştırılmış beton yollar, bakım açısından oldukça ekonomik bir seçenektir. Bu tür yollar, uzun süreli dayanıklılıkları sayesinde minimum bakım ihtiyacı duyarlar. Bu özellikleri, onları inşaat projelerinde tercih edilen bir alternatif haline getirmektedir.

Yüksek taşıma kapasitesine sahip olan bu yollar, ağır yüklerin taşınması için ideal bir altyapı sunmaktadır. Bu özellikleri sayesinde, çeşitli endüstriyel faaliyetlerde ve lojistik süreçlerde etkin bir şekilde kullanılabilirler. Bu yolların tasarımı, ağır yüklerin güvenli ve verimli bir şekilde taşınabilmesi için özel olarak yapılmıştır. Yüksek taşıma kapasiteleri hem ekonomik hem de operasyonel açıdan önemli avantajlar sağlamaktadır. Yüksek taşıma kapasitesine sahip yollar, ağır yük taşımacılığına uygunlukları ile dikkat çekmekte ve bu durum, çeşitli sektörlerdeki taşıma ihtiyaçlarını karşılamak için büyük bir fırsat sunmaktadır. Bu yolların kullanımı, taşıma süreçlerinin etkinliğini artırmaktadır.

Kaza direnci, silindirle sıkıştırılmış betonun önemli bir özelliğidir. Kaza olasılığını önemli ölçüde azaltma kapasitesine sahiptir. Yolların düzgün bir yapıya sahip olması, sürücülerin kontrolünü artırarak kazaların önlenmesine katkıda bulunur. Bu durum hem yol güvenliğini artırmakta hem de trafik akışını olumlu yönde etkilemektedir. Silindirle sıkıştırılmış beton kullanımı, yol güvenliğini artıran önemli bir faktördür. Yolların düzgünlüğü, sürücülerin dikkatini dağıtan unsurları en aza indirerek, kaza riskini azaltır. Bu bağlamda, inşaat mühendisliği ve ulaşım planlaması alanlarında bu tür malzemelerin tercih edilmesi, trafik güvenliğini sağlamak açısından kritik bir öneme sahiptir. Silindirle sıkıştırılmış beton, yol yüzeyinin dayanıklılığını artırarak, zamanla oluşabilecek deformasyonları minimize eder. Bu sayede, yol koşulları daha istikrarlı hale gelir ve sürücüler için daha güvenli bir sürüş deneyimi sunar. Düzgün yollar, sürüş esnasında meydana gelebilecek ani manevraların riskini azaltarak, kaza olasılığını düşürmektedir.

Çevre dostu bir alternatif olarak kabul edilen beton, inşaat sektöründe yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Bu kullanım, doğal kaynakların daha verimli bir şekilde yönetilmesine yardımcı olurken, çevresel etkilerin azaltılmasına da katkıda bulunmaktadır. Beton, çevre açısından zararsız bir yapı malzemesi olarak öne çıkmaktadır. Bu malzeme, doğal kaynakların korunmasına katkı sağlayarak sürdürülebilir inşaat uygulamalarına olanak tanır. Betonun çevre üzerindeki olumlu etkileri, onun doğal kaynakların korunmasına olan katkısıyla daha da belirgin hale gelmektedir. Bu durum, inşaat projelerinin ekolojik dengeyi gözeterek gerçekleştirilmesine olanak tanır. Ahşap çelik ve taş yapılarından ziyade yapı alanında kullanılması daha yaygındır. Kullanımı karayolları açısından incelendiğinde dönüştürülebilir özelliği ön plana çıkmaktadır.

Şehirlerin mimari yapısına uyum sağlayan bu yollar, çevre düzenlemesi ile birlikte daha çekici bir atmosfer yaratır. Estetik unsurlar, şehirlerin kimliğini güçlendirir. Silindirle sıkıştırılmış beton yollar, estetik açıdan hoş bir görünüm sunmaktadır. Bu tür yollar, şehirlerin genel estetiğine önemli bir katkıda bulunur. Silindirle sıkıştırılmış beton yollar, sadece işlevsellikleri ile değil, aynı zamanda görsel çekicilikleri ile de şehirlerin estetik değerine katkıda bulunmaktadır. Bu durum, şehirlerin daha cazip hale gelmesine yardımcı olur.

#### **2.1.6.2 SSB yolların dezavantajları**

Silindirle sıkıştırılmış beton yollar, çeşitli faydalarına rağmen bazı dezavantajlarla da karşılaşmaktadır. Bu yapılar, genellikle yüksek yük taşıma kapasitesine sahip olmalarına rağmen, çevresel koşullardan etkilenebilir. Özellikle su ve hava etkileri, zamanla betonda çatlaklar ve bozulmalara yol açabilmektedir. İnşaat süreci boyunca da bazı teknik zorluklar içermektedir. Uygun sıkıştırma yöntemlerinin uygulanmaması durumunda, yol yüzeyinde homojen olmayan bir yapı oluşabiliyor. Bu durum, yolun dayanıklılığını olumsuz yönde etkileyerek kullanıcılar için güvenlik problemleri doğurabilir. Bu da trafik akışını olumsuz etkileyerek kullanıcılar için ek sorunlar yaratmaktadır.

Silindirle sıkıştırılmış beton (SSB) yolların inşası, yüksek kalitede işçilik ve uzmanlık gerektiren bir süreçtir. Bu tür yolların düzgün bir şekilde inşa edilmesi hem dayanıklılık hem de performans açısından kritik öneme sahiptir. Uygulama aşamasında yapılacak hatalar, yolun genel işlevselliğini ve uzun ömürlülüğünü olumsuz yönde etkileyebilir. SSB yolların inşasında, malzeme seçimi ve uygulama teknikleri büyük bir önem taşımaktadır. Uygulama sırasında dikkat edilmesi gereken en küçük detaylar bile, yolun kalitesini ve dayanıklılığını belirleyen unsurlar arasında yer almaktadır. Bu nedenle, uzman kişiler tarafından yürütülen bir inşaat süreci, yolun performansını artırmak için gereklidir. Silindirle sıkıştırılmış beton yolların inşası, titizlik ve uzmanlık gerektiren bir alan olarak öne çıkmaktadır. Yanlış uygulamalar, yolun işlevselliğini ve güvenliğini tehlikeye atabilir. Bu bağlamda, inşaat sürecinin her aşamasında profesyonel bir yaklaşım benimsemek, uzun ömürlü ve güvenilir yolların inşası için elzemdir.

Silindirle sıkıştırılmış beton yolların yüzey yapısı, genellikle geleneksel asfalt yollarla kıyaslandığında daha fazla pürüzlülük göstermektedir. Bu pürüzlülük, yolun sürüş güvenliğini artırarak daha iyi bir çekiş sağlamaktadır. Ancak, bu durum aynı zamanda sürücüler için daha zorlu ve engebeli bir sürüş deneyimi yaratabilmektedir. Beton yolların yüzeyindeki bu pürüzlülük, araçların yol ile olan temasını güçlendirerek kayma riskini azaltmaktadır. Bununla birlikte, sürüş konforu açısından bazı olumsuz etkiler de doğurabilir. Özellikle uzun mesafe yolculuklarında, bu tür yollar sürücülerin yorgunluk hissetmesine neden olabilir.

Silindirle sıkıştırılmış beton (SSB) yollar, sıcaklık dalgalanmalarına karşı duyarlıdır ve bu durum, malzemenin genleşme ve büzülme eğilimlerini artırır. Bu fiziksel değişimler, yol yüzeyinde çatlakların meydana gelmesine yol açabilir. Sıcaklık değişiklikleri, silindirle sıkıştırılmış beton yolların yapısal bütünlüğünü etkileyen önemli bir faktördür. Genleşme ve büzülme süreçleri, zamanla yol yüzeyinde deformasyonlara neden olarak, çatlakların oluşumunu tetikleyebilir. SSB yolların tasarımında ve bakımında sıcaklık değişimlerinin dikkate alınması gerekmektedir. Aksi takdirde, yol yüzeyindeki çatlaklar hem güvenlik hem de ekonomik açıdan ciddi sorunlara yol açabilir.

Silindirle sıkıştırılmış beton (SSB) yüzeyleri, araç lastiklerinin temas etmesi durumunda daha yüksek ses seviyeleri üretebilir. Bu durum, özellikle yoğun yerleşim alanlarında yaşayan bireyler için rahatsız edici bir etki yaratabilir. Bu gürültü, çevredeki yaşam kalitesini olumsuz yönde etkileyerek, sakinlerin huzurunu bozabilir. Özellikle şehir içi bölgelerde, SSB ile kaplanmış yolların gürültü üretimi, trafik yoğunluğuna bağlı olarak daha da belirgin hale gelebilir.

## 2.2 Atık Beton Agregaları

Atık beton agregaları, inşaat ve yıkım süreçleri sonucunda oluşan beton atıklarının geri dönüşümü ile elde edilen malzemelerdir. Bu tür agregalar, çevresel sürdürülebilirlik açısından kritik bir öneme sahiptir ve doğal kaynakların korunmasına yardımcı olur. Silindirle sıkıştırılmış beton (SSB) uygulamalarında, atık beton agregalarının kullanımı, ekonomik ve çevresel faydalar sunma potansiyeline sahiptir. İnşaat sektöründe atık beton agregalarının kullanımı hem maliyetleri düşürmekte hem de çevresel etkileri azaltmaktadır. Bu malzemelerin geri dönüştürülmesi, inşaat atıklarının yönetiminde önemli bir strateji olarak öne çıkmaktadır. Ayrıca, doğal agregaların kullanımını azaltarak, doğal kaynakların daha verimli bir şekilde kullanılmasına olanak tanır (Türkiye Hazır Beton Birliği, 2023). SSB yollarında atık beton agregalarının entegrasyonu, sürdürülebilir inşaat uygulamalarının bir parçası olarak değerlendirilmektedir. Bu uygulama hem çevresel hem de ekonomik açıdan olumlu sonuçlar doğurmakta ve inşaat sektörünün daha yeşil bir geleceğe yönelmesine katkıda bulunmaktadır (Bayraktar vd., 2021). Dolayısıyla, atık beton agregalarının kullanımı, inşaat endüstrisinde önemli bir gelişim alanı olarak öne çıkmaktadır.

Atık beton agregalarının SSB yollarında kullanımı hem çevresel hem de ekonomik açıdan kayda değer faydalar sağlamaktadır. İnşaat sektöründe sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşılmasına katkıda bulunurken, aynı zamanda doğal kaynakların korunmasına da yardımcı olur (Benyarar vd., 2023). Etkin bir şekilde hayata geçirilebilmesi için belirli teknik unsurlara özen gösterilmesi gerekmektedir. Uygun mühendislik standartlarının ve malzeme özelliklerinin dikkate alınması, projenin başarısını doğrudan etkilemektedir. Kalite kontrol önlemlerinin titizlikle uygulanması, atık beton agregalarının performansını artırmakta ve uzun ömürlü yapılar elde

edilmesine olanak tanımaktadır. Bu nedenle hem uygulayıcıların hem de denetleyici kuruluşların bu hususlara dikkat etmesi büyük önem taşımaktadır.

Silindirle sıkıştırılmış betonlar (SSB), geleneksel beton malzemelerine kıyasla daha yeni bir yapı malzemesi olarak öne çıkmakta ve genellikle yol ile baraj inşaatlarında tercih edilmektedir. Bu malzemenin avantajları arasında hızlı ve kolay üretim, düşük maliyet ve geleneksel beton üretiminde kullanılan hammadde kaynaklarının yeniden değerlendirilmesi yer almaktadır. SSB üretiminde, kaynakların korunması ve atık malzemelerin yeniden kullanımı, çevresel etkilerin azaltılmasının yanı sıra, atıkların taşınması, depolanması ve bertaraf sırasında oluşan enerji kaybı ve maliyetin düşürülmesi açısından da büyük önem taşımaktadır. Bu çalışmada, silindirle sıkıştırılmış atık betonlar, uygun boyutlarda öğütülerek SSB üretiminde kullanılmıştır. Atık agregalar, iri agrega olarak %0; %50 ve %100 oranlarında değerlendirilmiş, dolomit agregası iri agrega, doğal kum ince agrega ve CEM I 42,5R Portland çimentosu bağlayıcı olarak kullanılmıştır. Su/çimento oranı 0,36 olan SSB üretimi sırasında, her bir kademe yaklaşık 15 saniye süreyle iki aşamada sıkıştırma işlemi gerçekleştirilmiştir. Üretilen numuneler, bir gün sonra kalıptan çıkarılarak deney gününe kadar kirece doymun suda bekletilmiştir. Elde edilen betonların birim hacim ağırlığı; 7 ve 28 günlük basınç dayanımı, ultrases geçiş hızı, elastisite modülü ve aşınma direnci gibi fiziksel özellikleri belirlenmiştir. Deneysel sonuçlar, atık SSB agregasının Los Angeles aşınma direnci ve su emme gibi beton kalitesini etkileyen fiziksel özellikler açısından homojenlik sağladığını göstererek, bu malzemenin SSB üretiminde yeniden kullanım potansiyeline sahip olduğunu ortaya koymaktadır.

### **2.3 Atık Beton Tozu**

İnşaat ve yıkım süreçleri sırasında oluşan beton atıklarının öğütülmesi veya parçalanmasıyla elde edilen ince malzeme, atık beton tozu olarak adlandırılmaktadır. Bu malzeme, çevresel sürdürülebilirlik açısından önemli bir kaynak oluşturmakta ve silindirle sıkıştırılmış beton (SSB) yolların inşasında giderek daha fazla incelenmektedir. Atık beton tozunun bu tür yollarda kullanımı, çeşitli faydalar sağlayabilir. Atık beton tozunun SSB yollarında kullanılması, çevresel etkilerin azaltılması ve doğal kaynakların korunması açısından önemli bir fırsat sunmaktadır.

Bu malzeme, inşaat sektöründe geri dönüşüm uygulamalarının yaygınlaşmasına katkıda bulunarak, atık yönetimi sorunlarına çözüm arayışında önemli bir rol oynamaktadır. Ayrıca, bu uygulama ile birlikte, inşaat maliyetlerinin düşürülmesi ve malzeme verimliliğinin artırılması hedeflenmelidir. Atık beton tozunun silindirle sıkıştırılmış beton yollarında kullanımı hem çevresel hem de teknik açıdan önemli avantajlar sunmaktadır. Bu malzemenin potansiyeli, inşaat sektöründe sürdürülebilir uygulamaların teşvik edilmesine ve atıkların daha verimli bir şekilde değerlendirilmesine olanak tanımaktadır. Dolayısıyla, atık beton tozunun kullanımı, gelecekteki inşaat projeleri için önemli bir alternatif olarak değerlendirilmektedir.

Atık beton tozunun SSB yollarında kullanımı, çevresel sürdürülebilirlik ve ekonomik faydalar açısından dikkate değer avantajlar sunmaktadır. Bununla birlikte, bu malzemenin teknik özellikleri ve performansı titizlikle incelenmelidir. Uygun karışım tasarımı, kalite kontrol süreçleri ve performans testleri ile atık beton tozu, SSB yolların işlevselliğini olumsuz yönde etkilemeden entegre edilebilir. İnşaat sektöründe döngüsel ekonomi ve sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşma yolunda önemli bir adım teşkil edebilir. Atık beton tozunun kullanımı, hem doğal kaynakların korunmasına katkı sağlamakta hem de inşaat maliyetlerini düşürmektedir. Böylece, çevresel etkilerin azaltılması ve ekonomik verimliliğin artırılması sağlanmaktadır. Atık beton tozunun SSB yollarında kullanımı hem çevresel hem de ekonomik açıdan önemli fırsatlar sunmaktadır. Ancak, bu malzemenin etkin bir şekilde kullanılabilmesi için gerekli teknik değerlendirmelerin yapılması ve uygun standartların belirlenmesi gerekmektedir. Bu sayede, inşaat sektöründe sürdürülebilir uygulamaların yaygınlaşması mümkün olacaktır.

#### **2.4 Polipropilen Lifler**

Polipropilen lifler, betonun mekanik özelliklerini geliştirmek için tasarlanmış sentetik malzemelerdir (Bayraktar vd., 2023). Bu lifler, betonun çatlama riskini azaltma, dayanıklılığını artırma ve darbe dayanımını yükseltme gibi önemli faydalar sunar. Özellikle inşaat sektöründe, bu liflerin kullanımı, yapıların genel performansını olumlu yönde etkileyebilir. Silindirle sıkıştırılmış beton (SSB) uygulamalarında polipropilen liflerin entegrasyonu, yol yapımında önemli bir rol oynamaktadır. Bu

lifler, yol yüzeyinin dayanıklılığını artırarak, uzun ömürlü ve güvenli yolların inşasına katkıda bulunur. Ayrıca, bu tür liflerin kullanımı, bakım maliyetlerini azaltma potansiyeline de sahiptir (Gencel vd., 2012). Polipropilen liflerin beton karışımlarına eklenmesi hem mekanik özelliklerin iyileştirilmesine hem de yapıların genel performansının artırılmasına yardımcı olmaktadır. Bu durum, inşaat mühendisliği alanında yenilikçi çözümler arayan profesyoneller için önemli bir fırsat sunmaktadır (Keleş, 2019). Dolayısıyla, polipropilen liflerin kullanımı, modern inşaat uygulamalarında dikkate alınması gereken bir unsur haline gelmiştir.

SSB imalatında geleneksel beton üretiminde kullanılan yöntemlerin benzerliği, uygulamada yeni bilgi ve deneyim olmaksızın üretim yapılabilmesine olanak tanımaktadır (Kılıç ve Gök, 2021). Geleneksel betona göre daha az bağlayıcı kullanılması, SSB'lerin ekonomik açıdan avantajlı olmasını sağlamaktadır. Düşük çimento miktarı, hidrasyon ısısının azalmasına yol açarak, özellikle baraj gibi büyük beton yapılarında sıkça karşılaşılan çatlak sorununu önlemektedir. SSB karışımlarına eklenen uçucu kül, taze halde işlenebilirlik, sertleşmiş betonda ileri yaş dayanımı ve dayanıklılık özelliklerini olumlu yönde etkilemektedir. Bununla birlikte, SSB karışımlarında bağlayıcı olarak çimento ile birlikte yüksek fırın cürufu kullanılması, 3 günlük dayanımları üzerinde olumsuz bir etki yaratırken, yalnızca çimento içeren karışımlara göre ileri yaş dayanımlarının daha yüksek olduğu bildirilmiştir. Ayrıca, yüksek fırın cürufunun çimento ile ikame oranının artması, karışımların kuruma büzülme davranışını olumsuz yönde etkilediği vurgulanmıştır. Bu nedenle, yüksek fırın cürufu içeren SSB'lerde kuruma büzülme performansını iyileştirmek için önlemler alınması gerektiği ifade edilmiştir. SSB'lerde silis dumanı kullanımı, karışımların dayanım, geçirgenlik, rötre ve donma-çözülme karşısındaki performansını artırırken, taze halde işlenebilirlik üzerinde olumsuz bir etki yarattığı gözlemlenmiştir. SSB karışımlarındaki agrega miktarının geleneksel betonlara göre hacimsel olarak daha fazla olması, agrega özelliklerinin SSB'lerin taze ve sertleşmiş hal özelliklerini doğrudan etkilemediğini göstermektedir. SSB karışımlarının üretiminde doğal ve kırma kireçtaşının tercih edildiği belirtilmiştir. SSB karışımlarının işlenebilirliğini artırmak, katmanlar arasında meydana gelen soğuk derzleri azaltmak ve donma-çözülme gibi betona zarar verebilecek çevresel etkenleri minimize etmek amacıyla akışkanlaştırıcı, priz geciktirici ve hava sürükleyici kimyasal katkıların

kullanıldığı bildirilmiştir. Geleneksel beton karışımlarında olduğu gibi, SSB'lerin mekanik ve dayanıklılık performanslarını geliştirmek için polipropilen ve çelik liflerin kullanımı önerilmektedir. Bu liflerin, SSB'lerin basınç ve eğilme dayanımları üzerinde olumlu etkiler yarattığı belirlenmiştir (Aghabaglou vd., 2020).



### 3. DENEYSEL ÇALIŞMA PROGRAMI

#### 3.1 Malzemeler

Silindirle sıkıştırılmış beton yollarda verimliliği arttırmak için tasarlanan bu çalışmada, sürdürülebilir inşaat malzemeleri kullanılmıştır. Kullanılan bu atık malzeme betondur. Bina atık betonlarının karayollarında SSB yönteminde kullanılması çevre dostu inşaat teknolojisine yardımcı olması sağlanmak istenmiştir (Benli vd., 2025). Standart yol yapım çalışmasında kullanılan agrega ve ikame ürünlerinin atık beton ve atık beton tozu ile deneysel çalışmalar yapılmıştır.

Bu çalışma, çevresel açıdan sürdürülebilir silindirle sıkıştırılmış beton (SSB) karışımları geliştirmek için geleneksel ve geri dönüştürülmüş bileşenlerin bir kombinasyonunu kullanmıştır. Birincil bağlayıcı, kısmen atık beton tozu (ABT) ile ikame edilmiş CEM I 42,5R Portland çimentosu idi. Kaba ve ince agregalar hem doğal hem de geri dönüştürülmüş türleri içerirken, mekanik esnekliği ve dayanıklılığı artırmak için polipropilen lifler (PPF) kullanıldı. Portland çimentosu ve ABT'nin kimyasal bileşimleri Tablo 1'de sunulmaktadır. Çimento, OPC bazlı sistemlere özgü yüksek kalsiyum oksit (CAO) içeriği (%62,9) ve orta derecede silika (SiO<sub>2</sub>) içeriği (%19,7) sergiledi ve sağlam hidrasyon ve kalsiyum-silikat-hidrat (C-S-H) jel oluşumunu destekledi. Buna karşılık, ABT, belirgin şekilde daha düşük bir CAO içeriği (%49,6) ve yüksek ateşleme kaybı (LOI = %32,3) sergiledi, bu da daha önce hidratlanmış betondan kalan suhlanmamış parçacıkların ve karbonatlı fazların varlığını yansıtıyordu. ABT'nin X-ışını kırınım (XRD) modeli, geniş bir amorf kamburluğun yanı sıra kuvars ve kalsit gibi kristal fazların varlığını doğruladı, bu da ABT'nin esas olarak sınırlı puzolanik veya gizli hidrolik reaktiviteye sahip fiziksel bir dolgu maddesi olarak işlev gördüğünü düşündürdü. Bu nedenle, bağlayıcı matrisindeki etkinliği, dozaj ve aktif çimento fazları ile etkileşim tarafından yönetilir.

##### 3.1.1 Çimento

Yapılan çalışmada kullanılan çimento için, TS EN 197-1 standartlarına uygun olarak portland çimentosu kullanılmıştır. İçerisinde bulunan katkı maddesi (%21-35)

puzolan, priz düzenleyici olarak alçı taşı, kalker ile birlikte öğütülmüştür. Yapılan bu çimentoda üretim sırasında puzolan (tras) katkısı kullanılmıştır (Yılmazoğlu vd., 2025). Bunun kullanım amacı ise beton dökümünde veya hazırlanan harçta işlenebilirliğinin artırılması, hidrasyon ısının düşük olmasını sağlamak, sülfat etkisi altında daha yüksek bir dayanım sağlanmasıdır. Kullanılan çimentonun kimyasal özellikleri Tablo 3.1’de verilmiştir.

Tablo 3.1 Çimentonun kimyasal özellikleri

Kimyasal Özellikler	Ort.Sonuçları	TS EN 197-1	Analiz Metodu
Chemical Characteristics	Av.Results	Req. in TS EN 197-1	Testing Method
Cl- (%)	0,038	Max 0,1	EN 196-2
SO <sub>3</sub> (%)	2,80	Max 3,5	EN 196-2

Değerleri verilen çimentonun kimyasal özelliklerin yanı sıra çimento içerisinde mekanik olarak ve fiziksel olarak yapılan deneysel sonuçları da vardır. Çalışmada kullanılan çimento için mekanik ve fiziksel özelliklerin yer aldığı değerler Tablo 3.2 de verilmiştir.

Tablo 3.2 Çimentonun mekanik ve fiziksel özellikleri

	KAO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>	MgO	LOI
Cement	62,9	19,7	4,3	3,7	0,3	0,6	3,1	1,7	0,9
ABT	49,6	10,2	2,8	1,2	0,4	1,1	1,4	1,1	32,3

Yukarıda belirtilen çimentonun, kimyasal, mekanik ve fiziksel özellikleri alınan ortalama değer olarak belirtilmiştir. Kullanılan çimentonun görseli Şekil 3.1 de verilmiştir



Şekil 3.1 Kullanılan çimento görünüşü

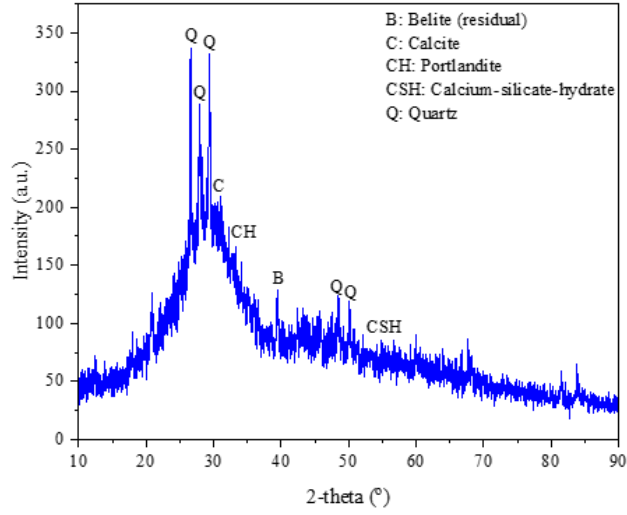
### 3.1.2 Beton Tozu

Deneysel olarak yapılan bu çalışmada ikame olarak beton tozu kullanılmıştır. Kullanılan bu beton tozu elde edilen atık betonun konkasör ile tane boyutuna getirilip, bilyeli öğütücüde çimento mikron seviyesine kadar ince tane boyutu kazandırılmıştır. Öğütülmüş olan beton tozlarının görseli Şekil 3.2’de verilmiştir.



Şekil 3.2 Atık beton tozu görünüşü

ABT’nin X-ışını kırınım (XRD) modeli Şekil 3.3’te, geniş bir amorf kamburluğun varlığının yanı sıra kuvars ve kalsit gibi kristal fazların da bulunduğunu doğruladı. Bu durum, ABT’nin esasen sınırlı puzolanik veya gizli hidrolik reaktiviteye sahip bir fiziksel dolgu maddesi olarak işlev gördüğünü düşündürmektedir. Bu sebeple, bağlayıcı matrisindeki etkinliği, dozaj ve aktif çimento fazları ile etkileşim yoluyla kontrol edilmektedir. Bu matris etkinliği Şekil 3.3’de XRD modeli olarak verilmiştir.



Şekil 3.3 Atık beton (ABT) XRD modeli

### 3.1.3 Polipropilen Lif

Çalışmada kullanılan lif özellikleri bakımından polipropilen bazlı olup, kullanım amacı genellikle inşaat sektöründe betonun veya harcın dayanımını arttırmak için tercih edilmektedir. Özellikle bu liflerin bu çalışmada kullanılması, büzülme çatlaklarının, aşınma, kırılma ve kopma gibi fiziksel deformasyonlara uğramamasını sağlamaktır. Betonda yorulma direncine de büyük bir gelişim sağladığı bilinmektedir. SSB de dayanım performansının olumlu etkilemesi beklenmektedir. Bu çalışma özelinde kullanılan polipropilen lif Şekil 3.4’de verilmiştir.



Şekil 3.4 Polipropilen lif

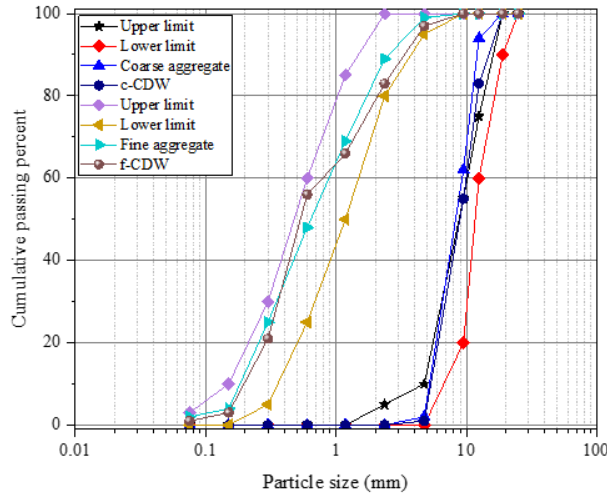
### 3.1.4 Agregalar

Yapılan deneysel çalışmada kullanılan agregalar SSB de kullanılan standart agrega ile atık beton agregaları arasında değişmektedir. Literatür çalışmalarında genellikle kullanılan kalker agregasının vermiş olduğu dayanım, atık beton agregaları kullanılarak ölçülmek istenmiştir.

Kalker agregaların kullanımında, özelliklerinin tamamının yansıtması beklenmektedir. İnşaat sektöründe betonun yeniden işlenebilirliği, sürdürülebilirliğin devamı için birçok çalışmada kullanılmıştır (Su vd., 2024). Agregalar çaplarına göre ayrıldığında iki ana başlıkta incelenebilir. Bu çalışmada kullanılan iri ve ince agregalar kalker ve atık beton olarak tercih edilmiştir. Ayrıca polipropilen liflerde bu sınıfa sokulabilir.

- İri agregalar
- İnce agregalar

Yol imalatında kullanılan agregaların tane boyutları yapılacak silindirle sıkıştırılmış beton yollar açısından önemlidir. SSB de agrega gradasyonu Şekil 3.5’de verilmiştir.



Şekil 3.5 SSB yol üretiminde agrega gradasyonu

### 3.1.4.1 İri agregalar

Agregaların tane boyutları olarak daha yüksek olduğu, doğal ve yapay taşlardan oluşan inşaat sektöründe, beton üretim aşamalarında kullanılan önemli bir malzemedir. Yoğunlukları, 2000 kg/m<sup>3</sup> den az olmamakla beraber 3000 kg/m<sup>3</sup> arasında olduğu ve tane boyutlarının 4mm den büyük olan betonun ana malzemelerinden birisidir. Hazırlanan deneysel çalışmalarda %60 ile %75 oranında hacimsel olarak betonda yer kaplamaktadır. Betonun genel kalitesini birebir etkilediğinden, iri agregaların seçimi oldukça önem arz etmektedir.

#### 3.1.4.1.1 Kalker agregası (5-15mm)

Yapılan bu çalışmada standartlara uygun olarak belirtilen tane boyutunda ve yoğunluğuna sahip kalker agregası kullanılmıştır. Kullanılan bu kalker agregası Şekil 3.6'da görseli verilmiştir.



Şekil 3.6 Kalker agregası (5-15 mm )

#### 3.1.4.1.2 Atık beton agregası (5-15mm)

Atık beton alınan yerin özelliklerine bağlı olmakla beraber içerisinde genellikle silis alüminyum ve kalsiyum oksit gibi kimyasallar içermektedir. Maliyet açısından da tasarruf sağlaması için kullanılan 5-15 mm arasındaki atık beton Şekil 3.7'de gösterilmiştir.



Şekil 3.7 Atık beton (5-15 mm)

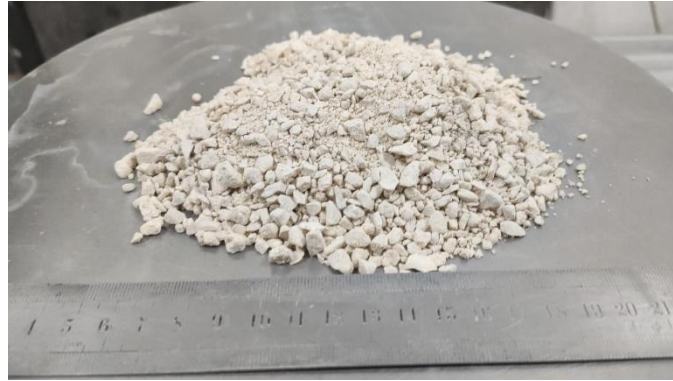
### 3.1.4.2 İnce agrega

İnşaat sektöründe, karayolları alt ve üst yapısında, gerek bitümlü sıcak asfaltlarda, gerekse SSB yollarda performans açısından verimlilik artırıcı özelliği önem taşımaktadır. İnce agregaların işlenebilirliği kullanım alanlarına göre çeşitlilikte göstermektedir. SSB de ince agregaların kohezyon artırıcı yani çekim kuvvetlerinin devamlılığını sağlamaktadır. Genellikle SSB de toplam agregaların içerisindeki ince agrega oranı %50 olarak tutulur. İnce agrega içerisindeki gradasyon, SSB de bulunan miktarların sıkıştırılabilirliğini olumlu yönde etkiler. Tane boyutları açısından 0-4 mm aralığında, elek analizinde 200 no'lu elekten geçip altında kalan malzemeler için kullanılmaktadır. Elekten geçtikten sonra incelenen malzemelerde plastisite indisinin 5'ten düşük olmasına dikkat edilmelidir. Özellikle 5 üstü indekse sahip malzemelerin SSB de kullanılması ilerde büyük sorunlara neden olmaktadır. Su emme hassasiyetine sahip olan ince agregalarda indeksin yeterli olmaması durumunda SSB 'nin işlenebilirliğini azaltıp, priz almış silindire sıkıştırılmış beton yollarda donma çözülme direncini düşürmektedir.

#### 3.1.4.2.1 Kalker agregası (0-5 mm)

Kalker agregası için özgül ağırlığın  $2,67 \text{ g/cm}^3$  ortalama değer göstergesinde olmasıdır. Özgül ağırlık, nakliye ve depolama maliyetleri gibi birçok faktörde rol oynar. Yapılan testler kalker agregasının su emme oranının %1,24 olduğunu göstermiştir. Bu oran, agregaların yüzeyinin ne kadar su emebileceğini belirler. Düşük

su emme oranı, karışımların dayanıklılığı açısından olumlu bir özelliktir. Yüksek su emme oranına sahip agregalar, karışımın daha fazla su tutmasına neden olarak daha fazla donma-çözülme hasarına yol açabilir. Beton ve harç gibi sürekli sert karışımların (SSB) üretiminde genellikle ince agrega olarak kalker agregası kullanılır. İnce agregalar kum boyutunda malzemelerdir ve karışımın işlenebilirliğini artırmaya yardımcı olur, yani şekillendirme ve yerleştirme kolaylığı sağlar. SSB karışımlarında ince agrega olarak kullanılan malzemeler, genellikle toplam agrega hacminin %30-50'sini oluşturur. Kalker agregası 0-5 mm boyut aralığında, silindirle sıkıştırılmış beton uygulamalarında hayati bir öneme sahiptir ve dayanıklılık ile işlenebilirliği artıran temel bir bileşen olarak öne çıkmaktadır. Uygun gradasyon ve doğru kullanım oranları ile bu agrega, SSB'nin performansını olumlu bir şekilde etkilemektedir. Kalker agregası ile üretilen SSB'lerin dayanım değerleri, gerçekleştirilen deneyler sonucunda olumlu bulgular ortaya koymaktadır. İnce agreganın kullanımı, betonun sıkıştırılabilirliğini artırarak daha homojen ve dayanıklı bir yapı elde edilmesine katkı sağlamaktadır. Ayrıca, agreganın gradasyonunun (dane büyüklüğü dağılımı) uygun bir şekilde ayarlandığında, SSB'nin mekanik özelliklerinde de belirgin bir iyileşme gözlemlenmektedir. İnce kalker agregası Şekil 3.8'de verilmiştir.



Şekil 3.8 İnce kalker agregası (0-5 mm)

#### **3.1.4.2.2 Atık beton agregası (0-5mm)**

Atık beton agregasının özgül ağırlığı yaklaşık  $2,53 \text{ g/cm}^3$  olarak belirlenmiştir. Bu değer, doğal agregaların özgül ağırlıklarıyla benzerlik göstermekte olup, atık beton agregasının yapı malzemesi olarak kullanımının uygulanabilirliğini desteklemektedir. Yapılan deneyler, atık beton agregası ile üretilen (SSB) karışımlarının ve diğer beton ürünlerinin dayanım değerlerinin beklenenden daha yüksek olduğunu ve olumlu

sonuçlar ortaya koyduğunu göstermektedir. Özellikle basıncı dayanımı ve çekme dayanımı gibi mekanik özelliklerdeki iyileşmeler, atık beton agregasının etkin bir şekilde kullanılabilceğini ortaya koymaktadır. Bu iyileşmenin derecesi, atık betonun kırılma boyut dağılımı, kullanılan bağlayıcı türü ve karışım oranları gibi faktörlere bağlı olarak değişiklik gösterebilir. İnce atık beton agregasının kullanımı, beton karışımının işlenebilirliğini ve sıkıştırılabilirliğini önemli ölçüde artırmaktadır. Bu durum, betonun kalıba daha kolay yerleştirilmesini ve homojen bir yapı elde edilmesini sağlamaktadır. Daha homojen bir yapı, çatlak oluşumunu azaltarak ve malzeme üzerindeki yük dağılımını iyileştirerek nihai dayanımı artırmaktadır. İnce agregaların, betonun su tutma kapasitesini ve su-imento oranını da etkileyebileceği göz önünde bulundurulup, bu nedenle karışım tasarımı aşamasında dikkate alınmalıdır.

SSB uygulamaları açısından değerlendirildiğinde, atık beton agregasının kullanımı yalnızca dayanımı artırmakla kalmayıp, aynı zamanda kaplamaların yüzey özelliklerini de iyileştirmektedir. Bu iyileştirmeler, daha pürüzsüz bir yüzey, artan aşınma direnci ve daha yüksek kayma direnci gibi avantajlar sunmaktadır. Yapılan çalışmada kullanılan 0-5 mm lik atık beton görseli Şekil 3.9’da verilmiştir.



Şekil 3.9 Atık beton agregası (0-5 mm)

## 3.2 Numune Hazırlama ve Oransal Dağılım

### 3.2.1 Taguchi Tasarımı

Bu alışmada, Taguchi yöntemi, geri dönüştürülmüş kaba agrega (GKA), geri dönüştürülmüş ince agrega (GİA), atık beton tozu (ABT) ve polipropilen lifleri (PPF) içeren silindire sıkıştırılmış beton (SSB) karışımının bileşimini sistematik olarak

optimize etmek için sağlam bir istatistiksel araç olarak kullanılmıştır. Bu yaklaşım, bilgi çıktısını en üst düzeye çıkarırken deneysel karmaşıklığı en aza indirir ve daha az kaynak harcaması ile optimum karışım kombinasyonlarının belirlenmesini sağlar (Sheikh vd., 2022). Dr. Genichi Taguchi tarafından geliştirilen Taguchi yöntemi, temel olarak sağlam tasarım kavramına dayanmaktadır. İstenen çıktıyı veya “sinyali” en üst düzeye çıkarırken, kontrol edilemeyen varyasyonun (yani “gürültü”) etkisini en aza indirerek ürün performansını iyileştirmeyi amaçlar. Bu yöntemin merkezinde, kapsamlı tam faktöriyel deney gerektirmeden birden fazla faktörün çeşitli seviyelerde aynı anda değerlendirilmesine izin veren ortogonal dizilerin (OD’lar) kullanılması yer almaktadır. Bu çalışmada, her biri dört farklı seviyede dört bağımsız faktörün (GKA içeriği, GİA içeriği, ABT değiştirme oranı ve PPF dozu) analizini sağlayan bir L16 (4<sup>4</sup>) ortogonal dizi seçilmiştir (Tablo 3.3). Optimizasyon için hedeflenen birincil performans metrikleri, basınç dayanımı, gözeneklilik ve dayanıklılıkla ilgili indeksleri (örneğin, sülfat direnci, klorür penetrasyonu, donma-çözülme dayanıklılığı) içeriyordu. Tasarım hedefine bağlı olarak (yani, belirli bir yanıtın maksimize edilmesi veya en aza indirilmesi), üç standart sinyal-gürültü (S/N) oranı formülasyonu dikkate alındı:

- Daha küçük daha iyidir

Amaç, yanıt değişkenini en aza indirmek olduğunda kullanılır (örneğin, gözeneklilik, su emme):

$$S/N = -10 \text{ günlük}_{10} [ (1/n) \Sigma(y_i^2) ] \quad (3.1)$$

- Daha büyük daha iyidir

Amaç, yanıt değişkenini en üst düzeye çıkarmak olduğunda kullanılır (örneğin, basınç dayanımı):

$$S/N = -10 \text{ günlük}_{10} [ (1/n) \Sigma(1/y_i^2) ] \quad (3.2)$$

- Nominal en iyisidir

Amaç, belirli bir hedef değere (ör. yoğunluk) ulaşmak olduğunda kullanılır:

$$S/N = 10 \text{ günlük}_{10} [ (\bar{y}^2 / s^2) ] \quad (3.3)$$

Tanımlar:

- $Y_i$ : Bireysel ölçülen değerler
- $\bar{y}$  : Ölçülen değerlerin ortalaması
- S: Değerlerin standart sapması
- n: Ölçüm sayısı.

Taguchi L16 dizisinden oluşturulan 16 karışım tasarımının her biri Tablo 3.4'de detaylandırılmıştır. Bu formülasyonlar, GKA (%0-100); GİA (%0-100); ABT (%0-40) ve PPF (hacimce %0-0,75) içeriklerini değiştirirken sıfır çökme işlenebilirliğini korumak için dikkatli bir şekilde oranlandı. Taguchi çerçevesini uygulamanın temel amacı, çimento ve işlenmemiş agregalarla ilişkili çevresel yükü azaltırken yüksek mukavemet ve dayanıklılık elde etmek için en etkili parametreleri ve bunların optimal kombinasyonlarını verimli bir şekilde belirlemektir. Tüm çalışmaların yürütülmesini takiben, faktör önemini sıralamak ve optimal seviyeleri belirlemek için her bir yanıt parametresi için S/N oranı hesaplandı. Daha sonra, Taguchi için optimize edilmiş konfigürasyonların tahmini doğruluğunu doğrulamak için doğrulama deneyleri yapıldı. Bu metodolojik titizlik, yalnızca kaynak açısından verimli testler sağlamakla kalmadı, aynı zamanda sürdürülebilir SSB üretiminde karışım tasarımı optimizasyonu için istatistiksel olarak anlamlı içgörüler de sağladı.

Silindirle sıkıştırılmış beton (SSB) karışımları, tüm bileşenlerin, özellikle düşük işlenebilirlik koşulları altında ayrışmaya veya topaklanmaya eğilimli lifli ve geri dönüştürülmüş bileşenlerin homojen dağılımını sağlamak için tasarlanmış sıralı bir kuru ve ıslak karıştırma yaklaşımı kullanılarak hazırlandı.

Başlangıçta, sıradan Portland çimentosu (CEM I 42,5R) ve atık beton tozu (ABT), homojen dağılım elde etmek ve herhangi bir partikül kümelenmesini ortadan kaldırmak için mekanik bir pan karıştırıcıda 2 dakika boyunca kuru harmanlandı. Bu ilk homojenizasyon adımı, özellikle değişken incelik ve mineralojik bileşim sergileyen ABT dahil edildiğinde, tutarlı bağlayıcı reaktivitesi sağlamak için kritik öneme sahiptir.

Bağlayıcı ön karıştırma aşamasını takiben, önceden belirlenmiş miktarda karıştırma suyu kademeli olarak ilave edildi ve yapışkan bir macun oluşturmak için 2 dakika daha karıştırıldı. Bu adım, ABT'nin dolgu etkisini aktive ederken çimento parçacıklarının ıslanmasını ve kısmi hidrasyonunu başlatmak için tasarlanmıştır. SSB karışımlarında kullanılan nispeten düşük su-bağlayıcı (s/b) oranları (0,34 ila 0,69 arasında değişen), işlenebilirlik kaybını ve eksik macun oluşumunu önlemek için su girişinin hassas kontrolünü gerektirdi.

Macun matrisi oluşturulduktan sonra, karışım tasarımına bağlı olarak hem doğal kum (kireçtaşı bazlı) hem de ince geri dönüştürülmüş inşaat ve yıkım atığı (i-İYA) içeren ince agregalar bağlayıcı fazına eklendi. Karışım, ince agrega parçacıklarının optimum şekilde paketlenmesini ve yüzey kaplamasını kolaylaştıran homojen bir harç fazı geliştirmek için 2 dakika daha karıştırıldı. Bu adım, ilk su alımı için zaman tanıdığı ve iç nem dağılımını düzenlemeye yardımcı olduğu için yüksek absorpsiyonlu geri dönüştürülmüş ince tanecikler kullanıldığında özellikle önemlidir.

Daha sonra, hem doğal kırma kireçtaşı hem de kaba İYA (k-İYA) dahil olmak üzere iri agregalar harca verildi ve 2 dakika boyunca karıştırıldı. Bu aşama, iri agregaların macun matrisi içine iyice gömülmesini sağlayarak tutarlı sıkıştırma davranışını teşvik etti ve sertleştirilmiş yapıda ayrışma veya homojenlik oluşmaması riskini en aza indirdi.

Son aşamada, polipropilen (PP) elyaflar, elyaf topaklanmasını önlemek ve eşit dağılımı teşvik etmek için orta hızda çalışırken mikserde yavaşça sokuldu. Ön denemelere dayanarak, sert, sıfır çökmeli karışım boyunca homojen bir dağılım elde etmek için lif ilavesinden sonra minimum 5 dakikalık bir karıştırma süresinin gerekli

olduğu belirlendi. Bu uzun karıştırma periyodu, liflerin çimentolu matris içinde mekanik olarak dolaşmasını kolaylaştırdı ve her ikisi de etkili çatlak köprüleme ve mekanik takviye için kritik olan hizalamalarını ve ara yüzey bağlarını geliştirdi.

Tüm karıştırma dizisi boyunca, karışım homojenliği sağlamak ve özellikle elyaf takviyeli veya yüksek geri dönüştürülmüş içerikli formülasyonlarda kuru bölgeleri veya ayrışmayı önlemek için manuel olarak izlendi. Bu çok adımlı karıştırma protokolü, geri dönüştürülmüş agregaların benzersiz fiziksel özelliklerini, ABT'nin azaltılmış reaktivitesini ve PP liflerinin dağılma hassasiyetini barındırmak için geliştirilmiş olup, iyi sıkıştırılmış ve mekanik olarak tutarlı SSB numunelerinin üretimini sağlar. Çalışmada yer alan karışımların yüzdelik oranları ve karışımların tam olarak uygulanan malzeme miktarları Tablo 3.3'de verilmiştir.

Tablo 3.3 SSB karışım oranları ve malzeme miktarları.

Karışım	i-İYA (%)	k-İYA (%)	ABT (%)	PPF (%)	KA (5-15)	İA (0-5)	k-İYA (5-15)	i-İYA (0-5)	PC	ABT	Su	PPF
0C-0P-0F	0	0	0	0	822	1135	0	0	350	0	120	0
25C-10P-25F	0	25	10	0,25	595	1096	198	0	315	35	139	2,275
50C-20P-50F	0	50	20	0,5	374	1060	374	0	280	70	162	4,55
100C-40P-75F	0	100	40	0,75	0	1020	743	0	210	140	145	6,825
0C-10P-50F	25	0	10	0,5	765	791	0	291	315	35	141	4,55
25C-0P-75F	25	25	0	0,75	571	784	202	277	350	0	149	6,825
50C-40P-0F	25	50	40	0	389	768	394	288	210	140	140	0
100C-20P-25F	25	100	20	0,25	0	771	748	275	280	70	178	2,275
0C-20P-75F	50	0	20	0,75	767	567	0	578	280	70	145	6,825
25C-40P-50F	50	25	40	0,5	561	512	199	518	210	140	158	4,55
50C-0P-25F	50	50	0	0,25	363	501	363	508	350	0	238	2,275
100C-10P-0F	50	100	10	0	0	493	718	501	315	35	241	0
0C-40P-25F	100	0	40	0,25	734	0	0	1012	210	149	201	2,275
25C-20P-0F	100	25	20	0	532	0	178	995	280	70	232	0
50C-10P-75F	100	50	10	0,75	351	0	356	993	315	35	235	6,825
100C-0P-50F	100	100	0	0,5	0	0	709	989	350	0	237	4,55

### 3.3 Deneysel Yöntemler

Deneysel olarak yapılan çalışmanın silindirele sıkıştırılmış olmasını laboratuvar ortamında proktor cihazı ile sağlanmıştır. Proktor el sıkıştırma cihazıyla, hazırlanan

numunelerin birbirleri ile daha fazla kompaksiyonel olarak birleşimi sağlanması amaçlanmıştır. Hazırlanan bu numunelere çeşitli deneyler uygulanmıştır. Geri dönüştürülmüş ince ve iri agregalar (i-İYA ve k-İYA), atık beton tozu (ABT) ve polipropilen lifleri (PPF) içeren silindirle sıkıştırılmış beton (SSB) karışımlarının performansını değerlendirmek için kapsamlı bir mekanik, fiziksel ve dayanıklılık testleri paketi gerçekleştirildi. Tüm testler, ilgili ASTM ve TS EN standartlarına uygun olarak gerçekleştirilmiştir ve ayrıntılar Tablo 3.4’te özetlenmiştir.

Tablo 3.4 Yapılması planlanan deneyler

Deney	Standard	Numune boyutu (mm)	Deney süresi
Su içi	ASTM C642	100×100×100	90 Gün
Su emme		100×100×100	90 Gün
Doygun kuru ağırlık		100×100×100	90 Gün
Basınç dayanımları	TS EN 12390-3	100×100×100	7; 28 ve 90 Gün
Yarma-Çekme	TS EN 12390-6	100×200	7; 28 ve 90 Gün
MgSO <sub>4</sub> etkisi	ASTM C1012	100×100×100	90. Gün
Donma-Çözülme	ASTM C666	100×100×100	120 Döngü
NaCl		100×100×100	90. Gün
Aşınma direnci	ASTM C944	100×100×100	90 Gün
Sorptivite (Kılcallık)	TS EN 1015-18	100×100×100	90 Gün

### 3.3.1 İşlenebilirlik (Vebe Süresi)

SSB’nin sıfır çökme doğası nedeniyle, geleneksel çökme testleri uygulanamamıştır. Bunun yerine, taze SSB karışımlarının işlenebilirliğini ve sıkıştırılabilirliğini değerlendirmek için Vebe süresi ölçüldü. Vebe testi, sert karışımların tutarlılığını ve kohezyonunu yansıtarak bir numuneyi titreşim altında yeniden kalıplamak için gereken süreyi ölçer. Uzatılmış vebe süreleri, daha düşük işlenebilirliğin göstergesiydi ve sıkıştırma sırasında dikkatli bir şekilde değerlendirilmesi gerekiyordu.

### 3.3.2 Mekanik Özellikler

Basınç dayanımı deneyleri, 100×100×100 mm küp numuneler üzerinde TS EN 12390-3’te belirtilen prosedürler izlenerek 7; 28 ve 90 günlüklerde gerçekleştirilmiştir.

Yarılma çekme dayanımı, silindirik numunelerde (100×200 mm) TS EN 12390-6'ya uygun olarak karşılık gelen yaşlarda ölçülmüştür. Bu testler, tek eksenli stres altında SSB karışımlarının yük taşıma kapasitesini ve çatlama direncini değerlendirmek için tasarlanmıştır.

### **3.3.3 Fiziksel Özellikler**

90 günde, ASTM C642'ye göre küp numunelerde (100×100×100 mm) fırında kuru yoğunluk, görünür gözeneklilik ve su emme gibi fiziksel özellikler değerlendirildi. Bu ölçümler, karışımların gözenek yapısı, kompaktlığı ve genel matris bütünlüğü hakkında bilgi sağladı.

### **3.3.4 Sorptivite**

Kapiler su absorpsiyonu TS EN 1015-18'de belirtilen sorptivite yöntemi kullanılarak 90 günde belirlenmiştir. Bu test, karışımın kılcal damar girişine ve nem taşınmasına karşı direncinin nicel bir göstergesini sağlayarak, zamanın karekökünün bir fonksiyonu olarak birim alan başına emilen su kütlesinin ölçülmesini içeriyordu.

### **3.3.5 Aşınma Direnci**

SSB karışımlarının yüzey aşınma direnci ASTM C944/C944M'ye göre değerlendirilmiştir. 90 günde, mekanik yüzey erozyonunu simüle etmek için 200 rpm'de 97 N'luk dikey basınç altında dönen bir kesici kullanılarak aşınma testleri gerçekleştirildi ve buna karşılık gelen ağırlık kaybı bir dayanıklılık indeksi olarak kaydedildi.

### **3.3.6 Sülfat Saldırı Direnci**

Sülfat maruziyeti altında kimyasal dayanıklılık ASTM C1012 kullanılarak değerlendirildi. SSB numuneleri (100×100×100 mm), standart kürlenmeden sonra 120 gün boyunca %5 MgSO<sub>4</sub> çözeltilerine daldırıldı. Geniş sülfat reaksiyonları ile ilişkili bozulma etkilerini değerlendirmek için basınç dayanımı kaybı ve ağırlık değişiklikleri izlendi.

### **3.3.7 Donma-Çözülme Dayanıklılığı**

Donma-çözülme döngülerine karşı direnç, ASTM C666'ya göre araştırılmıştır. Numuneler 75 ve 150 hızlı dondurma ve çözülme döngüsüne tabi tutuldu ve termal döngü altında yapısal bozulmayı değerlendirmek için artık basınç dayanımı ve ağırlık kaybı kaydedildi.

### **3.3.8 Klorür Direnci**

Klorür kaynaklı bozulma, 100×100×100 mm küp numunelerin %5'lik bir NaCl çözeltisi içinde 60 ıslatma-kurutma döngüsüne tabi tutulmasıyla değerlendirildi. Her döngü, tuz çözeltisine daldırma ve ardından ortam sıcaklığında havayla kurutma, kıyı ve buz çözme maruz kalma koşullarını simüle etmekten oluşuyordu. Maruz kalma rejiminin tamamlanmasından sonra, SSB karışımlarının klorür girişine ve tuz kaynaklı hasara karşı direncini ölçmek için basınç dayanımı kaybı ve yüzey bozulması değerlendirildi.

### **3.3.9 Mikroyapısal Analiz**

Seçilen örnekler vakumla kurutuldu ve taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntülemeye önce ince bir altın tabakası ile kaplandı. SEM analizi, özellikle sülfat maruziyeti ve iç bozulma olaylarına atıfta bulunarak, lif-matris etkileşimini, mikro çatlak dağılımını, jel oluşumunu ve gözenekliliği gözlemlemek için yapılmıştır.

## 4. BULGULAR VE TARTIŞMA

### 4.1 Basınç Mukavemeti

Şekil 4.1, çeşitli oranlarda ince inşaat ve yıkım atığı (i-İYA), kaba İYA (k-İYA), atık beton tozu (ABT) ve polipropilen elyaf (PPF) içeren silindirle sıkıştırılmış beton (SSB) karışımlarının 7; 28 ve 90. günlerdeki basınç dayanımı gelişimini göstermektedir. Tüm karışımlar, SSB teknolojisinin özelliği olan sıfır çökme kıvamında tasarlanmıştır. Ancak, agrega emme kapasiteleri ve yüzey dokularındaki farklılıklar nedeniyle, özellikle İYA içeren karışımlarda etkili su/bağlayıcı (s/b) oranları önemli ölçüde değişmiştir. Bu değişiklikler, hidrasyon verimliliği, sıkıştırma kalitesi, gözenek yapısı gelişimi ve nihayetinde karışımların mekanik performansı üzerinde belirgin bir etkiye sahip olmuştur.

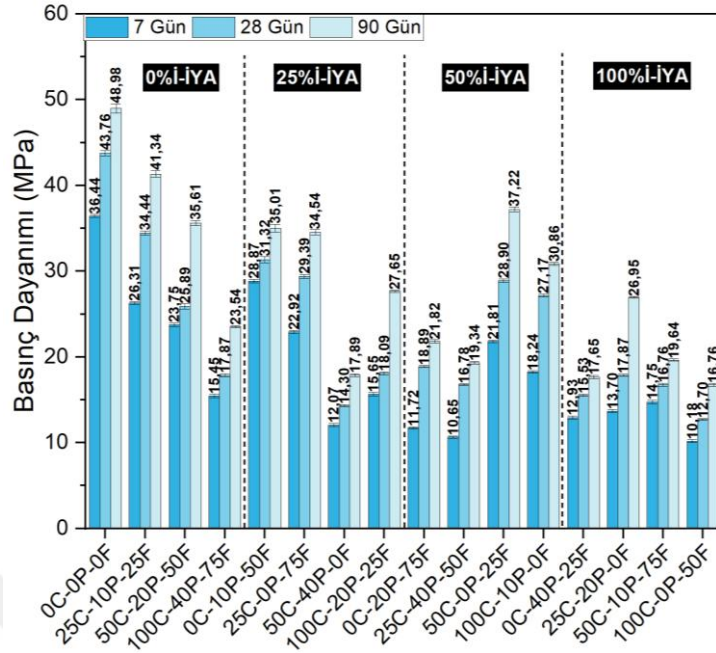
Doğal ince agregaların kullanıldığı %0 i-İYA'da, kaba agrega (KA) %0; %25; %50 ve %100 k-İYA ile değiştirildiğinde s/b oranları 0,34 ile 0,46 arasında değişmiştir. Karşılık gelen 90 günlük basınç dayanımları, sırasıyla %0; %10; %20 ve %40 ABT ve %0; %0,25; %0,50 ve %0,75 olup, PPF içeren karışımlar için 49,0; 41,3; 35,6 ve 23,5 MPa'dır. Referans karışım (%0 İYA, ABT, PPF); 0,34'lük düşük s/b oranında yoğun paketlenme ve verimli hidrasyonun avantajıyla en yüksek mukavemeti (49,0 MPa) elde etmiştir. k-İYA, ABT ve PPF içeriği arttıkça, s/b oranı yükseldi ve mukavemet önemli ölçüde azaldı; en belirgin azalma, %100 k-İYA; %40 ABT ve %0,75 PPF içeren karışımda görüldü ve bu karışım sadece 23,5 MPa mukavemet elde ederek %51,9'lük bir azalma gösterdi. Bu düşüş, geri dönüştürülmüş agregalardan kaynaklanan gözenekliliğin artması, yüksek ABT nedeniyle C-S-H oluşumunun azalması ve sıfır çökme koşullarında sıkıştırmayı bozan lif korelasyonlarından kaynaklanmıştır. Buna karşılık, %25 k-İYA; %10 ABT ve %0,25 PPF içeren karışım 41,3 MPa'yı korumuş, bu da su talebi ve bağlayıcı reaktivitesi uygun şekilde yönetildiğinde orta düzeyde ikamelerin tolere edilebileceğini göstermiştir. Genel olarak, bulgular ince İYA içermeyen kuru SSB sistemlerinde mukavemeti korumak için ABT ve PPF dozajlarının sınırlandırılmasının ve k-İYA'nın dikkatli kullanılması gerektiğinin önemini vurgulamaktadır.

Sabit bir %25 i-İYA ikame seviyesinde, 90 günlük basınç dayanımı, k-İYA içeriği, ABT dozu ve PPF ilavesinin birleşik etkilerinin etkisiyle 17,89 ile 35,01 MPa arasında değişmiştir. En yüksek mukavemet (35,01 MPa); %10 ABT ve %0,5 PPF ( $s/b = 0,40$ ) içeren karışımda elde edildi, bu da ılımlı fiber takviyesi ve sınırlı çimento ikamesinin, geri dönüştürülmüş ince agregaların varlığında bile mekanik bütünlüğü koruyabileceğini göstermektedir. Benzer şekilde, %25 k-İYA ve %0,75 PPF ( $s/b = 0,42$ ) içeren karışım 34,54 MPa değerine ulaşmış, bu da ABT seyreltme olmadan uygun fiber dağılımının mukavemeti artırmada etkili olduğunu göstermektedir. Buna karşılık, en düşük mukavemet (17,89 MPa) %50 k-İYA; %40 ABT ve lif içermeyen karışımda ( $s/b = 0,51$ ) gözlemlenmiştir; burada aşırı bağlayıcı seyreltme ve çatlama sonrası takviye eksikliği, zayıf, gözenekli ve kırılğan bir matris oluşmasına neden olmuştur. %100 k-İYA; %25 ABT ve %0,25 PPF içeren karışım; 27,65 MPa ile kısmi bir iyileşme göstermiştir. Bu, sınırlı lif ve orta düzeyde bağlayıcı ikamesinin hafifletici rolünü yansıtmaktadır. Genel olarak, bu sonuçlar sıfır çökme SSB sistemlerinde mukavemetin iç su içeriğine ve karışım sinerjisine oldukça duyarlı olduğunu vurgulamaktadır. Düşük ABT seviyelerinin ( $\leq 20$ ); yeterli lif dozajının (%0,25–0,75) ve kontrollü agrega ikamesinin korunması, İYA'nın neden olduğu artan gözeneklilik ve azalan hidrasyon verimliliğinin olumsuz etkilerini dengelemek için gereklidir.

%50 i-İYA'da, 90 günlük basınç dayanımı, k-İYA, ABT ve PPF içeriklerinin birleşik etkilerine bağlı olarak 19,34 ile 37,22 MPa arasında değişmiştir ve buna karşılık gelen su/çimento oranları 0,41 ile 0,69 arasındadır. En yüksek mukavemet (37,22 MPa), nispeten yüksek bir  $s/b$  oranı olan 0,68'e rağmen; %50 k-İYA; %0 ABT ve %0,25 PPF içeren karışımda elde edildi. Bu, sıfır çökme SSB sistemlerinde, çimento seyreltilmediğinde ve fiber içeriği işlenebilirliği bozmadan çatlak direncini artırmak için optimize edildiğinde kabul edilebilir mukavemet elde edilebileceğini vurgulamaktadır. Buna karşılık, daha yüksek ABT (%20-40) ve yüksek PPF (%0,50-0,75) içeren karışımlar, esas olarak zayıf sıkıştırma, fiber kümelenmesi ve bağlayıcı reaktivitesinin azalması nedeniyle, sırasıyla 21,82 MPa ve 19,34 MPa gibi önemli ölçüde düşük mukavemet değerleri göstermiştir. İlginç bir şekilde; %100 k-İYA; %10 ABT ve PPF içermeyen karışım 30,86 MPa'lık orta düzeyde bir mukavemet sergilemiştir. Bu da, bazı durumlarda, özellikle düşük işlenebilirlik koşullarında, lifin yokluğunun aşırı dozajlamaya tercih edilebileceğini göstermektedir. Genel olarak, bu

sonuçlar %50 i-İYA'da performansın agrega kalitesi, imento ikame seviyesi ve lif dozajı arasındaki sinerjiye oldukça duyarlı olduğunu doğrulamaktadır. Bu faktörlerin tümü kuru, yüksek s/b ortamlarında daha da güçlenmektedir.

Doğal ince agregaların tamamen geri dönüştürülmüş İYA ile değiştirildiği ve KA'nın %0; %25; %50 ve %100 k-İYA ile ikame edildiği %100 i-İYA'da, etkili s/b oranları, spesifik karışım konfigürasyonuna bağlı olarak 0,55 ile 0,68 arasında değişmiştir. Bu yüksek s/b değerleri, sıfır ökme SSB sistemlerinde optimal bağlayıcı jel oluşumu ve matris yoğunlaştırma eşiğini açtı. Sonuç olarak, basınç dayanımı önemli ölçüde azaldı ve 90 günlük değerler sırasıyla 17,65; 26,95; 19,64 ve 16,76 MPa olarak kaydedildi. En yüksek mukavemet (26,95 MPa) %25 k-İYA; %20 ABT ve lif içermeyen (0,0% PPF) karışımda kaydedildi. Bu sonuç, lifle ilgili dispersiyon sorunları eşlik etmediğinde, orta derecede kaba agrega ikamesi ve imento seyreltmesinin, yüksek iç nem koşullarında bile kabul edilebilir mekanik performans sağlayabileceğini göstermektedir. Bununla birlikte; %50 k-İYA; %0 ABT ve %0,75 PPF içeren karışımda mukavemet keskin bir şekilde düşmüştür (19,64 MPa), bu da ABT'nin yokluğunun bağlayıcı aktivitesini artırabileceğini, ancak sıfır çökme koşullarında aşırı lif içeriğinin homojen dağılımı engellediğini, hapsolmüş havayı artırdığını ve yeterli sıkıştırmayı engellediğini göstermektedir. Benzer şekilde; %100 k-İYA; %0 ABT ve %0,50 PPF içeren karışım en düşük mukavemeti (16,76 MPa) vermiştir. Bu da her iki agrega fazının tam ikamesinin, özellikle yeterli imento reaktivitesi olmadığında ve iç su içeriği matrisin suyu etkili bir şekilde tutma ve kullanma kapasitesini aştığında, aşırı gözeneklilik ve zayıf ara yüzey bağlanmasına yol açtığını doğrulamaktadır. %0 k-İYA; %40 ABT ve %0,25 PPF içeren karışım bile sadece 17,65 MPa'ya ulaşmıştır, bu da yüksek s/b koşullarında jel oluşumu üzerinde yüksek ABT dozajının olumsuz etkilerini vurgulamaktadır. Genel olarak, bu sonuçlar %100'i-İYA'da mukavemet performansının s/b oranı, ABT reaktivitesi ve PPF dozajının birleşik etkilerine karşı oldukça duyarlı olduğunu açıkça göstermektedir. SSB gibi kuru, sıkıştırılmış sistemlerde, gözenekliliği azaltmak, etkili hidrasyonu sağlamak ve lifle ilgili kusurları önlemek için geri dönüştürülmüş malzemelerle tam ikame dikkatlice optimize edilmelidir.



Şekil 4.1 Basınç dayanımları

## 4.2 Yarma-Çekme Mukavemeti

Şekil 4.2, çeşitli oranlarda ince inşaat ve yıkım atığı (i-İYA), kaba İYA (k-İYA), atık beton tozu (ABT) ve polipropilen elyaf (PPF) içeren silindirle sıkıştırılmış beton (SSB) karışımlarının 7; 28 ve 90. günlerdeki bölünme mukavemetinin gelişimini göstermektedir. Tüm karışımlar, SSB teknolojisinin özelliği olan sıfır çökme kıvamında tasarlanmıştır. Ancak, agrega emme kapasiteleri ve yüzey dokularındaki farklılıklar nedeniyle, özellikle İYA içeren karışımlarda etkili su-bağlayıcı (s/b) oranları önemli ölçüde değişmiştir.

Farklı seviyelerde ince ve kaba inşaat ve yıkım atıkları (i-İYA ve k-İYA), ABT ve PPF içeren SSB karışımlarının çatlama çekme mukavemeti performansı, sıfır çökme koşulları altında agrega gözenekliliği ve genel bağlayıcı verimliliğinden önemli ölçüde etkilenen iç su-bağlayıcı (s/b) oranları ile güçlü bir korelasyon göstermektedir.

Sadece doğal ince agregaların kullanıldığı %0 i-İYA'da, k-İYA ikamesi arttıkça s/b oranları 0,34'ten 0,46'ya yükselmiştir. Referans karışım (%0 İYA, ABT ve PPF) düşük s/b oranı 0,34'te 90 günlük çekme mukavemeti 3,88 MPa olarak ölçülmüştür. İlginç bir şekilde, mukavemet %25 k-İYA; %10 ABT ve %0,25 PPF (s/b = 0,39)

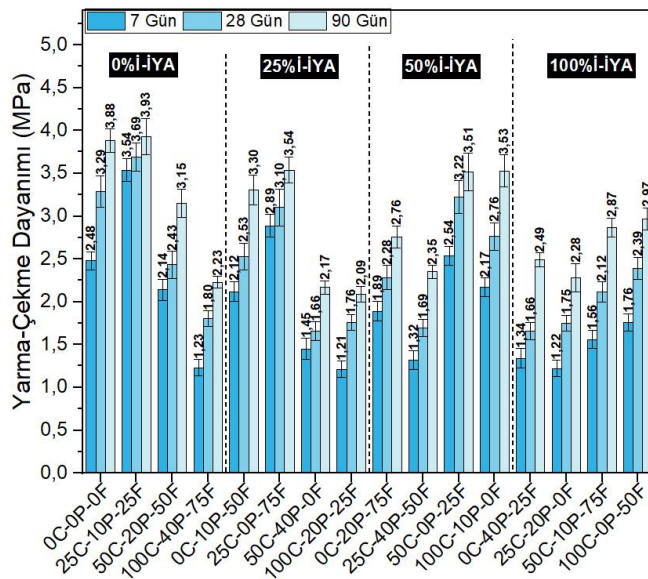
değerlerinde 3,93 MPa'ya hafifçe artmıştır, bu da orta düzeyde elyaf dozajı ve sınırlı çimento ikamesinin matris kohezyonunu bozmadan çatlak direncini artırabileceğini göstermektedir. Ancak, ABT ve PPF içeriği daha da arttıkça, mukavemet %100 k-İYA, %40 ABT ve %0,75 PPF ( $s/b = 0,41$ ) değerlerinde 2,23 MPa'ya önemli ölçüde düşmüştür. Bu azalma, geri dönüştürülmüş kaba agregaların ara yüzey bağlanmasına olan kümülatif olumsuz etkilerine, C-S-H oluşumunu sınırlayan ABT'nin azalmış reaktivitesine ve kuru koşullarda liflerin topaklanma riskine atfedilebilir, bu da eşit gerilim transferini bozar.

%25 i-İYA'da,  $s/b$  oranları 0,40 ile 0,51 arasında değişirken; 90 günlük çekme mukavemeti değerleri 2,09 ile 3,54 MPa arasında değişmiştir. En yüksek değer (3,54 MPa); %25 k-İYA; %0 ABT ve %0,75 PPF ( $s/b = 0,42$ ) içeren karışımda elde edildi, bu da çimento seyreltme uygulanmadığında daha yüksek lif dozajının olumlu etkisini göstermektedir. Lifler, İYA'nın neden olduğu artan gözenekliliği ve zayıf bağlanmayı telafi ederek çatlak sonrası performansı iyileştiriyor gibi görünmektedir. Öte yandan, en düşük mukavemet (2,09 MPa) %100 k-İYA; %20 ABT ve %0,25 PPF ( $s/b = 0,51$ ) karışımında kaydedilmiştir; burada hem yüksek bağlayıcı seyreltme hem de yetersiz lif takviyesi jel oluşumunu ve çatlak köprüleme yeteneğini sınırlamıştır.

%50 i-İYA'da, geri dönüştürülmüş ince agregaların daha yüksek gözenekliliği nedeniyle iç su talebi keskin bir şekilde artmış ve  $s/b$  değerleri 0,41 ile 0,69 arasında değişmiştir. 90 günlük mukavemet buna bağlı olarak 2,35 ile 3,81 MPa arasında değişmiştir. En iyi performans (3,81 MPa); %50 k-İYA, %0 ABT ve %0,25 PPF ( $s/b = 0,68$ ) içeren karışımda gözlemlenmiştir. Bu, yüksek  $s/b$  oranlarında bile, bağlayıcı seyreltme olmaması ve lif içeriğinin yeterli ancak aşırı olmaması durumunda çekme mukavemetinin korunabileceğini göstermektedir. Bu, lif verimliliği tehlikeye girmediği sürece, çekme mukavemetinin basınç mukavemetine göre yüksek  $s/b$  oranlarına daha az duyarlı olduğunu göstermektedir. Tersine, %25 k-İYA; %40 ABT ve %0,50 PPF ( $s/b = 0,45$ ) içeren karışımda mukavemet 2,35 MPa'ya düşmüştür, bu da yüksek ABT seviyeleri ve yüksek lif içeriğinin, özellikle kuru sıkıştırma altında matris sürekliliğini bozduğunu doğrulamaktadır.

İnce ve kaba agregaların tamamen değiştirildiği %100 i-İYA'da, s/b oranları 0,55 ile 0,68 arasında değişmiştir. Düzgün bir şekilde yüksek su talebine rağmen, çekme mukavemeti 2,28 ile 2,97 MPa arasında nispeten dar bir aralıkta kalmıştır. En yüksek mukavemet (2,97 MPa); %100 k-İYA; %0 ABT ve %0,50 PPF (s/b = 0,68) içeren karışımda kaydedildi, bu da ABT'nin kullanılmaması ve lif içeriğinin optimize edilmesi durumunda, İYA'nın tamamen değiştirilmesine rağmen kabul edilebilir bir çekme davranışı elde edilebileceğini doğrulamaktadır. Buna karşılık, en düşük çekme mukavemeti (2,28 MPa) %25 k-İYA; %20 ABT ve lif içermeyen karışımda (s/b = 0,66) bulunmuştur, bu da bağlayıcı reaktivitesi ve agrega bağlanması tehlikeye girdiğinde liflerin çekme kapasitesini korumada kritik rol oynadığını göstermektedir.

Özetle, SSB'deki çekme mukavemetinin bölünmesi, özellikle sıfır çökme ve yüksek İYA koşullarında, s/b oranı, ABT içeriği ve lif dozajı arasındaki sinerjiye büyük ölçüde bağlıdır. Daha yüksek s/b değerleri (>0,60) genellikle çekme kapasitesini azaltırken, ABT düşük tutulursa ve lif takviyesi %0,25-0,50'lik optimal aralıkta kullanılırsa bu etki azaltılabilir. Aşırı lif içeriği (>%0,75) veya yüksek ABT (>%20) işlenebilirliğin kötü olması, liflerin topaklanması ve yetersiz hidrasyon nedeniyle sürekli olarak düşük performansa yol açmıştır. Bu nedenle, SSB'ye yüksek miktarda geri dönüştürülmüş malzeme katıldığında çekme mukavemetini korumak için dengeli bir karışım tasarımı sürdürmek çok önemlidir.



Şekil 4.2 Yarma-Çekme deney sonuçları

### 4.3 Su İçinde, Doygun Kuru Yüzey ve Kuru Ağırlık

Şekil 4.3a, farklı oranlarda ince İYA (i-İYA), kaba İYA (k-İYA), atık beton tozu (ABT) ve polipropilen elyaf (PPF) içeren SSB karışımlarının gözenekliliğini ve su emilimini göstermektedir. Tüm karışımlar, SSB tasarımının özelliği olan sıfır çökme kıvamında hazırlanmıştır. Ancak, İYA bazlı agregaların farklı su emme kapasiteleri ve yüzey dokuları nedeniyle, karışımlar arasında etkili su-bağlayıcı (s/b) oranları önemli ölçüde farklılık göstermiştir ve bu da matris gözenekliliğini etkilemiştir.

Doğal ince agregaların korunduğu %0 i-İYA'da, k-İYA ikamesi %0'dan %100'e çıktıkça gözeneklilik kademeli olarak %0,98'den %2,87'ye yükseldi ve s/b 0,34'ten 0,41–0,46'ya çıktı. En düşük gözeneklilik, İYA, ABT veya PPF içermeyen referans karışımda gözlemlendi. Gözeneklilik, daha yüksek k-İYA ve ABT seviyeleriyle arttı; bunun nedeni muhtemelen geri dönüştürülmüş agregaların daha yüksek su ihtiyacı ve düzensiz yüzey morfolojisi ile aşırı ABT'nin neden olduğu bağlayıcı jel oluşumunun azalmasıdır. Özellikle; %100 k-İYA'da %40 ABT ve %0,75 PPF içeren karışım en yüksek gözeneklilik değerini (%2,87) gösterdi, bu da sıfır çökme koşullarında bağlayıcı seyreltme, lif aglomerasyonu ve azalmış sıkıştırma verimliliğinin birleşik etkisini göstermektedir.

%25 i-İYA'da gözeneklilik değerleri %2,12 ile %3,94 arasında değişirken, en yüksek değer %50 k-İYA; %40 ABT ve PPF içermeyen (s/b = 0,40) karışımda kaydedildi. Bu s/b değeri orta düzeyde görünse de, liflerin eksikliği muhtemelen mikro çatlamaya karşı direnci azalttı ve sınırsız gözenek oluşumuna yol açtı. Tersine, en düşük gözeneklilik (%2,12) %0 k-İYA; %10 ABT ve %0,5 PPF (s/b = 0,40) değerlerinde görülmüştür, bu da uygun lif içeriği ve sınırlı ABT kullanımının i-İYA'nın matris sıklığındaki olumsuz etkilerini ortadan kaldırdığını göstermektedir.

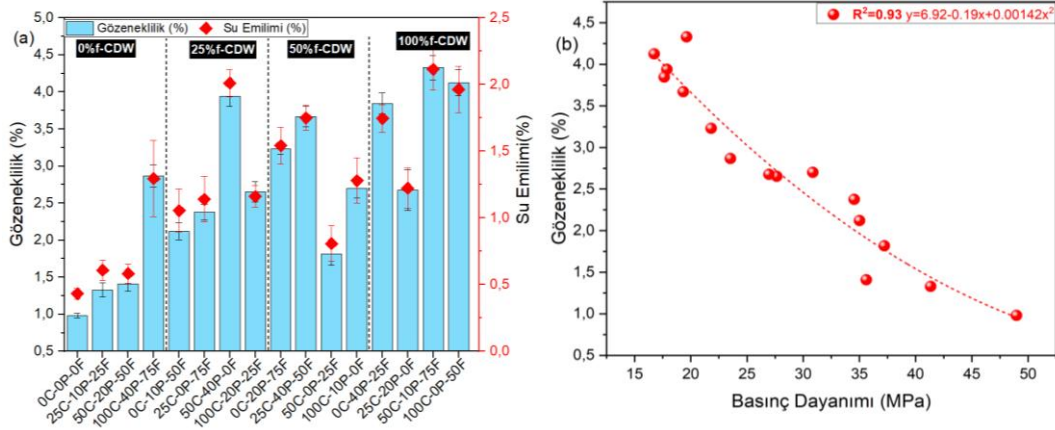
%50 i-İYA'da, iç su talebinin etkisi daha belirgin hale gelmiştir. s/b oranları 0,41 ile 0,69 arasında geniş bir aralıkta değişmesine rağmen, gözeneklilik doğrusal olmayan bir şekilde değişmiştir. En düşük gözeneklilik (%1,82) %50 k-İYA, %0 ABT ve %0,25 PPF (s/b = 0,68) oranlarında gözlemlenmiştir, bu da yeterli lif takviyesi ve çimento seyreltmesinin olmaması nedeniyle sinerjik etkiyle dolum ve çatlak köprüleme

iyileşmesini yansıtıyor olabilir. Buna karşılık, %40 ABT ve %0,50 PPF içeren karışımlar, nispeten orta düzeyde bir s/b (0,45) oranına sahip olmalarına rağmen, önemli ölçüde daha yüksek gözeneklilik (%3,67) göstermiştir. Bu, aşırı ABT'nin sadece jel oluşumunu azaltmakla kalmayıp, özellikle kısmen etkili fiber dağılımı ile birleştiğinde gözenek sürekliliğini de artırdığını göstermektedir.

%100 i-İYA'da, tüm karışımlar yüksek s/b oranlarına (0,55–0,68) ve buna bağlı olarak yüksek gözeneklilik seviyelerine (%2,68–%4,33) sahipti. En yüksek gözeneklilik (%4,33) %50 k-İYA; %10 ABT ve %0,75 PPF içeren karışımda görüldü. Bu yapı, yüksek su mevcudiyeti, bağlayıcı seyreltme ve lif aşırı dozlamasının birleşik etkisini yansıtmaktadır ve bunların tümü hava hapsolmesine ve matris yoğunlaşmasının azalmasına katkıda bulunmaktadır. İlginç bir şekilde, %25 k-İYA; %20 ABT ve lif içermeyen karışım daha düşük gözeneklilik (2,68) vermiştir, bu da yüksek i-İYA sistemlerinde, sıkıştırma ve dağılım sağlanamadığında liflerin yokluğunun aşırı dahil edilmesinden daha faydalı olabileceğini göstermektedir.

Sonuç olarak, sonuçlar SSB'deki gözenekliliğin sadece geri dönüştürülmüş agrega içeriği tarafından değil, aynı zamanda s/b oranı, ABT dozu ve lif içeriği arasındaki etkileşim tarafından da belirlendiğini açıkça göstermektedir. Daha yüksek geri dönüştürülmüş içerik, daha yüksek emilim ve açısallık nedeniyle genellikle gözenekliliği artırırken, ABT ( $\leq$ %20) ve lif dozajının (%0,25–0,50) uygun şekilde kontrol edilmesi ve aşırı s/b'nin önlenmesi, sıfır çökme kısıtlamaları altında bile gözenekliliği azaltabilir. Yüksek İYA sistemlerinde aşırı ABT ve PPF, tutarlı bir şekilde daha yüksek gözenekliliğe yol açmıştır, bu da mikroyapısal bütünlüğü korumak için karışım tasarımının optimizasyonunun kritik önemini doğrulamaktadır.

Şekil 4.3b, SSB karışımlarında basınç dayanımı ile gözeneklilik arasındaki ters ilişkiyi göstermektedir. Yüksek belirleme katsayısı ( $R^2 = 0,93$ ) mükemmel bir uyumu gösterir ve gözenekliliğin basınç dayanımını etkileyen baskın bir faktör olduğunu ortaya koyar. Gözeneklilik arttıkça dayanım önemli ölçüde azalır, bu da mekanik performansı korumada mikroyapısal yoğunlaşmanın kritik rolünü vurgular.



Şekil 4.3 a) Su içi ve su emme, b) Basınç dayanımları

Şekil 4.4a, 90 gün sonra, çeşitli oranlarda ince ve kaba inşaat ve yıkım atıkları (i-İYA ve k-İYA), atık beton tozu (ABT) ve polipropilen lifleri (PPF) içeren silindirle sıkıştırılmış beton (SSB) karışımlarının fırın kurutma yoğunluğunu göstermektedir. Tüm karışımlar sıfır çökme kıvamında dökülmüş olmasına rağmen, geri dönüştürülmüş agregaların farklı emme özellikleri ve yüzey dokuları nedeniyle etkili su-bağlayıcı (s/b) oranları değişiklik göstermiştir. Bu değişiklikler, sistemdeki sıkıştırma verimliliği, gözeneklilik ve jel oluşumunun derecesini yansıtan matris yoğunluğu üzerinde doğrudan bir etkiye sahip olmuştur.

%0 i-İYA'da, fırın kurutma yoğunluğu değerleri 2291 ila 2164 kg/m<sup>3</sup> arasında değişirken, k-İYA içeriği %0'dan %100'e çıktıkça s/b oranları 0,34 ila 0,41 arasında değişmiştir. En yüksek yoğunluk (2325 kg/m<sup>3</sup>) %25 k-İYA; %10 ABT ve %0,25 PPF'de gözlemlenmiştir, bu da orta düzeyde geri dönüştürülmüş kaba agrega ve ABT'nin, optimal elyaf dozajı ile birleştirildiğinde sıkıştırma ve dolgu etkilerini iyileştirebileceğini göstermektedir. Ancak, İYA ve ABT içeriğinin daha da artırılması, gözenekliliğin artması, bağlayıcı reaktivitesinin azalması ve lif dağılımının etkisiz hale gelmesi nedeniyle yoğunluğun düşmesine (%100 k-İYA ve %40 ABT'de 2164 kg/m<sup>3</sup>) neden olmuştur.

%25 i-İYA'da kuru yoğunluklar 2065 ila 2231 kg/m<sup>3</sup> arasında değişmiştir. En düşük değer (2065 kg/m<sup>3</sup>) %50 k-İYA; %40 ABT ve PPF içermeyen karışımda (s/b = 0,40) görülmüştür, bu da fiber takviyesi olmadan aşırı çimento ikamesinin matris yoğunlaşmasını önemli ölçüde bozduğunu doğrulamaktadır. En yüksek yoğunluk

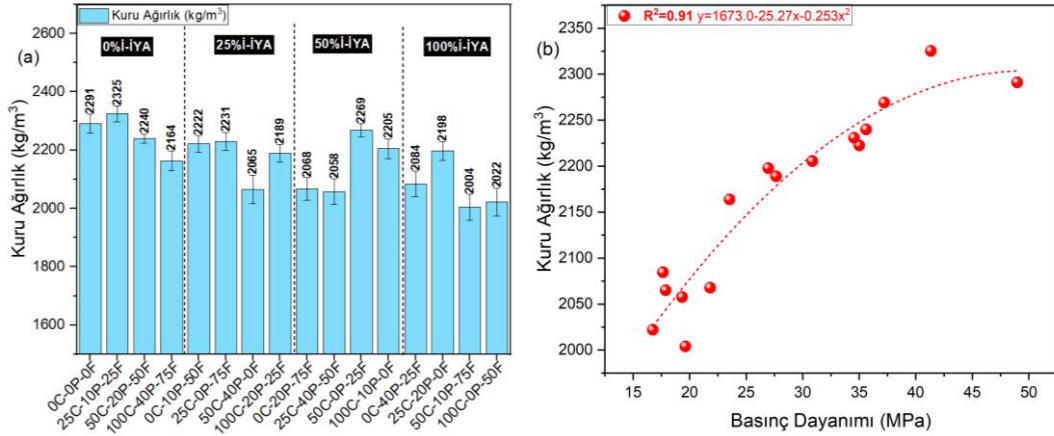
(2231 kg/m<sup>3</sup>) %25 k-İYA; %0 ABT ve %0,75 PPF (s/b = 0,42) oranlarında kaydedildi, bu da orta düzeyde İYA içeren sistemlerde, bağlayıcı seyreltme olmadan fiber takviyesinin, muhtemelen çatlak köprüleme ve büzülme kontrol mekanizmaları yoluyla daha iyi sıkıştırma ve yoğunlaştırma sağladığını göstermektedir.

%50 i-İYA'da, karışımlar 2058 ila 2269 kg/m<sup>3</sup> arasında değişen daha büyük bir kuru yoğunluk değişkenliği sergilemiş ve buna karşılık gelen s/b oranları 0,41 ila 0,69 arasında değişmiştir. Özellikle, en yüksek yoğunluk (2269 kg/m<sup>3</sup>) %50 k-İYA; %0 ABT ve %0,25 PPF (s/b = 0,68) değerlerinde elde edildi; bu, nispeten yüksek su talebine rağmen çimento seyreltmesinin ortadan kaldırılması ve optimal elyaf içeriğinin varlığına atfedilebilir. Bu karışım, dengeli bir mikro yapı sayesinde daha iyi sıkıştırma ve jel sürekliliği sağlamıştır. Buna karşılık, en düşük yoğunluk (2058 kg/m<sup>3</sup>) %25 k-İYA; %40 ABT ve %0,50 PPF ile elde edilmiştir; bu kombinasyon, zayıf işlenebilirlik, lif kümelenmesi ve zayıf bağlayıcı oluşumuna yatkındır.

%100 i-İYA'da, kuru yoğunluklar genellikle daha düşük ve daha homojendi ve 2004 ila 2198 kg/m<sup>3</sup> arasında değişiyordu. En yüksek değer (2198 kg/m<sup>3</sup>); %25 k-İYA; %20 ABT ve lif içermeyen (s/b = 0,66) karışımda kaydedildi; bu, muhtemelen sınırlı lif etkileşimi ve orta derecede reaktif bağlayıcı içeriği arasındaki uzlaşma nedeniyle olabilir. Bununla birlikte, en düşük yoğunluk (2004 kg/m<sup>3</sup>) %50 k-İYA; %10 ABT ve %0,75 PPF'de gözlemlenmiştir; burada lif aşırı dozajı, bağlayıcı seyreltme ve yüksek geri dönüştürülmüş içerik birleşik etkileri muhtemelen hava hapsolmasına ve matris bütünlüğünün azalmasına yol açmıştır.

Özetle, SSB'deki fırın kurutma yoğunluğu, öncelikle İYA içeriği, ABT dozajı, lif ilavesi ve etkili s/b oranının birleşik etkilerinden etkilenir. k-İYA'nın orta düzeyde ilavesi ve PPF'nin kontrollü kullanımı, parçacık paketleme ve çatlak kontrolünün iyileştirilmesi yoluyla yoğunluğu artırabilirken, aşırı İYA veya ABT, özellikle yüksek s/b koşullarında, gözenekliliğin artmasına ve jel yoğunluğunun azalmasına neden olur. Sınırlı ABT ( $\leq$ %20), orta düzeyde PPF (%0,25–0,50) ve kontrollü geri dönüştürülmüş agrega seviyeleri ( $\leq$ %50) içeren karışımlarda optimum performans gözlemlenmiştir. Bu durum, sürdürülebilir SSB uygulamalarında matris yoğunlaşmasını korumak için dengeli karışım tasarımının önemini vurgulamaktadır.

Şekil 4.4b, basınç dayanımı ile fırın kurutma yoğunluğu arasında yüksek bir belirleme katsayısı ( $R^2 = 0,91$ ) ile güçlü bir pozitif korelasyon olduğunu göstermektedir. Bu, SSB matrisinin yoğunluğu arttıkça basınç dayanımının da buna bağlı olarak arttığını göstermekte ve mekanik performansı artırmada matris sıkıştırma ve gözenekliliğin azaltılmasının kritik rolünü vurgulamaktadır.



Şekil 4.4 a) Kuru ağırlık, b) Basınç dayanımı

#### 4.4 Sorptivite (Kılcallık)

Şekil 4.5a, çeşitli oranlarda ince (i-İYA) ve kaba (k-İYA) inşaat ve yıkım atıkları, atık beton tozu (ABT) ve polipropilen lifleri (PPF) içeren silindirle sıkıştırılmış beton (SSB) karışımlarının 90 gün sonra sorptivite davranışını göstermektedir. SSB'nin sıfır çökme kıvamı özelliğine rağmen, etkili su-bağlayıcı (s/b) oranları, geri dönüştürülmüş agregaların emme kapasitesi ve yüzey dokusundaki farklılıklar nedeniyle önemli ölçüde değişiklik göstermiştir ve bu da kılcal su alımını doğrudan etkilemiştir.

%0 i-İYA'da emilebilirlik 1,40 ila 2,78 kg/m<sup>2</sup> arasında değişmiş ve k-İYA, ABT ve PPF seviyeleri arttıkça artmıştır. En düşük sorpsiyon (1,40 kg/m<sup>2</sup>) referans karışımda (%0 İYA, ABT, PPF; s/b = 0,34) kaydedildi, bu da yoğun, iyi hidratlanmış bir matrisin etkinliğini doğruladı. Tersine, en yüksek değer (2,78 kg/m<sup>2</sup>) %100 k-İYA; %40 ABT ve %0,75 PPF (s/b = 0,41) karışımında elde edildi; burada gözeneklilik, bağlayıcı seyreltme ve lif kümelenmesi muhtemelen yüksek su emilimine neden oldu.

%25 i-İYA'da emme değerleri daha fazla değişkenlik gösterdi (2,26 ila 5,47 kg/m<sup>2</sup>). Maksimum emme (5,47 kg/m<sup>2</sup>) %50 k-İYA; %40 ABT ve PPF içermeyen karışımda

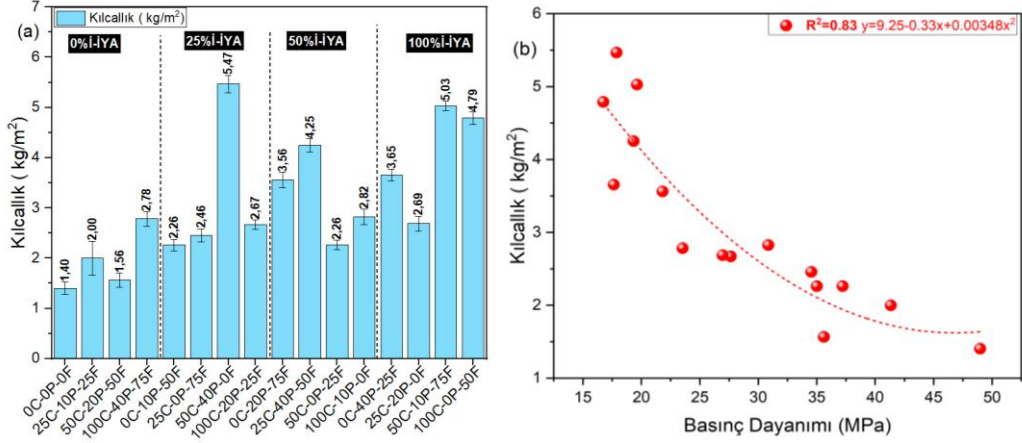
gözlemlenmiştir, bu da yüksek bağlayıcı seyreltmesinin ve çatlak köprüleme liflerinin bulunmamasının olumsuz etkisini vurgulamaktadır. Buna karşılık, %0 k-İYA; %10 ABT ve %0,5 PPF ( $s/b = 0,40$ ) en düşük emiciliği ( $2,26 \text{ kg/m}^2$ ) elde etti, bu da dengeli bir bağlayıcı reaktivitesi ve fiber takviyesi kombinasyonunun nem girişini azaltabileceğini göstermektedir.

%50 i-İYA'da,  $s/b$  oranları nispeten yüksek olmasına rağmen ( $0,69$ 'a kadar), emicilik  $2,26$  ila  $4,25 \text{ kg/m}^2$  arasında değişmiştir. En iyi performans (en düşük emicilik) %50 k-İYA; %0 ABT ve %0,25 PPF'de elde edildi; burada ABT'nin olmaması ve optimize edilmiş fiber dozajı, daha kompakt ve daha az geçirgen bir matrisin oluşmasına katkıda bulundu. Öte yandan, %25 k-İYA; %40 ABT ve %0,50 PPF ile daha yüksek emicilik ( $4,25 \text{ kg/m}^2$ ) elde edildi, bu muhtemelen macun gözenekliliğinin artması ve lif dağılımının zayıf olmasından kaynaklanmaktadır.

%100 i-İYA'da, emicilik tüm karışımlarda yüksek kaldığı ( $2,69$ – $5,03 \text{ kg/m}^2$ ), bu da tamamen geri dönüştürülmüş agrega sistemlerinin doğası gereği gözenekli yapısını ve yüksek  $s/b$  oranlarını ( $0,55$ – $0,68$ ) yansıtmaktadır. En yüksek değer ( $5,03 \text{ kg/m}^2$ ); %50 k-İYA; %10 ABT ve %0,75 PPF ile elde edilmiştir; bu kombinasyon, lif topaklanmasına ve matrisin tam yoğunlaşmamasına eğilimlidir. İlginç bir şekilde, en düşük sorptivite ( $2,69 \text{ kg/m}^2$ ) %25 k-İYA; %20 ABT ve lif içermeyen karışımda elde edildi, bu da bazı durumlarda, bağlayıcı reaktivitesi ve sıkıştırma yeterliyse, zayıf dağılmış liflerin ortadan kaldırılmasının faydalı olabileceğini göstermektedir.

Sonuçlar, sorptivitenin sadece geri dönüştürülmüş agrega içeriği tarafından değil, aynı zamanda karşılıklı etkileşimi tarafından da belirlendiğini göstermektedir. Düşük ila orta  $s/b$  oranlarına ( $<0,45$ ); kontrollü ABT seviyelerine ( $\leq\%20$ ) ve optimal lif dozajlarına ( $\%0,25$ – $0,50$ ) sahip karışımlar, tutarlı bir şekilde daha düşük su emilimi göstermiştir. Buna karşılık, yüksek ABT ikamesi ve aşırı PPF ( $\geq\%0,75$ ) içeren kombinasyonlar, zayıf jel oluşumu ve lif topaklanması nedeniyle bu bulgular, geçirgenliği en aza indirmek ve kuru, düşük işlenebilirlik koşullarında geri dönüştürülmüş malzemeler kullanan SSB sistemlerinde uzun vadeli dayanıklılığı sağlamak için dengeli bir karışım tasarımının gerekli olduğunu vurgulamaktadır.

Şekil 4.5b, basınç dayanımı ile emicilik arasında güçlü bir ters korelasyon olduğunu ve yüksek bir belirleme katsayısı ( $R^2 = 0,83$ ) olduğunu göstermektedir. Bu, emiciliğin artmasıyla (daha yüksek gözeneklilik ve nem girişi yansıtan) basınç dayanımının önemli ölçüde azalma eğiliminde olduğunu gösterir ve mekanik performans üzerinde dayanıklılıkla ilgili özelliklerin etkisini vurgular.

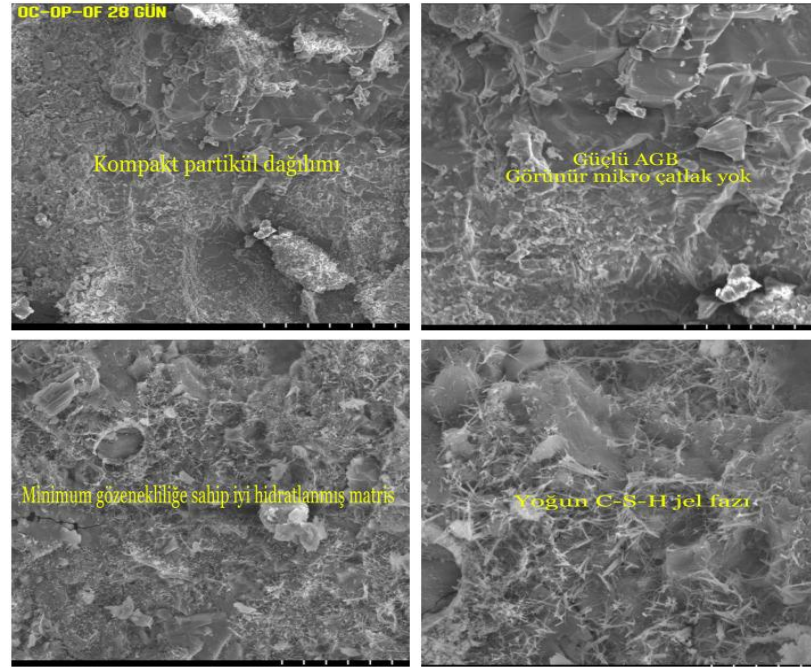


Şekil 4.5 a) Sorptivite (Kılcallık), b) Basınç dayanımı

#### 4.5 28 Günlük Mikroyapılar

Referans silindirle sıkıştırılmış beton (SSB) karışımının (0C-0P-0F) 28 günlük kürlenme sonrası SEM görüntüleri, 43,8 MPa'lık üstün 28 günlük basınç dayanımıyla tutarlı, yüksek yoğunluklu, homojen ve iyi hidratlanmış bir mikro yapı ortaya koymaktadır. Bu değer, test edilen tüm karışımlar arasında en yüksek değerdir. Düşük büyütme oranlarında ( $\times 250$  ve  $\times 500$ ), matris, minimum görünür çatlak veya boşluklarla kompakt bir granüler düzenleme gösterir, bu da etkili sıkıştırma ve homojen hidrasyonu destekleyen uygun su-bağlayıcı (s/b) koşullarını gösterir. Bağlayıcı ve agregalar arasındaki arayüz sürekli ve sıkı bir şekilde bağlanmış görünür, bu da sağlam bir arayüz geçiş bölgesi (AGB) olduğunu gösterir. Daha yüksek büyütme oranlarında ( $\times 1000$  ve  $\times 2500$ ), mikrograflar yoğun kalsiyum silikat hidrat (C-S-H) jellerinin geniş çapta oluştuğunu, boşlukları kapladığını ve gözeneklerin incilmesi katkıda bulunduğunu ortaya koyar. Mikro yapı, sıkı bir şekilde paketlenmiş hidrasyon ürünleri ve mikro çatlak veya reaksiyona girmemiş parçacıkların bulunmaması ile karakterize edilen düşük gözenekli bir jel matrisi ile karakterize edilir ve bu da yüksek bağlayıcı reaktivitesini ve çimentolu fazların tam olarak kullanılmasını yansıtır. Bu

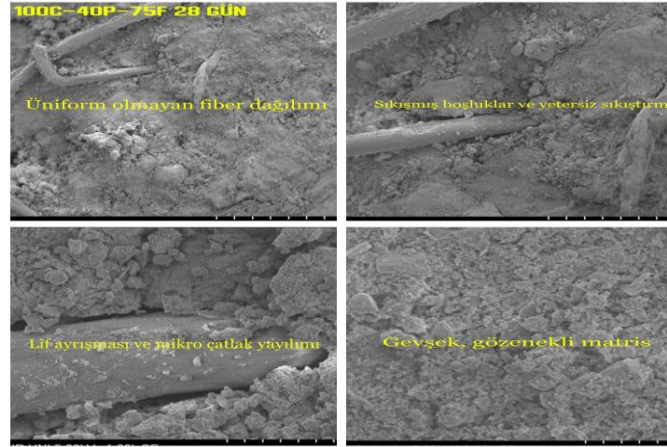
karışımında geri dönüştürülmüş agrega, atık beton tozu (ABT) ve polipropilen lifleri (PPF) bulunmaması, heterojenlik, gözeneklilik veya lif aglomerasyonu ile tipik olarak ilişkili iç kusurları ortadan kaldırmıştır. Sonuç olarak, matris üstün mekanik bütünlük, gelişmiş dayanıklılık potansiyeli ve nem girişini en aza indiren yollar sergilemektedir. Genel olarak, çoklu büyütme seviyelerinde gözlemlenen mikro yapısal özellikler, referans karışımın optimize edilmiş karışım tasarımının verimli hidrasyon, güçlü matris-agrega bağlanması ve son derece kompakt bir jel yapısı sağladığını doğrulamaktadır. Bunların tümü, karışımın olağanüstü basınç dayanımı performansının temelini oluşturmaktadır.



Şekil 4.6 28 gün sonra (0C-0P-0F) SEM görüntüleri

28 gün sonra 100C-40P-75F karışımının SEM mikrografları, tüm test edilen karışımlar arasında en düşük basınç dayanımı olan 17,9 MPa ile tutarlı olarak, oldukça gözenekli ve süresiz bir mikro yapı sergilemektedir. Düşük büyütme oranlarında, zayıf ara yüzey bağlanması ve zayıf gömülme ile açıkta kalan polipropilen lifler gözlemlenir, bu da yetersiz lif-matris yapışmasını gösterir. Liflerin etrafındaki matris, boşluklar ve mikro çatlaklarla gevşek bir şekilde sıkıştırılmış görünür; bu, aşırı lif dozajı (%0,75) ile %100 geri dönüştürülmüş kaba agregaların yüksek gözenekli yapısı ve yüksek çimento ikame seviyesi (%40 ABT) birleşiminin bir sonucudur ve bunlar birlikte etkili bağlayıcı jel gelişimini engeller. Lifli inklüzyonlar da belirli bölgelerde

aglomera halindedir, bu da düzgün olmayan dağılım ve lif topaklanmasına işaret eder ve bu da matris sürekliliğini daha da bozar ve sıfır çökme koşullarında sıkıştırma verimliliğini azaltır. Daha yüksek büyütme oranındaki görüntüler, yoğun kalsiyum silikat hidrat (C-S-H) jelinin minimum düzeyde oluştuğunu ve bunun yerine matris boyunca dağılmış reaksiyona girmemiş parçacık kümeleri, parçalanmış hidrasyon ürünleri ve mikro boşluklar olduğunu gösterir. Çimento yerine ABT'nin yüksek oranda kullanılması, reaktif klinker içeriğini seyreltmış ve mukavemet ve dayanıklılık için kritik öneme sahip bağlayıcı jellerin oluşumunu sınırlamıştır. Ayrıca, pürüzlü yüzeyler ve yüksek emilim ile karakterize edilen tamamen geri dönüştürülmüş kaba agregaların kullanımı, iç su tutma ve eksik hidrasyona katkıda bulunmuş, gözenekliliği daha da artırmış ve matris kohezyonunu azaltmıştır. Bu özellikler, zayıf hidrasyon verimliliği, düşük mikroyapısal yoğunlaşma ve zayıf ara yüzey geçiş bölgelerinin (AGB) gelişmesini yansıtmaktadır ve bunların tümü mekanik performansın ciddi şekilde azalmasına katkıda bulunmaktadır. Genel olarak, SEM analizi, aşırı geri dönüştürülmüş agrega içeriği, yüksek ABT dozu ve kuru SSB koşulları altında lif aşırı yüklemesinin, matrisin yapısal bütünlüğünü, gözenek inceliğini ve uzun vadeli dayanıklılık potansiyelini ciddi şekilde tehlikeye attığını doğrulamaktadır.

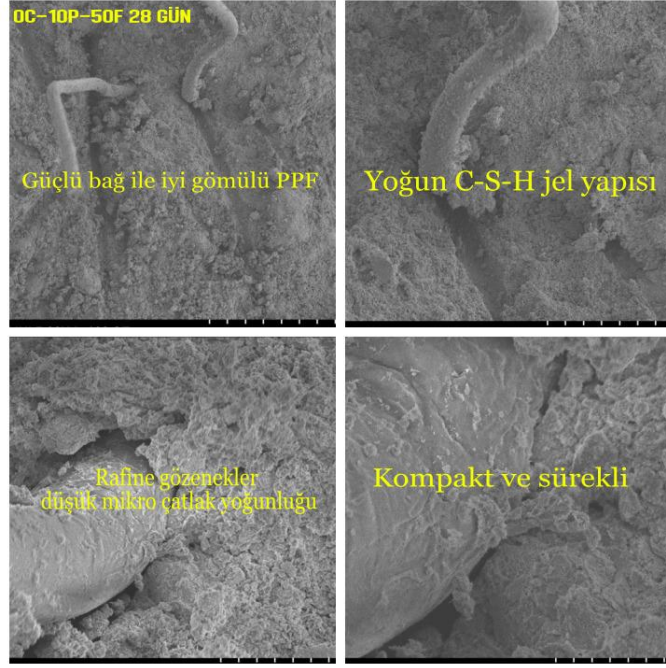


Şekil 4.7 28 gün sonra (100C-40P-75F) SEM görüntüleri

28 gün sonra 0C-10P-50F karışımının SEM mikro yapısı, kısmi i-İYA ikame grubu arasında üstün mekanik performansı (31,3 MPa) ile uyumlu, nispeten yoğun ve iyi entegre bir matris ortaya koymaktadır. Daha düşük büyütme seviyelerinde, polipropilen lifler açıkça görülebilir, bağlayıcı matris içine iyi gömülüdür ve liflerin çevresinde minimum ayrılma veya boşluk belirtileri ile iyi bir ara yüzey bağlanma

gösterir. Bu, etkili lif dağılımı ve güçlü matris-lif yapışmasını gösterir, bu da kompozitin gelişmiş çatlak köprüleme kapasitesine ve çatlama sonrası davranışına katkıda bulunmuş olabilir. %0,5 PPF'nin dahil edilmesi, sıkıştırma veya matris sürekliliğini önemli ölçüde bozmadan takviye sağlamış gibi görünmektedir. Ek olarak, lifler nispeten yoğun bir hidrasyon ürünü ile çevrilidir, bu da sıfır çökme karıştırma koşulları altında yeterli matris bütünlüğünü korurken, gerilme yeniden dağılımı ve çatlak direnci için elverişli koşulları göstermektedir.

Bağlayıcı faz, %10 çimento ABT ile değiştirilmesine rağmen, görünür C-S-H jel gelişimi ve kompakt bir mikro yapı ile orta ila yüksek jel yoğunlaşması sergilemektedir. Nispeten düşük ABT içeriği, ek ince parçacıklar sağlamış ve bağlayıcının reaktivitesini önemli ölçüde seyreltmeden dolgu etkisi yoluyla gözenek inceltmesine katkıda bulunmuştur. ABT parçacıkları muhtemelen hidrasyon ürünleri için çekirdeklenme bölgeleri olarak işlev görerek daha homojen jel oluşumunu teşvik etmiştir. Ayrıca, %25'i-İYA'nın varlığı, muhtemelen daha ince parçacık boyutu nedeniyle matris kalitesini bozmamıştır. Bu, parçacık paketleme yoğunluğunu artırmış ve tipik olarak kaba geri dönüştürülmüş agregalarla ilişkili büyük ara yüzey boşluklarının oluşumunu sınırlamıştır. Daha yüksek büyütme oranına sahip görüntüler, sınırlı gözeneklilik ve az sayıda mikro çatlak olduğunu göstermektedir. Agregaları ve lifleri çevreleyen sürekli bir jel ağı olduğu da görülmektedir. Bu özellikler, orta dozda ABT, optimize edilmiş lif içeriği ve kısmi geri dönüştürülmüş agrega ikamesinin sinerjik etkisinin, rafine gözenek yapısı, gelişmiş jel bağlantısı ve sağlam mekanik davranış ile sonuçlanabileceğini doğrulamaktadır. Genel olarak, SEM analizi; 0C-10P-50F karışımının, mikro yapısal olarak sağlam ve mekanik olarak dayanıklı bir matris aracılığıyla sürdürülebilirlik ve performans arasında etkili bir denge sağladığını göstermektedir.



Şekil 4.8 28 gün sonra (0C–10P–50F) SEM görüntüleri

#### 4.6 Magnezyum Sülfat ( $MgSO_4$ ) Direnci

Şekil 4.9a-b, farklı oranlarda ince ve kaba inşaat ve yıkım atıkları (i-İYA ve k-İYA), atık beton tozu (ABT) ve polipropilen elyafları (PPF) içeren SSB karışımlarının basınç dayanımı üzerinde uzun süreli sülfat maruziyetinin etkilerinin ayrıntılı bir değerlendirmesini sunmaktadır. 90 günlük standart kütleme işleminden sonra, karışımlar 120 gün boyunca %5  $MgSO_4$  çözeltisine maruz bırakılmıştır. Tüm karışımlar SSB için tipik olan sıfır çökme kıvamında tasarlanmış olmasına rağmen, geri dönüştürülmüş agregaların gözenekli ve emici yapısı nedeniyle iç su-bağlayıcı (s/b) oranları önemli ölçüde değişmiş ve bu da sülfat girişi ve bozulma mekanizmalarını önemli ölçüde etkilemiştir.

Sonuçlar, sülfat direncinin mikro yapısal kaliteye, bağlayıcı kimyasına ve lif-matris sinerjisine oldukça duyarlı olduğunu açıkça göstermektedir. %0 i-İYA'da, k-İYA ve ABT içeriğinin artmasıyla birlikte basınç dayanımı kaybının giderek artması, geri dönüştürülmüş kaba agregaların daha gözenekli ve reaktif bir ara yüzey geçiş bölgesi (AGB) oluşturduğunu ve bunun da sülfat iyonlarının daha kolay girmesine olanak tanıdığını göstermektedir. Bu etki, düşük Ca/Si C–S–H gibi sülfat dirençli hidrasyon ürünlerinin oluşumunu azaltan ve ettringit ve alçıtaşı kristalleşmesi gibi ikincil

reaksiyonları teşvik eden yüksek ABT seviyeleri tarafından daha da şiddetlendirilir. Ayrıca, s/b oranı (0,41) aşırı olmasa da en şiddetli mukavemet kaybı (%23,9) %100 k-İYA ve %40 ABT içeren karışımda gözlemlenmiştir, bu da yüksek gözeneklilik, bağlayıcı seyreltme ve düşük işlenebilirliğin olumsuz etkisinin birleşimini göstermektedir.

İlginç bir şekilde, %25'i-İYA'da sülfat maruziyetinden sonra basınç dayanımı kaybı diğer gruplara göre tutarlı bir şekilde daha düşüktü, bu da ince geri dönüştürülmüş parçacıkların matris yoğunlaştırmayı artırmada ve geçirgenliği azaltmada yararlı rolünü vurgulamaktadır. İyileştirilmiş paketleme etkisi, sülfat iyonlarının girişini sınırlayarak daha rafine bir gözenek yapısına katkıda bulunmuştur. Sadece %1,6 mukavemet kaybı gösteren en iyi performans gösteren karışım, %10 ABT ve %0,5 PPF içeriyordu ve bu ikisi birlikte dengeli hidrasyon ve etkili çatlak kontrolünü destekledi. Orta düzeyde ABT içeriği, dayanıklı C-S-H jeller oluşturmak için yeterli OPC'yi korurken, lifler mikro çatlakları köprülemek ve iç hasarı azaltmak için yardımcı oldu. Buna karşılık, ABT'yi %40'a çıkarmak ve lifleri çıkarmak, performansta önemli bir kayba (%19,6'ya kadar) yol açtı ve aşırı bağlayıcı seyreltme ile mekanik takviyenin yokluğunun birleşmesinin son derece hassas bir matris oluşturduğunu gösterdi. Bu sonuçlar, geri dönüştürülmüş SSB karışımlarında sülfat dayanıklılığını sağlamak için hem bağlayıcı bileşiminin hem de lif içeriğinin optimize edilmesinin önemini açıkça vurgulamaktadır.

%50 i-İYA'da sülfat direnci oldukça farklı eğilimler gösterdi. En şaşırtıcı bulgulardan biri, en düşük mukavemet kaybının (%3,1) lif içermeyen bir karışımda meydana gelmesiydi. Bu, belirli koşullar altında, özellikle liflerin sıkıştırma ve dağılımı olumsuz etkilediği durumlarda, liflerin çıkarılmasının matrisin sürekliliğini korumaya yardımcı olabileceğini göstermektedir. Bu, özellikle yüksek geri dönüştürülmüş içerik ve yüksek s/b oranlarına sahip SSB karışımlarında önemlidir, çünkü aşırı lif dozajı topaklanma, hapsolmuş boşluklar ve homojen olmayan macun dağılımına neden olabilir ve bunların tümü sülfat penetrasyonu için kanallar görevi görür. Öte yandan, en kötü performans (%28,2 kayıp) %40 ABT ve %0,50 PPF içeren karışımda görülmüştür. Bu da, çok fazla ABT ile optimal olmayan lif içeriğinin bir araya

gelmesinin, kimyasal saldırılara direnemeyen hassas bir yapı oluşturduğunu bir kez daha vurgulamaktadır.

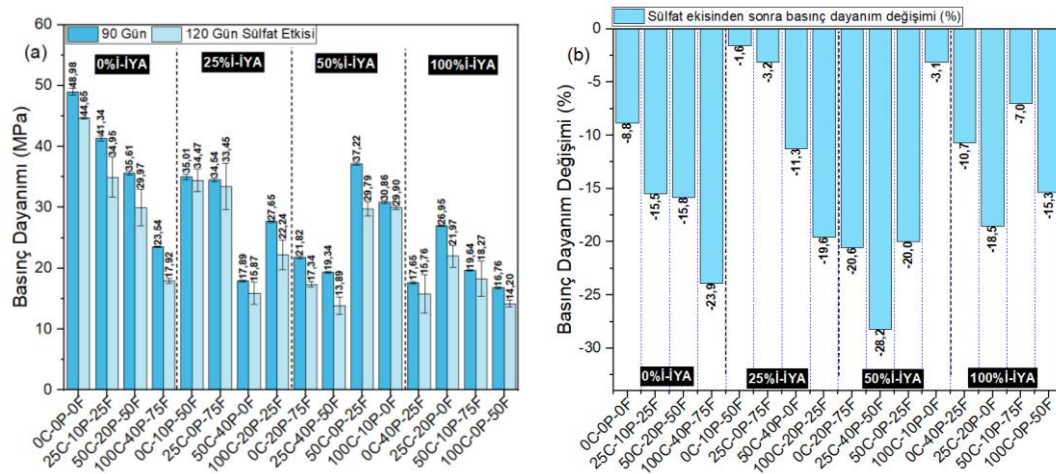
% 100'i-İYA'da, doğal ince agregaların daha gözenekli, köşeli geri dönüştürülmüş ince agregalarla tamamen değiştirilmesi nedeniyle, sezgisel olarak en düşük sülfat direnci beklenebilir. Ancak sonuçlar, karışım tasarımı dikkatlice optimize edildiğinde kabul edilebilir bir dayanıklılık elde edilebileceğini ortaya koymaktadır. Bunun en iyi örneği; %50 k-İYA; %10 ABT ve %0,75 PPF içeren karışımdır. Bu karışım, 120 gün sülfat maruziyetinden sonra nispeten düşük bir %7,0 basınç dayanımı kaybı sergilemiştir. Bu performans, yüksek İYA içeriğinin potansiyel olumsuz etkilerinin, mikro çatlak kontrolünü ve iç gerilim dağılımını iyileştiren orta düzeyde çimento ikamesi ve stratejik elyaf ilavesi ile etkili bir şekilde azaltılabileceğini göstermektedir. Buna karşılık; %25 k-İYA; %20 ABT ve PPF içermeyen benzer bir karışım; %18,5 gibi önemli ölçüde daha yüksek bir mukavemet kaybı kaydetmiş ve mekanik takviye eksikliği olan matrislerin savunmasızlığını vurgulamıştır. Bu karşılaştırma, özellikle iç gözeneklilik ve geçirgenliğin yüksek olduğu yüksek İYA sistemlerinde sülfat direncini artırmada PPF'nin kritik rolünü açıkça vurgulamaktadır. Uygun elyaf dozajı, sınırlı bağlayıcı seyreltme ile birleştirildiğinde, en çok geri dönüştürülmüş ve gözenekli sistemlerde bile matris kohezyonunu önemli ölçüde iyileştirebilir, iyon penetrasyonunu kısıtlayabilir ve genişlemeyle ilgili çatlamaı azaltabilir.

Bu bulgular, karışımli çimento sistemlerinin sülfat dayanıklılığına ilişkin daha geniş literatürle uyumludur: gözenekli geri dönüştürülmüş agregaların varlığı iyon taşıma yollarını artırır ve OPC'nin inert veya düşük reaktif bağlayıcılarla (ör. ABT) seyreltilmesi, yoğun, kimyasal olarak dirençli C-S-H oluşumunu azaltır. Aynı zamanda, liflerin etkili kullanımı çatlak büyümesine karşı mekanik bir bariyer sağlar ve uzun vadeli dirence katkıda bulunur, ancak bu, liflerin uygun şekilde dağıtılması ve dozajlanması durumunda geçerlidir. Aşırı lif, özellikle sıfır çökme SSB'de, lif toplanması, zayıf sıkıştırma ve homojenliğin azalması riski nedeniyle ters etki yapabilir.

Malzeme mühendisliği açısından bu sonuçlar, SSB'deki sülfat direncinin yalnızca ABT veya İYA gibi tek tek bileşenler tarafından değil, bağlayıcı kimyası, gözenek

yapısı, lif-matris uyumluluğu ve uygun karıştırma ve kürleme uygulamaları arasındaki sinerjik etkileşim tarafından belirlendiğini vurgulamaktadır. Yüksek ABT içeriği ( $\geq 40$ ); bağlayıcı reaktivitesini düşürerek ve kapiler gözenekliliği artırarak dayanıklılığı tutarlı bir şekilde azalttı ve matrisi sülfat girişine ve genişmesine daha duyarlı hale getirdi. Buna karşılık, orta düzeyde PPF içeriği ( $0,25-0,50$ ); çatlak kontrolünü geliştirerek ve mikro yapıyı güçlendirerek direnci artırırken, daha yüksek lif dozajları ( $\geq 0,75$ ) genellikle sıkıştırma sorunları ve iç kusurlar ortaya çıkardı. En dayanıklı karışımlar, geri dönüştürülmüş agrega seviyelerinden bağımsız olarak, kontrollü s/b oranları ( $< 0,45$ ); sınırlı ABT içeriği ( $\leq 20$ ) ve dengeli fiber takviyesini bir araya getirdi. Özellikle, karışım tasarımı dikkatlice optimize edildiğinde, doğal agregaların i-İYA ve k-İYA ile tamamen değiştirilmesinin mümkün olduğu kanıtlandı, bu da sülfata dayanıklı, sürdürülebilir SSB üretimde bütünsel malzeme stratejilerinin önemini vurguladı.

Sonuç olarak, Şekil 4.9b'deki sülfat maruziyet testi sonuçları, geri dönüştürülmüş malzemeler içeren dayanıklı, yüksek performanslı bir SSB sisteminin elde edilebilir olduğunu, ancak bunun sadece karışım oranlarının, bağlayıcı-lif sinerjisinin ve sıkıştırma kalitesinin dikkatli bir şekilde koordine edilmesi ile mümkün olduğunu vurgulamaktadır. Bu bilgiler, deniz, atık su veya sülfat bakımından zengin topraklar gibi agresif ortamlara maruz kalan altyapılarda sürdürülebilir beton teknolojilerinin pratik uygulaması için kritik öneme sahiptir.



Şekil 4.9 a) Basınç dayanımı, b) MgSO<sub>4</sub> sonrası dayanım değişimi (%)

Şekil 4.10a; %5 MgSO<sub>4</sub> çözeltisinde 120 gün boyunca sülfata maruz kalan, çeşitli oranlarda ince ve kaba inşaat ve yıkım atıkları (i-İYA ve k-İYA), atık beton tozu (ABT) ve polipropilen lifleri (PPF) içeren silindire sıkıştırılmış beton (SSB) karışımlarının ağırlık kaybını göstermektedir. Tüm karışımlar sıfır çökme kıvamında tasarlanmış olsa da, geri dönüştürülmüş agregaların değişken emilimi ve yüzey pürüzlülüğü nedeniyle, özellikle İYA bakımından zengin sistemlerde, etkili su-bağlayıcı (s/b) oranlarında önemli farklılıklar ortaya çıkmıştır. Ağırlık kaybı, matris gözenekliliği, bağlayıcı reaktivitesi ve lif-matris kohezyonuna karşı oldukça duyarlı olan sülfat kaynaklı yüzey bozulmasının doğrudan bir göstergesidir.

%0 i-İYA'da, ağırlık kaybı daha yüksek k-İYA ve ABT içeriği ile kademeli olarak artmış, referans karışımda (%0 İYA, ABT, PPF; s/b = 0,34) %1,12'den %100 k-İYA; %40 ABT ve %0,75 PPF içeren karışımda %2,87'ye kadar çıkmıştır. Bu eğilim, bağlayıcı seyreltme ve sıkıştırma azalması nedeniyle kimyasal direncin bozulduğunu yansıtmaktadır. Gözenekli geri dönüştürülmüş agregalar, yüksek ABT içeriği ile birleştiğinde sülfat dirençli C-S-H jellerinin oluşumunu sınırlarken, aşırı lif, kuru karıştırma koşullarında zayıf dağıldığı takdirde macun sürekliliğini bozabilir.

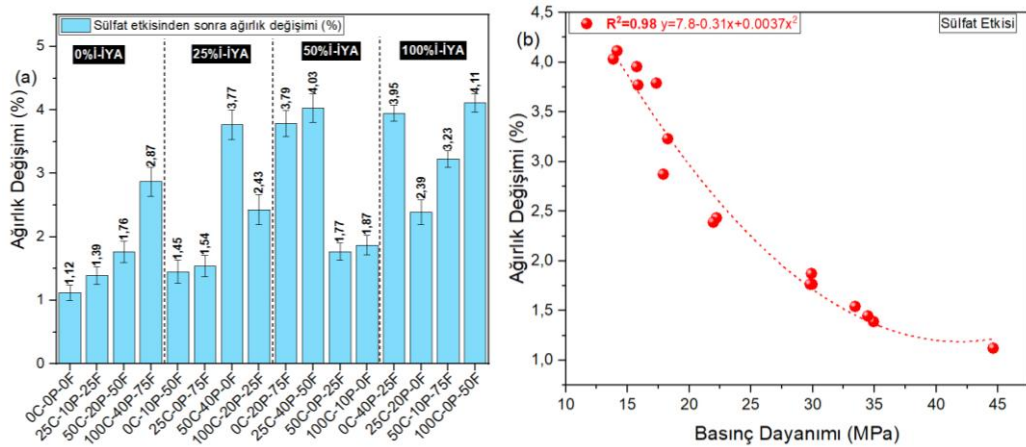
%25 i-İYA'da, ağırlık kaybı %1,45 ile %3,77 arasında değişen, orta derecede bir bozulma artışı gözlemlenmiştir. En yüksek ağırlık kaybı %50 k-İYA; %40 ABT ve PPF olmadan gözlemlenmiştir, bu da seyreltilmiş bağlayıcılar ve yüksek iç gözenekliliğe sahip takviyesiz matrislerin kırılma direncini vurgulamaktadır. En düşük ağırlık kaybı (%1,45); %10 ABT ve %0,5 PPF içeren karışımda gözlemlenmiştir ve bu, sülfat maruziyeti altında mikro çatlakları ve yüzey erozyonunu sınırlamada orta düzeyde ABT ve lif içeriğinin sinerjik rolünü doğrulamaktadır.

%50 i-İYA'da, sonuçlar %1,77 ile %4,03 arasında kilo kaybı ile en geniş varyasyonu göstermiştir. İlginç bir şekilde, yüksek s/b oranı (0,68) olmasına rağmen en düşük bozulma %50 k-İYA; %0 ABT ve %0,25 PPF ile elde edildi, bu da bağlayıcı seyreltmesinin olmaması ve optimal dozda liflerin dahil edilmesinin, yüksek oranda geri dönüştürülmüş sistemlerde bile yüzey bozulmasını azaltabileceğini göstermektedir. Aksine, en yüksek ağırlık kaybı (%4,03) %40 ABT ve %0,50 PPF

içeren karışımda meydana geldi, bu da aşırı çimento ikamesinin dayanıklılık üzerindeki olumsuz etkisini bir kez daha ortaya koydu.

% 100 i-İYA'da, ağırlık kaybı, eşit şekilde yükselen s/b oranları (0,55–0,68) ve her iki doğal agreganın tamamen ikame edilmesinden kaynaklanan kümülatif gözeneklilik nedeniyle yüksek kalmıştır (2,39–4,11%). Bununla birlikte, en düşük kayıp (%2,39) %25 k-İYA; %20 ABT ve PPF içermeyen karışımda meydana gelmiştir, bu da lif içermeyen karışımların belirli sıkıştırma koşulları altında bazen daha iyi performans gösterebileceğini göstermektedir. En yüksek kayıp (%4,11); %100 k-İYA; %0 ABT ve %0,50 PPF içeren karışımda görülmüştür. Bu durum, ABT olmasa bile, matris yoğunlaştırması sağlanamadığı takdirde, kaba agregaların tamamen değiştirilmesinin yüzey kırılgenliğine yol açabileceğini vurgulamaktadır.

Şekil 4.10b, sülfat maruziyetinden sonra basınç dayanımı ile ağırlık kaybı arasındaki ilişkiyi, ikinci derece polinom regresyonu ile modellenmiş olarak göstermektedir. Yüksek belirleme katsayısı ( $R^2 = 0,98$ ) mükemmel bir uyumu gösterir ve güçlü bir ters korelasyonu doğrular: sülfat saldırısı nedeniyle ağırlık kaybı arttıkça, basınç dayanımı keskin bir şekilde azalır. Bu sonuç, yüzey bozulmasının iç yapısal bozulmanın güvenilir bir göstergesi olduğunu pekiştirir ve sülfata maruz kalan SSB sistemlerinde uzun vadeli mekanik performansı sürdürmek için optimize edilmiş bağlayıcı bileşimi, kontrollü gözeneklilik ve etkili fiber takviyesi yoluyla ağırlık kaybını en aza indirmenin önemini vurgular.

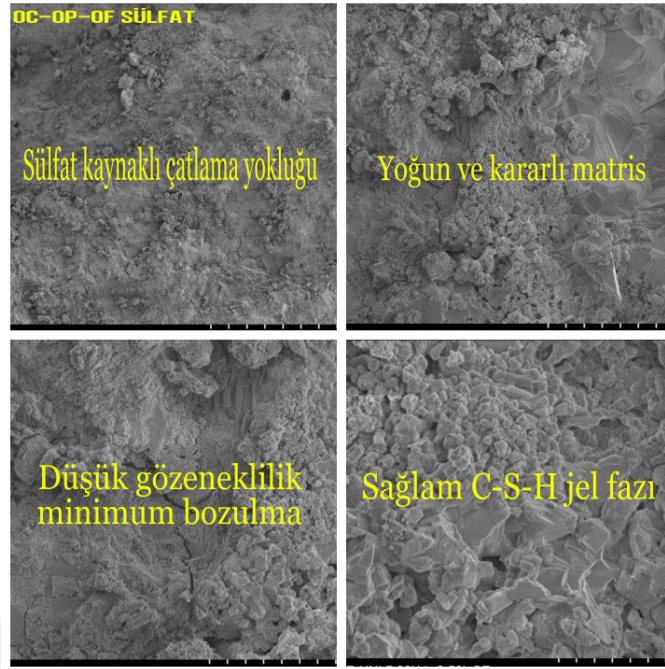


Şekil 4.10 a) MgSO<sub>4</sub> sonrası ağırlık değişimi, b) Ağırlık değişimi, dayanımı

#### 4.6.1 MgSO<sub>4</sub>'e Maruz Kalan SSB'lerin Mikro Yapısı

120 gün sülfat maruziyetinden sonra referans karışımın (0C–0P–0F) SEM görüntüleri, önemli bir bozulma belirtisi göstermeyen yoğun ve iyi korunmuş bir mikro yapı ortaya koymaktadır. Bu, bu grupta test edilen karışımlar arasında en düşük basınç dayanımı kaybı olan %8,8 ile uyumludur. Hem düşük hem de yüksek büyütme oranlarında matris homojen görünmekte ve belirgin yüzey hasarı, iç mikro çatlaklar veya genişleyen ettringit kristalleşmesi görülmemektedir. Geri dönüştürülmüş agregalar, çimento ikameleri ve fiber katkı maddelerinin bulunmaması, kompakt bir bağlayıcı matris ve sürekli C–S–H jel ağına sahip kimyasal olarak kararlı bir sisteme katkıda bulunmuştur. Yüksek büyütmede belirgin olan ince gözenek yapısı ve sıkı jel morfolojisi, sülfat iyonları için difüzyon yolu görevi görebilecek reaktif veya gözenekli bileşenlerin bulunmaması nedeniyle etkili sülfat direnci olduğunu göstermektedir.

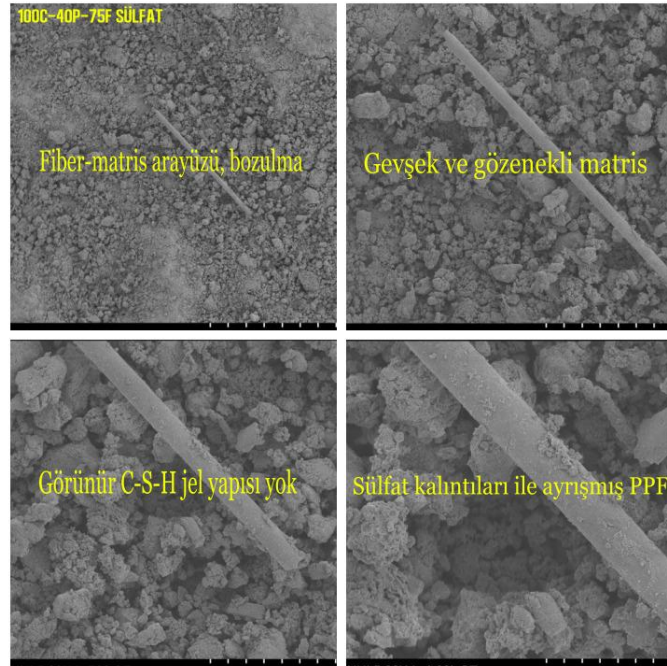
Ayrıca, mikrograflar, yüzey pürüzlülüğü minimum düzeyde ve jel sürekliliği korunmuş bir matris göstermektedir, bu da orijinal karışım tasarımının kimyasal girişine karşı dirençli olduğunu göstermektedir. Genellikle gözenekli AGB'lerden ve daha yüksek kapiler emilimden muzdarip olan İYA veya yüksek ABT içeriği içeren karışımların aksine, bu referans karışım, agresif sülfat iyonlarının nüfuzunu ve reaksiyonunu engelleyen mükemmel gözenek inceltme ve jel yoğunlaştırma özelliği sergilemektedir. Sülfat kaynaklı genişleme ve çatlamanın tipik belirteçleri olan alçıtaşı veya ettringit birikintilerinin olmaması, bu sistemin kimyasal direncini daha da teyit etmektedir. Nano ölçekte, C–S–H jel yoğun ve katmanlı görünür, parçalanma veya ayrışma belirtisi yoktur, bu da uzun süreli sülfat maruziyeti altında bile sağlam hidrasyon ürünü yapısının korunduğunu vurgular. Genel olarak, SEM analizi, geri dönüştürülmüş bileşenler veya çimento seyreltmesi içermeyen geleneksel SSB bileşiminin sadece başlangıçtaki mekanik performansı en üst düzeye çıkarmakla kalmayıp, kimyasal olarak agresif ortamlarda uzun vadeli dayanıklılık sağladığını da doğrulayarak, sülfata eğilimli altyapı uygulamaları için uygunluğunu onaylamaktadır.



Şekil 4.11 MgSO<sub>4</sub> sonrası (0C-0P-0F) SEM görüntüleri

120 gün sülfat maruziyetinden sonra 100C-40P-75F karışımının SEM görüntüleri, %23,9'luk önemli bir basınç dayanımı kaybıyla uyumlu olarak bozulmuş ve gözenekli bir mikro yapı ortaya koymaktadır. Hem düşük hem de yüksek büyütmelelerde, polipropilen lifleri görünür olmakla birlikte çimento matrisine zayıf bir şekilde entegre olmuşlardır ve ayrılma ve zayıf yapışma belirtileri göstermektedirler. Bu durum, sülfat kaynaklı gerilim altında mikro çatlak yayılmasını kontrol etme etkinliğini sınırlamıştır. Çevreleyen bağlayıcı gevşek ve parçalanmış görünmekte ve daha dayanıklı karışımlarda gözlenen yoğun C-S-H jel morfolojisinden yoksundur. %100 kaba İYA kullanımı, yüksek başlangıç gözenekliliğine ve zayıf ara yüzey geçiş bölgelerine (AGB) katkıda bulunurken, yüksek ABT içeriği (%40) reaktif bağlayıcı fazını seyreltmış, jel oluşum kapasitesini azaltmış ve kimyasal saldırıya karşı savunmasızlığı artırmıştır. Ayrıca, sıfır çökme koşullarında aşırı lif dozajı (%0,75) muhtemelen zayıf sıkıştırma, lif topaklanması ve hapsolmuş hava oluşumuna neden olmuş ve bu da sülfat girişine yol açan iç yollar oluşturmuştur. Daha yüksek büyütmelelerde, mikrograflar lif yüzeylerinin parçalanmış parçacıklar ve ettringit ve alçıtaşı gibi potansiyel sülfatla ilgili yan ürünlerle kısmen kaplı olduğunu göstermektedir, bu da lif-matris arayüzü çevresinde kimyasal bozulma ve sızıntı olduğunu düşündürmektedir. Bu bozulma ürünleri gevşek bir şekilde yapışmış görünmektedir, bu da zayıf kimyasal bağlanma ve ilerleyen matris ayrışmasını göstermektedir. Sürekli bir hidrasyon ürünü ağının

olmaması ve kırık veya hidrasyonlanmamış parçacıkların varlığı, bağlayıcı kohezyonunun azaldığını ve dayanıklılığın azaldığını daha da doğrulamaktadır. Matrisin gözenekli, süreksiz yapısı, lif sınırında lokalize ayrılma ile birleştiğinde, uzun süreli sülfat maruziyeti altında yapısal bütünlüğün bozulduğunu vurgulamaktadır. Liflerin mikro çatlakları etkili bir şekilde köprülendiği ve jel ağını güçlendirdiği daha optimize edilmiş karışımların aksine, bu karışımındaki zayıf dağılmış ve yetersiz bağlanmış PPF, amaçlanan dayanıklılık avantajını sağlayamamıştır. Çimentonun düşük reaktif ABT ile aşırı derecede değiştirilmesi, sülfata dirençli hidratların oluşumunu da sınırlamış ve bu da yüksek geçirgenliğe ve kimyasal olarak kararsız bir matrise neden olmuştur. Bu bulgular, geri dönüştürülmüş içerik, çimento ikame seviyesi ve lif dozajının dikkatli bir şekilde optimize edilmediği takdirde, SSB’de bu tür sürdürülebilir bileşenlerin kullanımının uzun vadeli kimyasal direnci tehlikeye atabileceğini vurgulamaktadır. Bu nedenle, SEM analizi, bu karışım konfigürasyonunun, malzemenin mikro yapısını ve dayanıklılığını toplu olarak zayıflatan fiziksel (gözeneklilik, sıkıştırma kusurları), kimyasal (bağlayıcı seyreltme, sülfat saldırısı) ve mekanik (lif ayrılması) faktörleri içeren bir bileşik bozulma mekanizmasından muzdarip olduğunu açıkça göstermektedir.



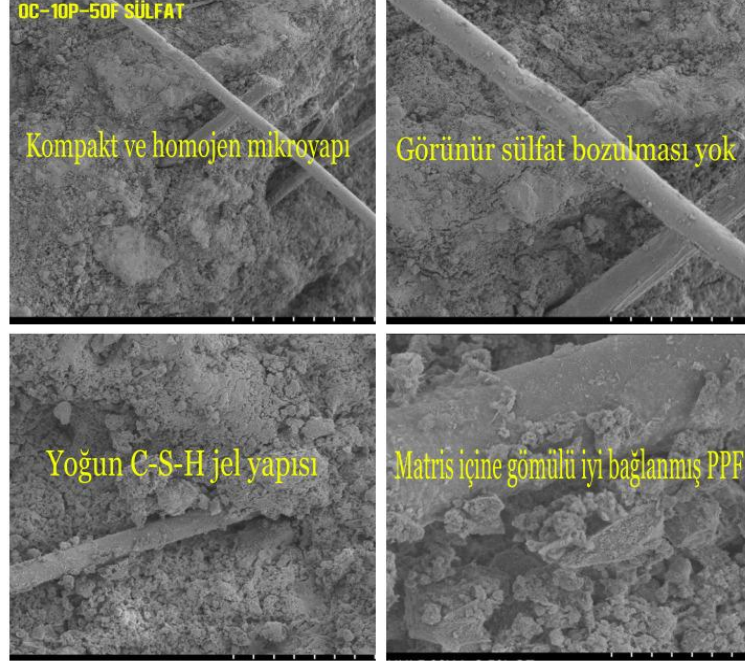
Şekil 4.12 MgSO<sub>4</sub> sonrası (100C-40P-75F) SEM görüntüleri

120 gün boyunca sülfat maruziyetine tabi tutulmuş 0C–10P–50F karışımının SEM mikrografları, sadece %1,6 gibi oldukça düşük bir basınç dayanımı kaybıyla ilişkili, son derece kompakt ve kimyasal olarak dayanıklı bir mikro yapı ortaya koymaktadır. Polipropilen lifleri matris içinde eşit olarak dağılmış ve sıkıca gömülüdür, ara yüzeyde ayrışma, lif çıkması veya çatlama belirtisi göstermez, bu da güçlü mekanik bağlanma ve sülfat kaynaklı minimum genleşme olduğunu gösterir. Orta düzeyde ABT ikame oranı (%10), bağlayıcı reaktivitesini bozmadan dolgu etkisiyle gözenek inceltmeyi etkili bir şekilde artırmış gibi görünür ve yoğun ve kararlı bir C–S–H jel ağının gelişmesini destekler. Ek olarak; %25 ince İYA kullanımı, yüksek gözeneklilik yaratmadan veya ara yüzey bölgelerini zayıflatmadan yeterli paketleme yoğunluğu sağlamıştır. Yüksek büyütme görüntüleri, ettringit iğneleri veya alçıtaşı kümeleri gibi sülfat saldırısı göstergelerinin olmadığını doğrulamakta ve bunun yerine, jel sürekliliği bozulmamış, yapışkan bir matris göstermektedir.

Bu özellikler, optimize edilmiş bir karışım tasarımıyla sülfat girişinin başarılı bir şekilde azaltıldığını yansıtmaktadır. Bu tasarımda, orta düzeyde lif içeriği, düşük ABT dozu ve ince geri dönüştürülmüş agrega kullanımı arasındaki sinerji, agresif kimyasal maruziyet altında mükemmel dayanıklılık ve yapısal kohezyon sağlamıştır. Ayrıca, lif-matris arayüzü yüksek çözünürlükte bile bozulmadan kalmıştır, bu da uygulanan sıkıştırma ve karıştırma prosedürlerinin lifleri homojen bir şekilde dağıtmak ve boşluk oluşumunu önlemek için yeterli olduğunu göstermektedir. Yoğun hidrasyon ürünleri içindeki PPF'lerin düzgün entegrasyonu, etkili çatlak köprüleme potansiyelini göstermektedir ve bu da mikro çatlak yayılmasının kontrol edilmesine ve sülfat yollarının sınırlandırılmasına katkıda bulunmuştur.

Mikro yapısal bozulma veya kireç çözünmesinin olmaması, hidrasyon ürünlerinin uzun süreli sülfat daldırma sonrasında bile stabil ve kimyasal olarak dirençli olduğunu doğrulamaktadır. Daha yüksek ABT içeriğine sahip diğer karışımlar veya kaba İYA ikamesi ile karşılaştırıldığında, bu bileşim yüksek iç gözenekliliği önleyerek, tutarlı hidrasyon sağlayarak ve lokalize sülfat kaynaklı genleşmeyi önleyerek üstün bir mikro yapı korumuştur.

Genel olarak, SEM analizi, matris bütünlüğünü korumak ve sülfat açısından zengin koşullarda olağanüstü kimyasal dayanıklılık sağlamak için dikkatlice dengelenmiş bir tasarımın (düşük çimento ikamesi, kısmi ince İYA dahil edilmesi ve optimize edilmiş lif içeriği) etkinliğini vurgulamaktadır.



Şekil 4.13 MgSO<sub>4</sub> sonrası (0C-10P-50F) SEM görüntüleri

#### 4.7 Islama Kurumada 60 Döngü NaCl Etkisi

Şekil 4.14a; 90 günlük ilk su kütleme döneminin ardından %5 NaCl çözeltisinde 60 ıslatma-kurutma döngüsünden sonra çeşitli silindirle sıkıştırılmış beton (SSB) karışımlarının basınç dayanımındaki bozulmayı göstermektedir. Her döngü, 1 günlük daldırma ve ardından 40°C’de 1 günlük fırın kurutmasını içermekte olup, matris içinde tekrarlı ozmotik basınç dalgalanmaları, iyonik difüzyon ve mikro çatlak maruz kalma ortamlarını simüle etmek için tasarlanmıştır. Bu ortamlar, matris içinde tekrarlanan ozmotik basınç dalgalanmaları, iyonik difüzyon ve mikro çatlak oluşumuna neden olur. Karışımlar, ince (i-İYA) ve kaba (k-İYA) inşaat ve yıkım atıkları, atık beton tozu (ABT) ve polipropilen lifleri (PPF) oranları bakımından farklılık göstermektedir. Bunların tümü, gözenek yapısı, bağlayıcı reaktivitesi ve çatlak kontrol mekanizmalarını toplu olarak etkilemektedir. Tüm karışımlar sıfır çökme kıvamı için tasarlanmış olsa da, İYA agregalarının yüksek emiciliği ve yüzey pürüzlülüğü çatlak

kontrol mekanizmalarını etkiledi. Tüm karışımlar sıfır çökme kıvamında tasarlanmış olsa da, İYA agregalarının yüksek emiciliği ve yüzey pürüzlülüğü nedeniyle karışımlar arasında etkili iç s/b oranları önemli ölçüde farklılık gösterdiği, düşük İYA karışımlarında 0,34'ten tamamen geri dönüştürülmüş sistemlerde 0,68'in üzerine kadar değişti.

Şekil 4.14b, ıslanma-kuruma döngülerinden sonra %0 i-İYA'da, basınç dayanımı kaybı daha yüksek k-İYA ve ABT içeriği ile birlikte istikrarlı bir şekilde artarak %11,78 ile %26,47 arasında değişmiştir. En büyük bozulma, %100 k-İYA; %40 ABT ve %0,75 PPF içeren karışımda kaydedilmiş ve bu da bağlayıcı seyreltme ve aşırı lif içeriğinin birleşik olumsuz etkilerini vurgulamaktadır. Yüksek ABT içeriği, kalsiyum silikat hidrat (C-S-H) miktarını azaltarak hidrasyon matrisini zayıflatmış olabilir, yüksek PPF dozu ise çatlak kontrolü için teorik faydasına rağmen lif aglomerasyonu, eksik sıkıştırma ve kurutma döngüleri sırasında hasar yayılmasını hızlandıran gerilme yoğunlaşma noktalarına yol açmış olabilir.

Buna karşılık, %25 i-İYA'da mukavemet kayıpları daha geniş bir dağılım gösterdiği (%6,49–24,48); ancak en düşük kayıp %25 k-İYA; %0 ABT ve %0,75 PPF içeren karışımda gözlemlenmiştir. Bu da sınırlı geri dönüştürülmüş agrega kullanımı ile lif takviyesi arasındaki mikro yapısal bütünlüğün korunmasında yararlı etkileşimi göstermektedir. Burada, geri dönüştürülmüş ince parçacıklar dolgu etkisiyle matris yoğunlaşmasını artırmış olabilir ve iyi dağılmış PPF, gerilimin yeniden dağılımına ve çatlakların durdurulmasına katkıda bulunmuştur. Ancak, en yüksek bozulma (%24,48) yine yüksek ABT, elyaf içermeyen karışımda meydana gelmiştir, bu da özellikle yüksek geçirgen ortamlarda puzolanik veya düşük reaktiflikli bağlayıcılar kullanıldığında elyafların dahil edilmesinin gerekliliğini teyit etmektedir.

%50 i-İYA'da, en düşük mukavemet kaybının (%5,67) %100 k-İYA; %10 ABT ve PPF içermeyen karışımda meydana geldiği şaşırtıcı bir eğilim ortaya çıktı, ancak bu karışım en yüksek s/b oranlarından birine (~0,69) sahipti. Bu, belirli koşullar altında, iyi derecelendirilmiş agrega iskeletinin tamamen geri dönüştürülmüş olmasına rağmen özellikle aşırı lif içeriği ve bağlayıcı seyreltmesi önleminde, bozulmaya direnmek için yeterli sıkıştırma ve süreklilik sağlayabileceğini göstermektedir. Tersine; %0 k-

İYA; %20 ABT ve %0,75 PPF içeren karışım en yüksek mukavemet kaybını (%36,80) göstermiştir; bu durum muhtemelen yüksek bağlayıcı gözenekliliği, zayıf lif dağılımı ve artan klorür geçirgenliğinden kaynaklanmaktadır.

% 100 i-İYA'da performans genel olarak beklenenden daha iyiydi. Mukavemet kaybı %3,04 ile %16,70 arasında değişmiştir ve en dayanıklı karışım %100 k-İYA; %0 ABT ve %0,50 PPF içeren karışım olmuştur. Bu, bağlayıcı sistemin reaktif kalması ve lif içeriğinin optimize edilmesi koşuluyla, doğal agregaların tamamen değiştirilmesinin bile tuz kaynaklı bozulmaya karşı mükemmel direnç sağlayabileceğini doğrulamaktadır. İYA'nın gözenekli yapısı, iç nem tamponlamasına yardımcı olmuş ve kurutma nedeniyle oluşan büzülme gerilmelerini azaltmış olabilir. Orta düzeyde PPF içeriği, mikro çatlakları etkili bir şekilde köprüleyerek iyon taşıma yollarını kontrol etmiş, klorür girişini ve genişlemeyle ilgili çatlakları azaltmıştır.

Bu sonuçlar, SSB'deki sülfat veya klorür direncinin yalnızca geri dönüştürülmüş agrega içeriği tarafından belirlenmediğini, bunun yerine karışım parametrelerinin karmaşık etkileşimi tarafından yönetildiğini açıkça göstermektedir.

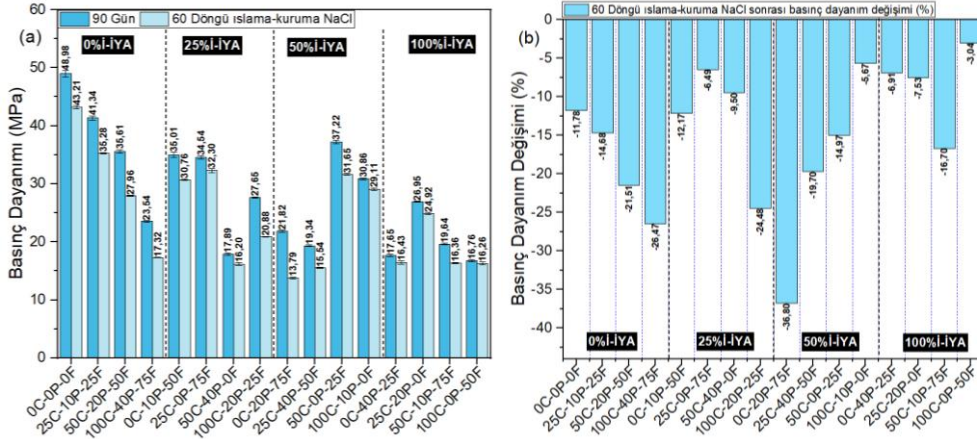
Yüksek ABT içeriği ( $\geq$ %40); özellikle fiber takviyesi olmadan, zayıf bağlayıcı jel oluşumu ve iyonik girişi ve tuz kristalleşmesini kolaylaştıran artan kapiler gözeneklilik nedeniyle tutarlı bir şekilde daha fazla mukavemet kaybına neden olmuştur.

Orta düzeyde PPF içeriği (%0,25–0,50); mikro çatlakları kontrol ederek ve sünekliği artırarak dayanıklılığı iyileştirmede en etkili olduğu kanıtlanırken, aşırı miktarlar ( $\geq$ %0,75) genellikle işlenebilirlik sorunlarına ve özellikle sert, düşük çökme matrislerinde lokalize kusurlara yol açmıştır.

Kontrollü s/b oranları ( $<$ 0,45); iç gözenekliliği azalttığı ve nem göçünü kısıtladığı için üstün dayanıklılıkla ilişkilendirildi, böylece kurutma sırasında genişleme ve bozulmayı sınırladı.

Özellikle, tam İYA ikamesi (i-İYA + k-İYA %100) doğası gereği zararlı değildi. Minimum ABT içeriği ve dengeli lif ilavesi ile bu karışımlar, geleneksel betonlara

kıyasla benzer veya hatta daha üstün dayanıklılık gösterdi, bu da İYA'nın zorlu maruz kalma koşullarında sürdürülebilir bir agrega olarak kullanılabilirliğini vurguladı.



Şekil 4.14 a) Basınç dayanımı, b) NaCl sonrası dayanım değişimi (%)

Şekil 4.15a, 90 günlük su kürlenme işleminden sonra %5 NaCl çözeltisinde 60 ıslatma-kurutma döngüsüne maruz kalan silindire sıkıştırılmış beton (SSB) karışımlarının ağırlık kaybı davranışını göstermektedir. Döngüsel maruz kalma, deniz veya buz çözme ortamlarını simüle eder; burada tekrarlanan daldırma ve kurutma (1 gün çözelti içinde, ardından 40°C'de 1 gün fırında kurutma) yüzey pul pul dökülmesini, tuz kristalleşmesini ve gözenek bozulmasını hızlandırır. Tüm karışımlarda yaygın olarak kullanılan sıfır çökme tasarımına rağmen, geri dönüştürülmüş agregaların farklı emme kapasiteleri ve yüzey pürüzlülüğü nedeniyle, özellikle daha yüksek İYA içeriklerinde, etkili su-bağlayıcı (s/b) oranlarında önemli farklılıklar meydana gelmiştir. Bu farklılıklar, bağlayıcı ikamesi (ABT) ve lif içeriği (PPF) ile birleştiğinde, matrisin yüzey bozulmasına karşı hassasiyetini belirlemiştir.

%0 i-İYA'da, ağırlık kaybı k-İYA ve ABT içeriğinin artmasıyla kademeli olarak artarak %0,89 (referans) ile %2,87 arasında değişmiştir. %100 k-İYA; 40% ABT ve %0,75 PPF içeren karışım, yüksek s/b oranı (0,41); yüksek bağlayıcı seyreltme ve düşük işlenebilirlik koşulları altında potansiyel lif aglomerasyonu kombinasyonu nedeniyle en yüksek bozulma gösterdi. Kademeli kayıp eğilimi, geri dönüştürülmüş agregalardan kaynaklanan gözeneklilik artışı, yüksek ABT ile bağlayıcı reaktivitesinin kaybı ve aşırı PPF nedeniyle bozulmuş sıkıştırmanın kümülatif etkisini

yansıtmaktadır. Bunların tümü, kurutma sırasında yüzeysel hasarı ve tuz tutulmasını teşvik etmiştir.

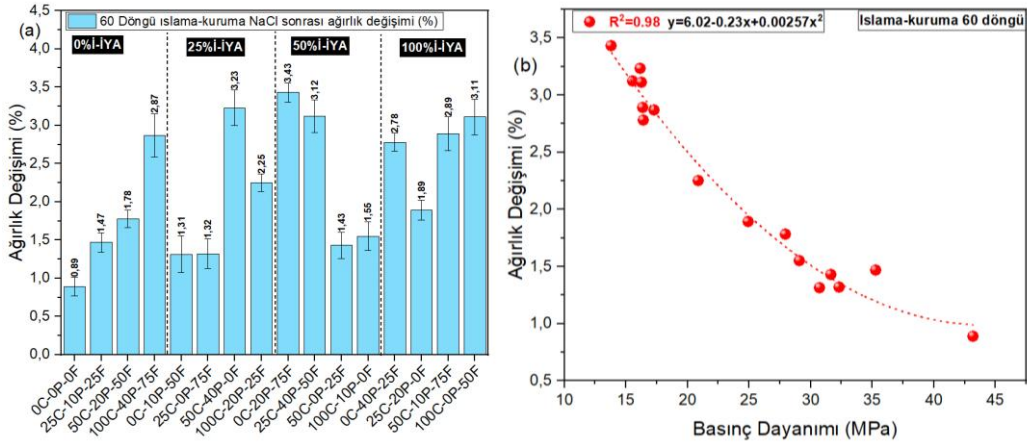
%25 i-İYA'da eğilim daha çeşitli hale gelmektedir. En düşük ağırlık kayıpları (%1,31–1,32) %0–25 k-İYA içeren karışımlarda gözlemlenmiştir, bu da ılımlı geri dönüştürülmüş ince içeriklerin dolgu etkisiyle matris yoğunlaşmasına katkıda bulunabileceğini göstermektedir. Ancak, lifler kullanılmadan %50 k-İYA ve %40 ABT kullanıldığında %3,23'e önemli bir artış meydana gelmiştir, bu da takviyenin olmaması ve yüksek bağlayıcı ikamesinin döngüsel tuz maruziyeti altında bozulmayı artırdığını doğrulamaktadır. Tersine, %100 k-İYA; %20 ABT ve %0,25 PPF içeren karışımda nispeten ılımlı bir kayıp (%2,25) gözlemlenmiştir, bu da minimum lif ilavesinin, geri dönüştürülmüş agrega seviyeleri yüksek olsa bile yüzey çatlamasını ve tuz girişini sınırlamaya yardımcı olduğunu göstermektedir.

%50 i-İYA'da ilginç bir tersine dönüş görülmektedir: en düşük ağırlık kayıpları (%1,43 ve %1,55); yüksek s/b oranlarına (0,68–0,69) rağmen; %50 ve %100 k-İYA, ABT içermeyen ve  $\leq$ 50,25 PPF içeren karışımlarda görülmüştür. Bu sonuçlar, çimento içeriği korunurken ve lif dozajı orta düzeyde olduğunda, yüksek İYA içeriğinin İYA gözenekliliğinden kaynaklanan iyileştirilmiş sıkıştırma ve iç su tamponlaması ile dengelenebileceğini göstermektedir. Buna karşılık, %20–40 ABT ve %0,50–0,75 PPF içeren karışımlar en yüksek bozulma oranını göstermiştir (%3,43 ve %3,12), bu da sıfır çökme koşullarında yüksek lif içeriği ile birleşen bağlayıcı seyreltmesinin heterojen sıkıştırma ve yüzey hassasiyetine yol açtığını doğrulamaktadır.

%100 i-İYA'da ağırlık kaybı %1,89 ile %3,11 arasında değişmiş ve tutarlı bir doğrusal model göstermemiştir. En düşük kayıp (%1,89) %25 k-İYA; %20 ABT ve lif içermeyen karışımda meydana gelmiştir, bu da yüzey stabilitesi için bağlayıcı içeriği ve agrega derecelendirmesinin optimal dengesini yansıtır olabilir. Bununla birlikte, ABT içermeyen ve yüksek lifli (%3,11) veya düşük lifli ve yüksek ABT'li (%2,89) karışımlar belirgin bir bozulma yaşadı, bu da lif aşırı dozajı veya bağlayıcı yetersiz performansının tek başına tam İYA ikamesi ile birleştiğinde yüzey erozyonunu hızlandırabileceğini göstermektedir. Veriler, yüksek İYA içeriğinde yüzey

bütünlüğünün, özellikle s/b oranı ve takviye stratejisi gibi karışım tasarımındaki küçük değişikliklere karşı oldukça duyarlı olduğunu göstermektedir.

Şekil 4.15b; 60 ıslatma-kurutma döngüsünden sonra SSB karışımlarının basınç dayanımı ile yüzey ağırlık kaybı arasında güçlü bir negatif korelasyon ( $R^2 = 0,98$ ) olduğunu göstermektedir. Tuz kaynaklı yüzey bozulması nedeniyle ağırlık kaybı arttıkça, basınç dayanımı da tutarlı bir şekilde azalmaktadır. Yüksek  $R^2$  değeri, yüzey bozulmasının dayanım kaybının güvenilir bir öngörücüsü olduğunu göstermekte ve döngüsel klorür maruziyeti altında kütle kaybının dayanıklılık göstergesi olarak etkinliğini doğrulamaktadır. Bu ilişki, zorlu ortamlarda mikro yapısal zayıflama ve yüzey hasarını sınırlamak için karışım tasarımının optimize edilmesinin önemini vurgulamaktadır.



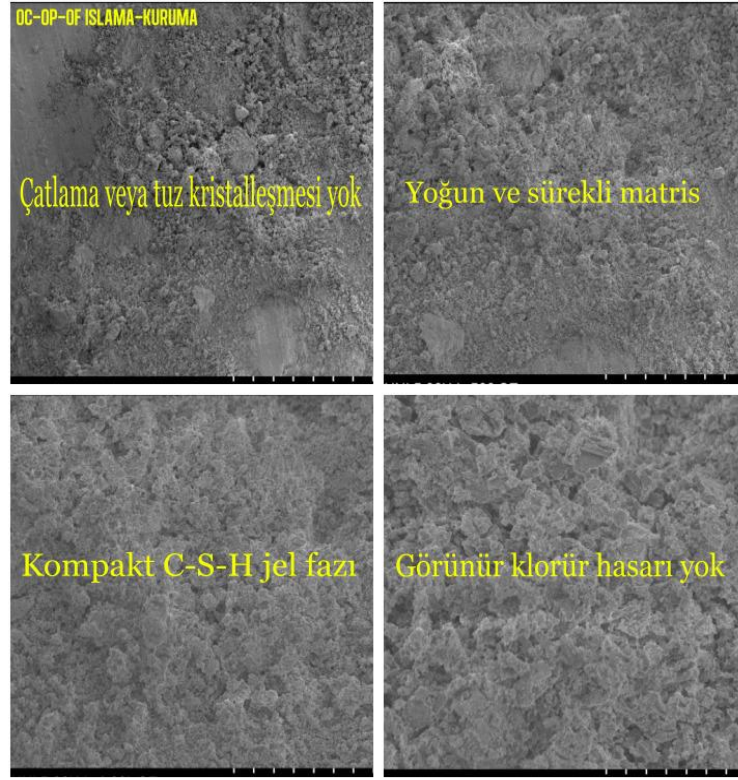
Şekil 4.15 a) NaCl sonrası ağırlık değişimi, b) Basınç dayanımı-ağırlık kaybı

#### 4.7.1 Islama Kurumada NaCl Etkisinin SSB'de Mikro Yapısı

Referans SSB karışımının (0C-0P-0F) %5 NaCl çözeltisinde 60 döngü ıslatma-kurutma işleminden sonra elde edilen SEM görüntüleri, kararlı, kompakt ve iyi korunmuş bir mikro yapı ortaya koymaktadır. Bu gruptaki en düşük basınç dayanımı kaybı olan %11,78 ile uyumludur. Tüm büyütme oranlarında, bağlayıcı matris tekdüze kalmakta ve tuz kaynaklı çatlama, yüzey soyulması veya çökelti oluşumu belirtisi görülmemektedir. Geri dönüştürülmüş veya ek malzemelerin kullanılmaması, yoğun ve kimyasal olarak dayanıklı bir sistem oluşturarak klorür girişini ve ozmotik stresi en aza indirmiştir. Daha yüksek büyütme oranlarında, C-S-H jeli ince yapılı ve sıkı bir

şekilde paketlenmiş görünmekte olup, görünür mikro çatlaklar veya gözeneklilik artışı görülmektedir. Bu da hidrasyon ürünlerinin kimyasal olarak bozulmadan ve mekanik olarak kohezyonlu kaldığını doğrulamaktadır. Bu sonuçlar, sadece doğal agregalar ve Portland çimentosundan oluşan geleneksel SSB karışımlarının, optimum matris yoğunluğu ve hidrasyon sağlandığında, zorlu deniz veya buz çözme koşullarında dayanıklılığını koruyabildiğini göstermektedir. SEM analizi, referans karışımın klorür kaynaklı bozulmaya karşı sağlam bir direnç gösterdiğini doğrulamakta ve geri dönüştürülmüş veya modifiye edilmiş SSB alternatiflerini değerlendirmek için değerli bir kriter sunmaktadır.

Ayrıca, matris Friedel tuzu oluşumu veya halojenür içeren fazların kristalleşmesi gibi matris, daha gözenekli veya bağlayıcı eksikliği olan sistemlerde sıklıkla gözlenen Friedel tuzu oluşumu veya halojenür içeren fazların kristalleşmesi gibi klorür kaynaklı faz değişikliği belirtisi göstermemektedir. Mikro yapı, agrega parçacıkları arasındaki boşluğu sıkıca dolduran ve güçlü bir kohezyon sergileyen jel ürünleri ile orijinal morfolojisini korumaktadır. Çekme mikro çatlakları, ara yüzey ayrılması veya jel parçalanmasının olmaması, iç iyon hareketlerinin sınırlı olduğunu ve gözenek ağının zararlı tuz kristalleşme döngülerine izin vermeyecek kadar rafine olduğunu göstermektedir. Farklı görüş alanlarında gözlemlenen homojenlik, numune hacmi boyunca tutarlı sıkıştırma kalitesi ve hidrasyon kinetiği olduğunu ima etmektedir. Bu tutarlılık, aksi takdirde alternatif ıslanma-kuruma stresleri altında ilerleyen bozulmanın alternatif ıslanma-kuruma stresleri altında ilerleyen bozulmanın başlangıç noktaları olabilecek yerel zayıflıkları azaltmada çok önemlidir. Bulgular, modifiye edilmemiş Portland çimentosu ve doğal agregalara dayalı karışım tasarımlarının, uygun oranlarda ve sıkıştırıldığında, klorür yüklü ortamlarda yüksek derecede dayanıklılık sağlayabildiğini ve bu nedenle, agresif buz çözme veya kıyı koşullarına uzun süre maruz kalınmasının beklendiği yapısal uygulamalar için uygun olduğunu doğrulamaktadır.



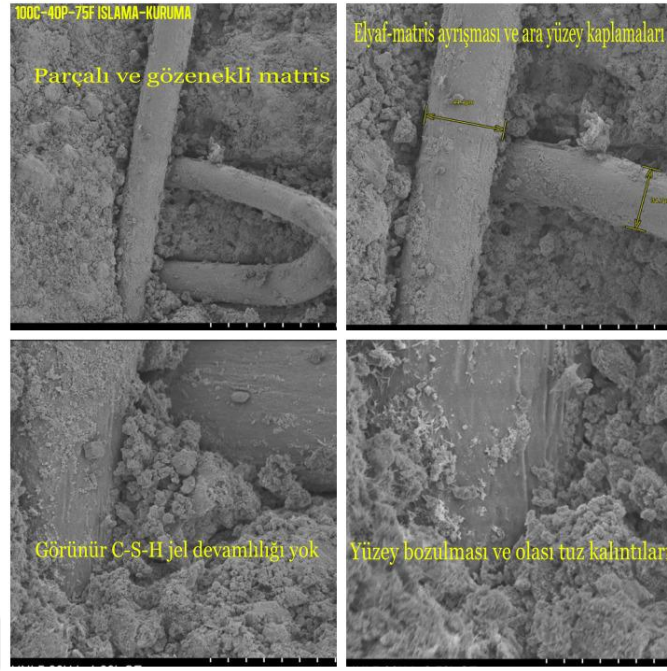
Şekil 4.16 Islama-Kuruma sonrası (0C–0P–0F) SEM görüntüleri

%5 NaCl çözeltisinde 60 ıslatma-kurutma döngüsünden sonra 100C–40P–75F karışımının SEM mikrografları; %0 i-İYA grubunda kaydedilen en yüksek basınç dayanımı kaybı olan %26,47 ile tutarlı olarak, ciddi şekilde bozulmuş bir mikro yapı ortaya koymaktadır. Polipropilen lifler yönsüz, yetersiz bağlanmış ve gözle görülür şekilde gözenekli ve bağlantısız bağlayıcı ile çevrili görünmektedir, bu da lif entegrasyonunun zayıf olduğunu ve çatlak kontrolünün etkisiz olduğunu göstermektedir. %100 kaba geri dönüştürülmüş agrega (k-İYA) kullanımı, zayıf ara yüzey bölgelerine ve gözenek bağlantısının artmasına katkıda bulunurken, yüksek ABT içeriği (%40) bağlayıcı reaktivitesini seyreltmış ve dayanıklı C–S–H jellerinin oluşumunu sınırlamıştır. Bu faktörler topluca matrisi zayıflattı ve klorür giriş yollarını artırdı. Yüksek çözünürlüklü görüntüleme, ara yüzey çatlama, elyaf çekilmesi ve lokalize yüzey bozulması belirtileri göstermektedir. Bu durum, kurutma aşamalarında kristalleşme basınçları ve klorür birikimi nedeniyle muhtemelen daha da kötüleşmiştir. Matris, daha dayanıklı karışımlarda görülen jel sürekliliğinden yoksundur ve gevşek bağlı kalıntılar, ileri düzeyde kimyasal bozulmaya işaret etmektedir. Genel olarak, SEM analizi, yüksek geri dönüştürülmüş içerik, aşırı bağlayıcı seyreltme ve lif aşırı

dozajının, döngüsel klorür maruziyetine karşı minimum direnç gösteren, yüksek gözenekli, kimyasal olarak hassas bir yapıya yol açtığını doğrulamaktadır.

Ayrıca, SEM görüntüleri, iç gözenek ağının derin klorür penetrasyonunu kolaylaştırdığını ve bunun da sızıntı ve tuz kristalleşme stresleri yoluyla kimyasal bozulmayı teşvik ettiğini göstermektedir. PPF'lerin çevresinde kompakt bir hidrasyon ürünü tabakasının bulunmaması, lif-matris geçiş bölgesinin yüksek geçirgenliğe sahip ve mekanik olarak zayıf olduğunu ve tekrarlanan ıslanma ve kuruma sırasında mikro çatlakların yayılmasını engelleyemediğini göstermektedir. Bağlayıcı matrisinde gözlemlenen boşluklar ve parçalanmış bölgeler, zayıf lif dağılımı ve aşırı ABT kullanımının genel matris kohezyonu üzerindeki olumsuz etkisini daha da açıkça göstermektedir. Liflerin kendileri, kimyasal etkileşimi ve mikro yapısal düzeyde ilerleyen bozulmayı gösteren yüzey erozyonu ve muhtemelen klorür açısından zengin ince parçacıkların yapışmasını göstermektedir. Bu bulgular, fiziksel parçalanma, kimyasal saldırı ve zayıf arayüz mühendisliğinin neden olduğu sinerjik arıza mekanizmalarını vurgulamaktadır.

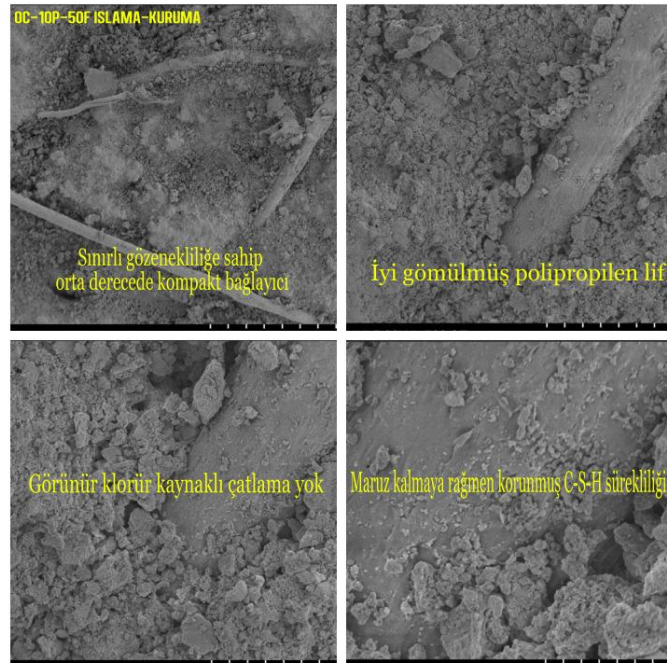
Optimize edilmiş bağlayıcı-dolgu maddesi oranları ve lif içeriği sayesinde gözenek inceltme ve kimyasal direnç sağlayan daha iyi performans gösteren karışımların aksine, 100C-40P-75F bileşimi kümülatif eksikliklerden muzdariptir. Zayıf mikro yapısal çerçeve, klorür girişine direnememekle kalmaz, aynı zamanda kurutma kaynaklı büzülme ve tuz kristalleşme döngüleri sırasında bütünlüğü korumak için gerekli mekanik sağlamlıktan da yoksundur. Bu SEM değerlendirmesi, özellikle agresif ortamlara döngüsel maruz kalma durumunda, sıkıştırma ve hidrasyon sürekliliğinin bozulmasını önlemek için geri dönüştürülmüş agrega oranlarının kontrol edilmesi, ABT ikamesinin orta düzeyde sınırlandırılması ve lif içeriğinin optimize edilmesinin gerekliliğini vurgulamaktadır.



Şekil 4.17 Islama-Kuruma sonrası (100C-40P-75F) SEM görüntüleri

%5 NaCl çözeltisinde 60 ıslatma-kurutma döngüsünden sonra 0C-10P-50F karışımının SEM mikrografları, nispeten kompakt ve kimyasal olarak kararlı bir mikro yapıya sahip olduğunu ortaya koymaktadır. Bu; %12,17'lik düşük basınç dayanımı kaybıyla da yansıtılmaktadır. Lifler homojen bir şekilde dağılmış ve matris içinde iyi bir şekilde bağlanmış durumda olup, ara yüzey ayrılması veya çekilme belirtisi görülmemektedir. Bu durum, etkili gerilme transferi ve çatlak köprüleme potansiyelini göstermektedir. %10 ABT ve %25 ince İYA ilavesi, dolgu etkisi ve gelişmiş paketleme yoluyla matris yoğunlaşmasını iyileştirmiş, klorür girişi ve iç hasarı en aza indirmiştir. Bağlayıcıda küçük yüzey pürüzlülüğü ve granüler özellikler olmasına rağmen, matris büyük ölçüde sürekliliğini korur ve yaygın bozulma, ettringit oluşumu veya tuz çökmesi belirtisi göstermez. Orta düzeyde PPF dozu (%0,5) takviye ve işlenebilirlik arasında bir denge sağlar ve daha yüksek dozlu karışımlarda görülen lif kümelenmesi ve gözeneklilik sorunlarını önler. Genel olarak, SEM analizi, bu karışım tasarımının, tekrarlanan klorür maruziyet döngülerine dayanabilen dayanıklı ve esnek bir mikro yapı sağladığını doğrulamakta ve geri dönüştürülmüş bileşenler kullanılarak sürdürülebilir ve dayanıklı SSB üretimi için umut verici bir yaklaşım sunmaktadır. Ayrıca, yüksek büyütme görüntülerinde, lif-matris ara yüzünün bozulmamış olduğu ve hidrasyon ürünlerinin liflerin etrafında birleşik bir geçiş bölgesi oluşturduğu görülmektedir. Bu, agresif çevresel döngüler altında lif matris ara yüzünün sadece

mekanik uyumluluğunu değil, aynı zamanda kimyasal direncini de göstermektedir. Matriste görünür büzülme çatlakları veya tuz kristalleşmesi hasarı görülmemektedir, bu da alternatif doygunluk ve kuruma sırasında boyutsal ve yapısal stabiliteyi koruma yeteneğini vurgulamaktadır. %25 ince İYA kullanımı, AGB performansını korurken paketlenme yoğunluğunu artırmada özellikle etkili görünmektedir ve kaba İYA ile tipik olarak ilişkili mikro yapısal zayıflıkları önlemektedir. Nispeten düşük ABT dozu, bağlayıcı reaktivitesini önemli ölçüde bozmadan mütevazı bir dolgu katkısı sağlar ve yeterli jel oluşumu ve uzun vadeli mukavemet gelişimi sağlar. Ek olarak, incelenen alanlarda kopuk gözenekler veya kırık bölgeler bulunmaması, karışımın hazırlık sırasında yeterli sıkıştırma ve homojenlik elde ettiğini göstermektedir. Bu, klorür maruziyeti sırasında iyon difüzyonunu ve nem göçünü sınırlamak için gereklidir. Bu homojenlik, kuruma büzülmesi sırasında gerilimin eşit dağılımına da katkıda bulunarak çatlak oluşumu ve yayılma olasılığını azaltır. Toplamda, bu gözlemler, ince geri dönüştürülmüş agregaların, orta düzeyde ABT içeriğinin ve optimize edilmiş fiber takviyesinin sinerjik kullanımının, döngüsel klorür saldırısına karşı gelişmiş dirence sahip sağlam bir matris sağlayabileceğini göstermektedir. Bu nedenle, 0C-10P-50F karışımı, klorüre maruz kalan altyapı için sürdürülebilirlik avantajları ve sağlam mikroyapısal performans sayesinde uzun vadeli dayanıklılık sağlayan, uygulanabilir ve çevre dostu bir alternatif sunmaktadır.



Şekil 4.18 Islama-Kuruma sonrası (0C-10P-50F) SEM görüntüleri

#### 4.8 Donma-Çözülme Direnci

Şekil 4.19a ve 4.19b; çeşitli oranlarda ince ve kaba inşaat ve yıkım atıkları (i-İYA ve k-İYA), atık beton tozu (ABT) ve polipropilen elyaflar (PPF) içeren silindire sıkıştırılmış beton (SSB) karışımlarının donma-çözülme (D-Ç) dayanıklılık performansını göstermektedir. (PPF) içeren silindire sıkıştırılmış beton (SSB) karışımlarının donma-çözülme (D-Ç) dayanıklılık performansını göstermektedir. 90 günlük su kürlenme işleminden sonra, numuneler 75 ve 150 D-Ç döngüsüne tabi tutulmuştur. Soğuk iklimlerde yaygın olan ve özellikle yüksek gözenekliliğe sahip veya zayıf ara yüzey geçiş bölgelerine (AGB) sahip sistemlerde iç mikro çatlaklar, matris genişmesi ve bağ bozulmasına neden olduğu bilinen tekrarlayan donma ve çözülme koşulları simüle edilmiştir. Tüm karışımlar sıfır çökme kıvamında tasarlanmış olmasına rağmen sıfır çökme kıvamında tasarlanmış olsa da, etkili su-bağlayıcı (s/b) oranları, esas olarak İYA agregalarının emici yapısı ve bunların iç nem dinamiği üzerindeki etkisi nedeniyle önemli ölçüde değişmiştir (0,34–0,69).

%0 i-İYA'da, 75 D-Ç döngüsünden sonra döngüden sonra nispeten ılımlıydı (%6,1–11,3); ancak 150 döngüden sonra daha belirgindi (%23,9–35,1); en yüksek bozulma %100 k-İYA; %40 ABT ve %0,75 PPF içeren karışımda gözlemlendi. Bu karışım ayrıca daha yüksek bir s/b oranına (~0,41) sahipti, bağlayıcı seyreltme, lif kaynaklı sıkıştırma zorlukları ve azalmış macun kohezyonunun döngüsel don hasarına karşı zayıf dirence katkıda bulunduğunu göstermektedir. Buna karşılık; 150 döngüden sonra en düşük kayıp (%23,9) %50 k-İYA ve %20 ABT ile %0,5 PPF'de kaydedildi, bu da ılımlı ikame seviyeleri ve lif ilavesinin direnci artırarak sertliği artırarak ve çatlak yayılmasını sınırlayarak direnci artırabileceğini göstermektedir.

%25 i-İYA'da mukavemet kaybı eğilimleri daha az tutarlıydı. 75 döngüden sonra kayıplar %9,6 ile %17,5 arasında değişirken, 150 döngüden sonra kayıplar önemli ölçüde artarak %54,6'ya ulaştı. %50 k-İYA; %40 ABT ve lif içermeyen karışım en kötü performansı gösterdi ve bu da hem yüksek bağlayıcı seyreltmesinin hem de PPF'nin yokluğunun don direncini ciddi şekilde azalttığını doğruladı. Tersine, en düşük kayıp (%20,4) %0 k-İYA; %10 ABT ve %0,5 PPF içeren karışımda elde edildi; bu da reaktif bağlayıcı içeriğinin ve matris stabilizasyonu için lif köprülemesinin

korunmasının önemini vurguladı. Bu bulgular, aşırı ABT içeriği veya zayıf lif dağılımı ile birleştirilmedikleri takdirde, orta düzeyde i-İYA'nın donma-çözülme direncini artırabileceğini göstermektedir.

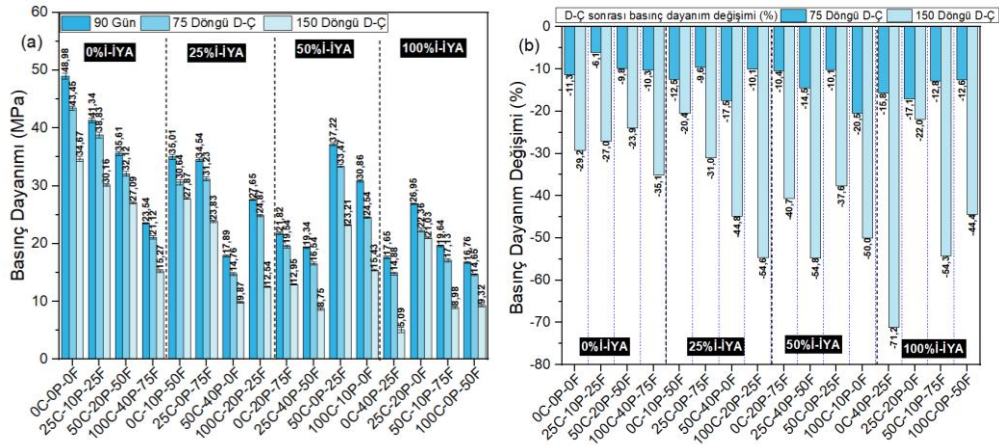
%50 i-İYA'da, 150 döngüden sonra mukavemet kaybı çoğu durumda kritik seviyelere ulaşmış ve %25 k-İYA; %40 ABT ve %0,50 PPF içeren karışımda %54,8 ile zirveye ulaşmıştır. Bu gruptaki yüksek s/b oranları (0,69'a kadar) muhtemelen donma sırasında daha fazla doyumluk ve iç mikro çatlak oluşumuna yol açmıştır. Bununla birlikte, %50 k-İYA; %0 ABT ve %0,25 PPF içeren karışım hala nispeten kabul edilebilir bir kayıp (%37,6) göstermiştir, bu da yüksek İYA seviyelerinde bile ABT'yi ortadan kaldırmanın ve düşük PPF dozajları kullanmanın matris sürekliliğini korumaya ve don kaynaklı çatlama ya da kırılmaya yatkınlığı azaltmaya yardımcı olabileceğini göstermektedir. Bu grupta 75 döngüden sonra en iyi performansı gösteren karışım (%10,1); erken aşama D-Ç hasarını azaltmada fiber takviyesinin rolünü daha da desteklemektedir.

%100 i-İYA'da performans önemli ölçüde değişiklik gösterdi. 75 döngüden sonra mukavemet kayıpları %12,6 ile %17,1 arasında kalırken, 150 döngüden sonra etkiler daha kutuplaştı ve %22,0 ile %71,2 arasında değişti. Şaşırtıcı bir şekilde; %25 k-İYA, %20 ABT ve lif içermeyen karışım en düşük mukavemet kaybını gösterdi. Bu, muhtemelen daha yüksek s/b oranına rağmen, ince ve kaba İYA fraksiyonları arasındaki olumlu etkileşimin kritik gözenek bağlantısını azalttığı için olabilir. Buna karşılık, en kötü performans (%71,2) %0 ABT ve %0,25 PPF içeren karışımda görüldü, bu da agregaların tamamen değiştirilmesinin sadece uygun macun bileşimi değil, aynı zamanda dengeli bir takviye gerektirdiğini göstermektedir. Veriler, tam İYA sistemlerinin hem karışım oranlamasına hem de kürlenmeyle ilgili nem kontrolüne duyarlı olduğunu vurgulamaktadır.

Bağlayıcı reaktivitesi ve elyaf dağılımı, don dayanıklılığında kritik parametrelerdir.  $\geq$ %40 ABT ve  $\geq$ %0,75 PPF içeren karışımlar, esas olarak kuru kıvamda zayıf jel oluşumu ve zayıf matris sıkıştırması nedeniyle tutarlı bir şekilde en yüksek mukavemet kayıplarını göstermiştir.

Orta düzeyde PPF dozajları (%0,25–0,50); özellikle erken aşama D-Ç maruziyeti altında mikro çatlakları kapatmaya ve genişleme gerilmelerini sınırlamaya yardımcı oldukları için mukavemet kaybını azaltmada etkili olmuştur.

Düşük ila orta düzeyde İYA içeriği ( $\leq$ %50); kontrollü s/b oranları ( $<$ 0,45) ve sınırlı ABT ikamesi ile birleştirildiğinde donma-çözülme direncini iyileştirmiştir, bu da agrega gradasyonu ve bağlayıcı kalitesi arasında sinerjik bir etki olduğunu göstermektedir. Şaşırtıcı bir şekilde, ABT dikkatli bir şekilde dozajlandığında ve lif içeriği optimize edildiğinde; %100 İYA karışımları kabul edilebilir don dayanıklılığı sağlayabilir, ancak uzun döngülere (150+) karşı daha savunmasız kalırlar. Çoğu karışımda 75 ile 150 döngü arasında mukavemet kaybındaki keskin artış, özellikle soğuk iklim altyapısı için İYA bazlı SSB'de uzun vadeli dayanıklılık değerlendirmesinin önemini vurgulamaktadır.



Şekil 4.19 a) D-Ç sonrası basınç dayanımı, b) Basınç dayanım değişimi

Şekil 4.20a, çeşitli seviyelerde ince inşaat ve yıkım atığı (i-İYA), kaba İYA (k-İYA), atık beton tozu (ABT) ve polipropilen lifleri (PPF) içeren silindirik sıkıştırılmış beton (SSB) karışımlarının 75 ve 150 donma-çözülme (D-Ç) döngüsüne tabi tutulduktan sonra ağırlık kaybı davranışını göstermektedir. Tüm karışımlar sıfır çökme kıvamında hazırlanmış olmasına rağmen, agrega emme kapasitesi ve yüzey pürüzlülüğündeki farklılıklar nedeniyle, özellikle daha yüksek İYA ilave seviyelerinde, etkili su-bağlayıcı (s/b) oranlarında (0,34 ile 0,69 arasında değişen) önemli farklılıklar ortaya çıkmıştır. Bu içsel farklılıklar, tekrar eden D-Ç gerilmelerine maruz kaldığında dayanıklılık tepkisini tekrar eden D-Ç stresleri altında dayanıklılık tepkisini önemli

ölçüde etkiledi. Tüm karışımlarda, ağırlık kaybı döngü sayısı ile arttı, bu da mikro çatlama, yüzey pul pul dökülme ve agrega-bağlayıcı arayüzünün zayıflamasının tekrar eden donma ve çözülme maruziyeti ile yoğunlaştığını doğruladı. Ancak, bozulmanın büyüklüğü karışım tasarım parametrelerine bağlı olarak değişiklik gösterdi.

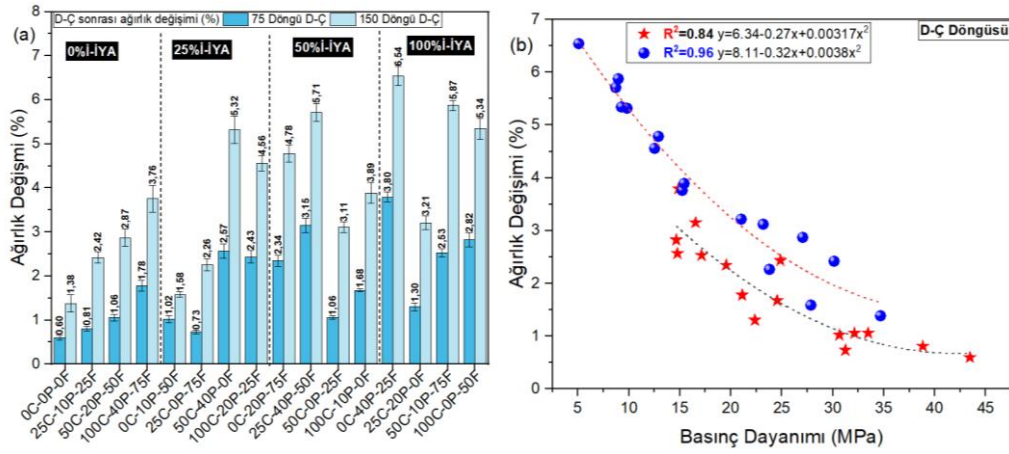
%0 i-İYA'da, nispeten düşük ağırlık kaybı değerleri gözlemlenmiştir; bu değerler 75 döngüden sonra %0,8–1,78 arasında değişmekte ve 150 döngüden sonra %1,38–3,76'ya çıkmaktadır. Referans karışım (%0 k-İYA; %0 ABT; %0 PPF) en düşük kayıpları sergilemiş, bu da düşük s/b oranlarının (~0,34) ve donma-çözülme kaynaklı pullanmaya karşı doğal kireçtaşı agregalarının üstün kalitesinin faydasını yansıtmaktadır. Ancak, k-İYA, ABT ve PPF içeriği arttıkça, hem gözeneklilik hem de iç gerilimler artarak daha büyük bir bozulmaya yol açmıştır.

%25 i-İYA'da, karışımlar biraz daha yüksek başlangıç direnci gösterdi ve 75 döngüden sonra %0,73–2,57 ve 150 döngüden sonra %1,58–5,32 ağırlık kaybı yaşadı. En iyi performans gösteren karışım %25 k-İYA; %0 ABT ve %0,75 PPF içeriyordu, bu da geri dönüştürülmüş agregaların aşırı bağlayıcı seyreltme olmadan ılımlı bir şekilde kullanıldığında ve lifler uygun şekilde dozajlandığında, sistemin gelişmiş mikro çatlak kontrolü ve iç sertlikten faydalandığına işaret etmektedir. Ancak, yüksek ABT (40%) ve lif içermeyen karışımlarda, matrisin donma-çözülme direnci keskin bir şekilde bozulmuştur, bu da hem bağlayıcı kalitesinin hem de lif varlığının döngüsel donma koşulları altında uzun vadeli dayanıklılık için çok önemli olduğunu doğrulamaktadır.

%50 i-İYA'da, yüksek iç su talebi ve yüksek s/b oranlarının (0,68–0,69'a kadar) etkileri daha belirgin hale geldi. 150 döngüden sonra, ağırlık kayıpları %3,11–5,71 arasında değişirken, en kötü performans %25 k-İYA; %40 ABT ve %0,50 PPF içeren karışımda gözlemlendi. Tersine, %50 k-İYA; ABT içermeyen ve %0,25 PPF içeren karışım önemli ölçüde daha iyi direnç gösterdi (en düşük ağırlık kaybı), bu da reaktif bağlayıcı içeriğinin korunmasının ve aşırı lif içeriğinden kaçınılmasının, yüksek geri dönüştürülmüş agrega seviyelerinde bile hasarı azaltabileceğini gösterdi.

%100 i-İYA'da performans modeli daha dağınıktı. 150 döngüden sonra ağırlık kayıpları %3,21 ile %6,54 arasında değişirken, en düşük bozulma %25 k-İYA ve %20

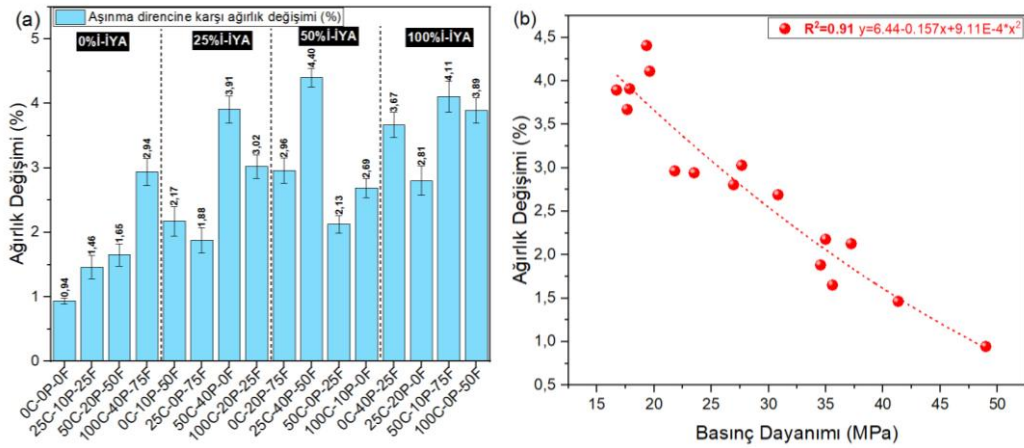
ABT içeren lif içermeyen karışımda, en yüksek bozulma ise ABT içermeyen ve %0,25 PPF içeren karışımda gözlemlendi. Bu, agrega derecelendirmesi, bağlayıcı reaktivitesi ve lif optimizasyonu uygun şekilde yönetilirse, doğal agregaların İYA ile tamamen değiştirilmesinin bile orta derecede donma-çözülme direnci sağlayabileceğini göstermektedir. Şekil 23b; 75 ve 150 donma-çözülme (D-Ç) döngüsünden sonra SSB karışımlarının basınç dayanımı ile ağırlık kaybı arasındaki korelasyonu göstermektedir. 0,84 (75 döngü) ve 0,96 (150 döngü) R<sup>2</sup> değerleri, D-Ç maruziyeti arttıkça ilişkinin önemli ölçüde güçlendiğini ve kütle kaybı yoğunlaştıkça mekanik performansın giderek bozulduğunu göstermektedir.



Şekil 4.20 D-Ç sonrası ağırlık değişimi, b) Basınç dayanımı-ağırlık değişimi

#### 4.9 Aşınma Direnci

Şekil 4.21a; 90 günlük kütleme süresinden sonra, çeşitli oranlarda ince (i-İYA) ve kaba (k-İYA) inşaat ve yıkım atıkları, atık beton tozu (ABT) ve polipropilen lifleri (PPF) içeren silindirle sıkıştırılmış beton (SSB) karışımlarının aşınma kaynaklı ağırlık kaybını göstermektedir. Tüm karışımlar sıfır çökme kıvamında tasarlanmış olsa da, geri dönüştürülmüş agregaların farklı emme kapasiteleri ve yüzey dokuları nedeniyle etkili su/bağlayıcı (s/b) oranları önemli ölçüde değişmiştir. Bu durum, matris yoğunlaşmasını ve yüzey aşınma direncini etkilemiştir.



Şekil 4.21 a) Aşınma deney sonucu, b) Basınç dayanımı-ağırlık kaybı

%0 i-İYA'da, aşınma direnci k-İYA, ABT ve PPF içeriğinin artmasıyla birlikte giderek azaldı. Referans karışım (%0 İYA, ABT ve PPF; s/b = 0,34), yoğun mikro yapı ve güçlü ara yüzey bağlanmasından yararlanarak en düşük ağırlık kaybını (%0,94) gösterdi. Buna karşılık, %100 k-İYA; %40 ABT ve %0,75 PPF (s/b = 0,41) içeren karışım, yüksek gözeneklilik, bağlayıcı seyreltme ve yüzey bütünlüğünün azalmasına neden olan zayıf elyaf dağılımı nedeniyle en yüksek ağırlık kaybını (%2,94) gösterdi.

%25 i-İYA'da aşınma kayıpları %1,88 ile %3,91 arasında değişmiştir. Maksimum bozulma, %50 k-İYA; %40 ABT ve lif içermeyen karışımında (s/b = 0,40) kaydedilmiştir, bu da yüksek çimento ikamesi ve gerilme takviyesinin yokluğunun birleşik olumsuz etkisini vurgulamaktadır. Tersine, %25 k-İYA; %0 ABT ve %0,75 PPF (s/b = 0,42) içeren karışım, muhtemelen lif köprülemesi sayesinde çatlama sonrası direncin ve yüzey sertliğinin artması nedeniyle en düşük ağırlık kaybını elde etti.

%50 i-İYA'da sonuçlar daha değişkendi ve aşınma kayıpları %2,13 ile %4,40 arasında değişiyordu. En düşük kayıp (%2,13) %50 k-İYA; %0 ABT ve %0,25 PPF (s/b = 0,68) oranlarında gözlemlendi, bu da ABT hariç tutulduğunda ve fiber akıllıca kullanıldığında, yüksek geri dönüştürülmüş içerik oranına rağmen yüzey kohezyonunun korunabileceğini göstermektedir. Ancak, en kötü performans (%4,40) %25 k-İYA; %40 ABT ve %0,50 PPF (s/b = 0,45) ile elde edildi; burada bağlayıcı seyreltme ve optimal olmayan lif içeriği muhtemelen yüzey zayıflığına ve aşınmanın hızlanmasına neden oldu.

%100 i-İYA'da, karışımlar yüksek s/b oranları (0,55–0,68) ve tamamen geri dönüştürülmüş agregaların doğal gözenekliliği ile ilişkili olarak tutarlı bir şekilde yüksek aşınma kayıpları (%2,81–4,11) sergilemiştir. En büyük kayıp (%4,11) %50 k-İYA; %10 ABT ve %0,75 PPF içeren karışımda kaydedildi, bu da yüksek lif içeriği ve zayıf matris kohezyonunun zararlı bir kombinasyon olduğunu gösterdi. Buna karşılık, %25 k-İYA; %20 ABT ve lif içermeyen karışımda %2,81 ağırlık kaybı elde edildi, bu da bazı durumlarda, bağlayıcı kalitesi orta düzeyde olduğunda lifin hariç tutulmasının yüzey sıkışmasını ve aşınma direncini korumaya yardımcı olabileceğini göstermektedir.

Bu bulgular, SSB'deki aşınma direncinin sadece geri dönüştürülmüş agrega içeriğinden değil, aynı zamanda ABT dozajı, lif içeriği ve etkili s/b oranının birleşik etkilerinden de etkilendiğini vurgulamaktadır.

Yüksek ABT içeriğine sahip karışımlar ( $\geq\%40$ ), sınırlı C–S–H jel oluşumu ve zayıflamış macun-agrega bağlanması nedeniyle tutarlı bir şekilde daha yüksek yüzey bozulması göstermiştir. Orta düzeyde PPF ilavesi (%0,25–0,50), çatlak köprüleme ve enerji emilimi yoluyla aşınma direncini etkili bir şekilde artırırken, aşırı dozaj ( $\geq\%0,75$ ), sıfır çökme karışım koşullarında sıklığı azaltma ve yüzey düzensizliklerini artırma eğiliminde olmuştur. Genel olarak, en düşük aşınma kayıpları, sınırlı ABT kullanımı, orta düzeyde lif içeriği ve kontrollü s/b oranları ( $<0,45$ ) olan karışımlarda gözlemlenmiştir. Bu sonuçlar, yüksek geri dönüştürülmüş içerikli sürdürülebilir SSB uygulamalarında uzun vadeli yüzey dayanıklılığını sağlamak için dengeli bir karışım tasarımının önemini vurgulamaktadır. Şekil 9b, basınç dayanımı ile aşınma kaynaklı ağırlık kaybı arasında yüksek bir belirleme katsayısı ( $R^2 = 0,91$ ) ile güçlü bir ters ilişki olduğunu göstermektedir. Bu, yüzey bozulması arttıkça yapısal mukavemetin önemli ölçüde azaldığını göstererek, SSB karışımlarının mekanik performansını korumada aşınma direncinin önemini vurgulamaktadır.

## 5. SONUÇLAR

Bu araştırma, çeşitli düzeylerde ince ve kaba inşaat ile yıkım atıklarını (i-İYA ve k-İYA), atık beton tozu (ABT) ve polipropilen elyafları (PPF) barındıran silindirle sıkıştırılmış beton (SSB) karışımlarının taze, mekanik, fiziksel ve dayanıklılık özelliklerini detaylı bir biçimde incelemiştir. On altı adet farklı karışım, sıfır çökme koşulları altında performansları açısından değerlendirilmiştir. Aşağıda yer alan önemli sonuçlara ulaşılmıştır:

- Kontrol karışımında %0 İYA, ABT ve PPF kullanılarak yapılan deneyler sonucunda, 90 günlük sürede en yüksek mekanik performans; 48,98 MPa basınç dayanımı ve 3,88 MPa çekme dayanımı ile elde edilmiştir. Doğal agregaların %0,25 PPF ve belirli bir seviyede ABT ( $\leq$ %20) ile birlikte İYA ile tamamen değiştirilmesi, 37,22 MPa basınç dayanımı ve 3,0 MPa'nın üzerinde çekme dayanımı sağlamıştır. Ek olarak, geri dönüştürülmüş agreganın ve ABT içeriğinin artışının basınç dayanımı değerlerini genel olarak düşürdüğü ortaya konulmuştur.
- Yarma-çekme mukavemeti, incelemeye alınan tüm karışımlarda 2,0 MPa'nın üzerinde de devam etmiş, seçilen kısmen geri dönüştürülmüş karışımlarda ise 3,93 MPa ile maksimum değeri elde etmiştir.
- Karışımların görünür gözenekliliği, İYA ve ABT içeriğine göre %0,98 ile %4,33 arasında dalgalanmalar göstermiştir. Su emme değerleri benzer eğilimler sergilemiş ve tamamen geri dönüştürülmüş sistemlerde en yüksek değerlere ulaşmıştır. Sorptivite, 1,40 ile 5,47 kg/m<sup>2</sup> arasında değişikliğe uğramış olup, yüksek ABT ve yüksek geri dönüştürülmüş içerik barındıran karışımlarda daha yüksek değerlerin gözlemlendiği kaydedilmiştir. Kuru birim ağırlık, yüksek gözenekli sistemlerde 2004 kg/m<sup>3</sup> ile daha yoğun kontrol karışımlarında 2325 kg/m<sup>3</sup> arasında değişiklik göstermektedir.
- Yüzey aşınma direnci, tüm SSB formülasyonlarında %0,94 ile %4,40 arasında değişen ağırlık kayıpları ile değişiklik göstermektedir. Magnezyum sülfat maruziyeti altında, dayanıklılık %1,6 ile %28,2 arasında sıkıştırma mukavemeti

kayıplarına yol açmıştır. Klorür kaynaklı ıslanma-kuruma döngüleri ise %3 ile %36 arasında mukavemet azalmalarına sebep olmuştur. Ayrıca, donma-çözülme maruziyeti, %20 ile %71 arasında sıkıştırma mukavemeti kaybı ve %6,5 oranında ağırlık kaybına neden olmuştur.

- Maksimum dayanıklılık ile ilgili dayanım kayıpları, %25 i-İYA içeren, sınırlı ABT (%10–20) ve PPF içeriği %0,25 ile %0,50 arasında değişen karışımlarda gözlemlenmiştir. Aşırı ABT kullanımı ( $\geq\%40$ ) ve yüksek PPF dozları ( $\geq\%0,75$ ); mekanik ve dayanıklılık performansında sürekli olarak azalmalar ile ilişkilendirilmiştir. Dayanım, yoğunluk ve dayanıklılığın optimal dengesi, kısmen geri dönüştürülmüş agrega ikamesinin dahil olduğu karışımlarda, orta seviyelerde ABT ikamesi ( $\leq\%20$ ) ve PPF dozları %0,25 ile %0,50 arasında olanlarla sağlanmaktadır.
- Taguchi analizi çerçevesinde, basınç dayanımını etkileyen en önemli parametre ABT içeriği olarak belirlenmiştir. Bu parametreyi takip eden en kritik ikinci faktör ise k-İYA oranıdır. Performansı en üst düzeye çıkarmak için en uygun karışım konfigürasyonu, %0 i-İYA koşullarında %25 k-İYA; %10 ABT ve %0,25 PPF oranları ile belirlenmiştir.

Bu bulgular, agrega kalitesinin, bağlayıcı ikame oranının ve elyaf dozajının optimize edilmesi durumunda, yüksek oranda geri dönüştürülmüş malzeme kullanarak yapısal olarak yeterli ve dayanıklı silindire sıkıştırılmış beton (SSB) üretmenin mümkün olduğunu göstermektedir. Bu durum, inşaat sektöründe sürdürülebilir malzeme kullanımının önemini vurgulamakta ve çevresel etkilerin azaltılmasına katkı sağlamaktadır. Ayrıca, bu tür kompozitlerin geliştirilmesi hem maliyet etkinliği hem de performans açısından avantajlar sunarak, gelecekteki inşaat projelerinde daha geniş bir uygulama alanı bulmasını sağlayabilir. Sonuç olarak, bu araştırma, geri dönüştürülmüş malzemelerin yapı malzemeleri olarak kullanımının potansiyelini ortaya koymakta ve bu alandaki yenilikçi yaklaşımların teşvik edilmesine zemin hazırlamaktadır.

## KAYNAKLAR

- Abut, Y. (2017). Silindirle Sıkıştırılmış Beton Yol: Kocaeli İlinde Bir Durum Çalışması. Doktora Tezi, *Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*. Kocaeli.
- Aghabaglou, A., Bayqra, S., Özen, S., Faqiri, Z., & Ramyar, K. (2020). Silindirle Sıkıştırılmış Beton Karışımlarında Kullanılan Malzemelerin Özellikleri. *Uluslararası Mühendislik Araştırma ve Geliştirme Dergisi*, 12(1), 61-72. doi:10.29137/umagd.569501
- American Concrete Institute. (2024, Novenber). Low-Carbon Concrete— Code Requirements and Commentary Reported by ACI Committee 323. American Concrete Institute.
- Antunes, A., Costa, H., Carmo, R. & Julio, E. (2025). A comprehensive review of sustainable use of construction and demolition waste as recycled aggregates in the production of concrete – Properties, mix design and on-site applications. *Construction and Building Materials*, 482, 141733.
- Ay, İ., & Tekin, U. (2023). Deprem. Deprem Ulaşım Sistemlerine Etkisi. *Afet Yönetiminde Ulaşım Sistemlerinin Rolü ve Önemi* (128), 30.
- Bakırcı, M., & Aydoğdu, M. (2023). Deprem ve Ulaşım: Kahramanmaraş (Pazarcık-Elbistan) depremlerinin ulaşımına ilişkin mekansal yansımaları. *Türk Coğrafya Dergisi*, (83), 115-129 doi:10.17211/tcd.1296634
- Bayraktar, O. Y., Kaplan, G., Shi, J., Benli, A., Bodur, B., & Turkoglu, M. (2023). The effect of steel fiber aspect-ratio and content on the fresh, flexural, and mechanical performance of concrete made with recycled fine aggregate. *Construction and Building Materials*, 368, 130497. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061823002088>, Erişim Tarihi: 10.04.2025.
- Bayraktar, O. Y., Selam Taher Eshtewı, S., Benli, A., Kaplan, G., Toklu, K., & Gunek, F. (2021). The impact of RCA and fly ash on the mechanical and durability properties of polypropylene fibre-reinforced concrete exposed to freeze-thaw cycles and MgSO4 with ANN modeling. *Construction and Building Materials*, 313, 125508. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061821032463>, Erişim Tarihi: 15.03.2025.
- Bayraktar, O., Turhal, S., Benli, A., Jinyan, S., & Kaplan, G. (2025). Application of recycled aggregates and biomass ash in fibre-reinforced green roller compacted concrete pavement-technical and environmental assessment. *International Journal of Pavement Engineering*, 26(1), 2458140. doi:10.1080/10298436.2025.2458140
- Benli, A., Bayraktar, O. Y., Alcan, H. G., Kaplan, G., & Aydın, A. C. (2025). Impact of attapulgitte and basalt fiber additions on the performance of pumice-based

foam concrete: mechanical, thermal, and durability properties. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 25,74.

Benyarar, F. D., Yıldız, S. A., Misir, G., & Çalış, G. (2023). The RSM-Based Optimization of Recycled Polypropylene Fiber Reinforced and Ground Calcium Carbonate Incorporated Roller Compacted Concrete for Pavement. *International Journal of Pavement Research and Technology*. Springer. doi:10.1007/s42947-023-00385-w.

Calis, G., & Yıldız, S. A. (2019). Investigation of roller compacted concrete: Literature review. *Challenge Journal of Concrete Research Letters*, 10(3), 63-74.

European Concrete Paving Association. (2019). Silindirle Sıkıştırılmış Beton: Beton kaplamaları ulaştırma sektörünün kullanımına sunan bir yöntem. (T. Ç. Birliği, Çev.) Brussels: European Concrete Paving Association.

Gencil, O., Ozel, C., Koksall, F., Erdogmus, E., Martínez-Barrera, G. & Brostow, W. (2012). Properties of concrete paving blocks made with waste marble. *Journal of Cleaner Production*, 21(1), 62-70. doi:10.1016/j.jclepro.2011.08.023.

Karayolları Genel Müdürlüğü. (2024). İstatistikler (sath yol ağı uzunluğu). KGM: <https://www.kgm.gov.tr/sayfalar/kgm/sitetr/istatistikler/devletveilyolenvanteri.aspx>, Erişim Tarihi: 20.04.2025.

Keleş, Ö. F. (2019). Silindirle sıkıştırılmış beton yollarda kür çeşidinin ve uygulama zamanının incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, *Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*. Trabzon.

Khan, Z. A., Balunaini, U., Costa, S., & Nguyen, N. H. (2024). A review on sustainable use of recycled construction and demolition waste aggregates in pavement base and subbase layers. *Cleaner Materials*, 13, 100266. doi: doi.org/10.1016/j.clema.2024.100266

Kılıç, İ. ve Gök, S. G. (2021). Yüksek Firin Cürufu Katkili Silindirle Sıkıştırılmış Betonların Özellikleri. *Journal of Engineering Sciences*, 9(4), 1077-1087. doi:10.36306/konjes.1000967.

Paglia, C. (2023). RCC: Rolled compacted concrete for pavement applications. International Union of Laboratories and Experts in Construction.

Ram Kumar, B., & Ramakrishna, G. (2022). Performance evaluation of sustainable materials in roller compacted concrete pavements: a state of art review. *Journal of Building Pathology and Rehabilitation* (7), 78. doi.org/10.1007/s41024-022-00212-y

Sefidehkan, H. P. ve Şimşek, O. (2018). Farklı Oranlarda Geri Dönüşüm Agregası Kullanılarak Üretilen Betonun Bazı Mühendislik Özelliklerinin Araştırılması. *Politeknik Dergisi*, 21(1), 83-91. doi:10.2339/politeknik.391789

- Shayma Al Baghdady, L. K. (2018). Designing Roller compacted concrete (RCC) dams. Stockholm, Sweden: Royal Institute of Technology (KTH) Department of Civil and Architectural Engineering Division of Concrete Structures.
- Sheikh, E., Mousavi, S. R. ve Afshoon, I. (2022). Producing green Roller Compacted Concrete (RCC) using fine copper slag aggregates. *Journal of Cleaner Production*, 368, 133005. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.133005>
- Su, X., Wang, L., Liu, W., Wang, R., & Li, Y. (2024). Deterioration of interfacial bonding performance between metal mortar and concrete under the coupling effect of freeze-thaw cycle and abrasion. *Journal of Building Engineering*, 85, 108628.
- Summaira, M., Fareena, F., Asma, I., L. F., Jiří Jaromír, K., Imran Hameed, K.A.E. Atabani, S. (2019). Improved project control for sustainable development of construction sector to reduce environment risks. *Journal of Cleaner Production*, 240(6), 118214.
- SuWang, X., Li, K., Zhong, Y. ve Xu, Q. (2019). Investigation of Thermal Reflective Cracking in Asphalt Pavement Using XFEM Coupled with DFLUX Subroutine and FILM Subroutine. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 44(5), 4795-4805. doi:10.1007/s13369-018-3554-y
- Şengün, E., Aykutlu, M. A. ve Yaman, İ. Ö. (2017). Silindirle sıkıştırılmış beton yollar üzerine güncel bir tarama-bölüm 1: Özellikleri ve karışım tasarımı. *Çimento ve Beton Dünyası*, 120, 93-114.
- Taşkınsu, H. Ç. (2019). *Silindirle sıkıştırılmış beton yolların performanslarının, geleneksel beton yolların ve asfalt yolların performansı ile karşılaştırılması*. Yüksek Lisans Tezi, *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*. Eskişehir.
- Taşlıgil, N., & Şahin, G. (2022). Ulaşım coğrafyası prensipleri ve Türkiye ulaşım coğrafyası. Nobel Yayınevi.
- Türkiye Hazır Beton Birliği. (2023). BETON 2023. Türkiye Hazır Beton Birliği. <https://www.thbb.org/faaliyetlerimiz/kongre-ve-fuar/beton-2023/>, Erişim Tarihi: 27.06.2025
- Yetim, E., & Yılmaz, D. (2019). Beton yollar ve Silindirle sıkıştırılmış betonun Türkiye'deki yeni uygulama alanı. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı.
- Yılmazoğlu, M. U., Kara, H. O., Benli, A., Demirkıran, A. R., Bayraktar, O. Y. ve Kaplan, G. (2025). Sustainable alkali-activated foam concrete with pumice aggregate: Effects of clinoptilolite zeolite and fly ash on strength, durability, and thermal performance. *Construction and Building Materials*, 464, 140160. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061825003083> adresinden erişildi.