

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



**GERİ DÖNÜŞÜM AGREGALI SİLİNDİRLE SIKIŞTIRILMIŞ
BETONLARDA POLİPROPİLEN LİF VE ŞEKER FABRİKASI
ATIKLARININ MEKANİK VE DURABİLİTE ÖZELLİKLERİNE
ETKİSİ**

SERKAN TURHAL

YÜKSEK LİSANS TEZİ

DOÇ. DR. OĞUZHAN YAVUZ BAYRAKTAR

MAYIS - 2024

KASTAMONU

TEZ ONAYI

Serkan TURHAL tarafından hazırlanan “**GERİ DÖNÜŞÜM AGREGALI SİLİNDİRLE SIKIŞTIRILMIŞ BETONLARDA POLİPROPİLEN LİF VE ŞEKER FABRİKASI ATIKLARININ MEKANİK VE DURABİLİTE ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ**” adlı tez çalışmasının savunma sınavı **31.05.2024** tarihinde yapılmış olup aşağıda verilen jüri tarafından oy birliği ile Kastamonu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı Yüksek Lisans Tezi** olarak kabul edilmiştir.

Danışman	Doç. Dr. Oğuzhan Yavuz BAYRAKTAR Kastamonu Üniversitesi	
Jüri Üyesi	Doç. Dr. Gökhan KAPLAN Atatürk Üniversitesi	
Jüri Üyesi	Dr. Öğr. Üyesi Mehmet Uğur YILMAZOĞLU Kastamonu Üniversitesi	

Jüri üyeleri tarafından kabul edilmiş olan bu tez Kastamonu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulunca onanmıştır.

Enstitü Müdürü	Doç. Dr. Selçuk MEMİŞ	
----------------	-----------------------	-------

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.

Serkan TURHAL

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

GERİ DÖNÜŞÜM AGREGALI SİLİNDİRLE SIKIŞTIRILMIŞ BETONLARDA POLİPROPİLEN LİF VE ŞEKER FABRİKASI ATIKLARININ MEKANİK VE DURABİLİTE ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ

SERKAN TURHAL

KASTAMONU ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI
DANIŞMAN:DOÇ. DR. OĞUZHAN YAVUZ BAYRAKTAR

Küresel nüfus artışı, ihtiyaç anlayışının çeşitlenmesi ve bilinçsiz tüketim anlayışı dünya üzerindeki mevcut hammadde kaynaklarını tüketmektedir. Her sektörün farklı şekillerde etkilenmesi yanında, her bileşiği hammaddeye bağlı olan inşaat sektörünü ciddi bir sarsıntıya uğratmaktadır. Bu sorun, inşaat mühendislerini ve araştırmacıları alternatif çözümler üretmeye yöneltmiştir. Yeni bir malzeme üretmek yerine atık durumunda olan malzemelerin tekrar kullanımı bu süreçte en parlak alternatif çözüm olmuştur. İklim değişikliği krizi, küresel ısınma gibi konuların artık haberlerde değil, hissetme noktasına geldiğimiz şu günlerde tüm dünya seferber olup, geri dönüşüme yönelmiştir. İklim değişikliği ile mücadele kapsamında ülkemizde bilinçlenme başlanmış olup; enerji tasarrufu ve sera gazı emisyonlarını azaltmaya yönelik sürdürülebilirlik kavramı yaygınlaşmaktadır. Doğal afetler ve restorasyon çalışmaları atık malzemelerin büyük bir kısmını oluşturmaktadır. Geri dönüştürülmüş agreganın beton endüstrisinde kullanım oranının arttığı bilinmektedir. Geri dönüşüm agregasının (GDA) betonlarda kullanımı sadece çevresel kirliliği değil aynı zamanda hammaddenin korunması ve enerji tasarrufuna da yaramaktadır. Bu çalışmada geri dönüşüm agregası, şeker fabrikası atık külü (AK) ve polipropilen (PP) lif kullanılarak üretilen silindirle sıkıştırılmış betonların (SSB), doğal agregası ile üretilen geleneksel SSB'nin mekanik, fiziksel ve durabilite özelliklerinin karşılaştırılması yapılmıştır. Atık malzemelerin SSB üzerinde kullanılabilirliğinin araştırıldığı bu çalışmada; GDA'lar %0, %25, %50 ve %100 oranında yer değiştirilerek SSB numuneler üretilmiştir. Bununla birlikte çimento tüketimini bir miktar azaltmak amacıyla %0, %7,5, %15 ve %30 oranında çimento ikamesi olarak AK ve SSB'nin özelliklerini iyileştirmek için %0, %0,5, %1, %2 oranında PP lif kullanılmıştır. AK içeren SSB nispeten yüksek bir emicilik katsayısı gösterir çünkü AK parçacıkları yüksek gözenekliliğe, açısız forma, düzensiz boyuta ve yüksek kızdırma kaybına sahiptir. Optimum oranlarla hazırlanan tasarım ile KGDA, İGDA, AK ve PP lifinin birlikte uygulanması, SSB'lerin karbon emisyonlarını etkili bir şekilde azaltabilir.

ANAHTAR KELİMELER: Geri Dönüşüm Agregası, Polipropilen Lif, Fabrika Atıkları, Silindirle Sıkıştırılmış Beton.

Mayıs 2024, 108 Sayfa

ABSTRACT

MSC THESIS

EFFECT OF POLYPROPYLENE FIBER AND SUGAR FACTORY WASTE MATERIAL ON MECHANICAL AND DURABILITY PROPERTIES OF ROLLER COMPACTED CONCRETE WITH RECYCLED AGGREGATE

SERKAN TURHAL

KASTAMONU UNIVERSITY INSTITUTE OF SCIENCE

DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING

SUPERVISOR:ASSOC. PROF. DR. OĞUZHAN YAVUZ BAYRAKTAR

Global population growth, diversification of needs and unconscious consumption consume the existing raw material resources in the world. In addition to affecting every sector in different ways, it seriously shocks the construction industry, which depends on raw materials. This problem has led civil engineers and researchers to produce alternative solutions. Reusing waste materials instead of producing a new material has become the brightest alternative solution in this process. In these days when we have come to the point where issues such as climate change crisis and global warming are no longer in the news, but are felt, the whole world is mobilized and directed towards recycling. Awareness has started to be raised in our country within the scope of combating climate change; The concept of sustainability, which aims to save energy and reduce greenhouse gas emissions, is becoming widespread. Natural disasters and restoration works constitute a large portion of waste materials. It is known that the rate of use of recycled aggregate in the concrete industry is increasing. The use of recycled aggregate (RCA) in concrete not only prevents environmental pollution, but also protects raw materials and saves energy. In this study, the mechanical, physical and durability properties of roller compacted concrete (RCC) produced using recycling aggregate, sugar factory waste ash (AK) and polypropylene (PP) fiber were compared with traditional RCC produced with natural aggregate. In this study, the usability of waste materials on RCC was investigated; RCC samples were produced by replacing RCA's at the rates of 0%, 25%, 50% and 100%. However, in order to slightly reduce cement consumption, 0%, 0.5%, 1%, 2% PP fiber was used as a 0%, 7.5%, 15% and 30% cement replacement to improve the properties of AK and RCC. RCC containing AK shows a relatively high absorbency coefficient because AK particles have high porosity, angular form, irregular size and high ignition loss. The design prepared with optimum proportions and the application of CRCA, FRCA, AK and PP fiber together can effectively reduce the carbon emissions of RCCs.

KEYWORDS:Recycled Aggregate, Polypropylene Fiber, Factory Waste, Roller Compacted Concrete

May 2024, 108 Page

TEŞEKKÜR

Tez danışmanlığımı üstlenerek araştırma konusunun seçimi ve yürütülmesi sırasında, değerli bilimsel uyarı ve önerilerinden yararlandığım, yardım ve katkılarını esirgemeyen değerli Hocam Sayın Doç. Dr. Oğuzhan Yavuz BAYRAKTAR'a sonsuz teşekkür eder, saygı ve şükranlarımı sunarım.

Yüksek lisans eğitimim boyunca akademik bilgileriyle yoluma ışık tutan tüm hocalarıma, deneysel ve analiz çalışmalarında destek sağlayan Kastamonu Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesine ve İnşaat Mühendisliği Laboratuvarına teşekkürlerimi sunarım.

Son olarak hayatımın her alanında olduğu gibi, tez çalışmamı hazırlarken de her aşamada bana yardımcı olan sevgili eşim Selma İZBELİ TURHAL'a ve bugünlere gelmemi sağlayan kıymetli aileme sonsuz teşekkür ederim.

SERKAN TURHAL

Kastamonu, 2024

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
TEZ ONAYI	ii
TAAHHÜTNAME	iii
ÖZET.....	iv
ABSTRACT	v
TEŞEKKÜR	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ	ix
TABLolar DİZİNİ	xi
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xii
1. GİRİŞ.....	1
1.1 Çalışmanın Amacı ve Özeti	4
1.2 Çalışmanın Kapsamı	4
2. LİTERATÜR TARAMASI	6
2.1 Silindirle Sıkıştırılmış Beton (SSB).....	10
2.1.1 Genel Özellikler	11
2.1.2 SSB Üretiminde Kullanılan Malzemeler	14
2.1.3 SSB Karışım Tasarımı ve Esasları.....	19
2.1.4 SSB'nin Avantajları ve Dezavantajları	25
2.1.5 SSB Prosesleri.....	26
2.1.6 Geleneksel Beton ve SSB Özelliklerinin Karşılaştırılması.....	29
2.1.7 SSB Uygulama Alanları.....	30
2.1.8 SSB Hakkında Yapılan Çalışmalar	31
2.2 Geri Dönüşüm Agregası	34
2.3 Endüstriyel Sektörlerde Açığa Çıkan Küller	47
2.4 Polipropilen Lif	50
3. DENEYSEL PROGRAM	55
3.1 Malzemeler	55
3.1.1 Çimento.....	55
3.1.2 Su	56
3.1.3 Agrega.....	57
3.1.4 Şeker Fabrikası Atığı Küllü	58
3.1.5 Polipropilen Lif	59
3.2 Beton Karışımı ve Kür Bakımı	60
3.3 Deneysel Yöntemler.....	61
3.3.1 Taze Betonda Çökme Deneyi/ Slump Test.....	61
3.3.2 Fiziksel Deneyler	61
3.3.3 Basınç Dayanım Testi	62
3.3.4 Yarmada-Çekme Dayanım Testi	62
3.3.5 Kapilarite Deneyi.....	62
3.3.6 Aşınma Direnci Deneyi	63
3.3.7 Donma-Çözülme Dayanıklılığı.....	63
3.3.8 Magnezyum Sülfat (MgSO ₄) ve Sodyum Sülfat (Na ₂ SO ₄) Dayanıklılığı	64
3.3.9 Sodyum Klorür (NaCl) Dayanıklılığı	64

4. BULGULAR VE TARTIŞMA	66
4.1 Çökme Deneyleri	66
4.2 Fiziksel Deneyler	67
4.3 Basınç Dayanım Testleri.....	70
4.4 Yarmada-Çekme Dayanımı Testi	72
4.5 Kapilerite.....	75
4.6 Aşınma Direnci Deneyi.....	77
4.7 Donma-Çözülme Deneyleri	79
4.8 Magnezyum Sülfat ($MgSO_4$) ve Sodyum Sülfat (Na_2SO_4) Dayanıklılık Testi.....	81
4.9 Sodyum Klorür ($NaCl$) Dayanıklılık Testi	86
5. SONUÇ	89
KAYNAKLAR	90
ÖZGEÇMİŞ.....	108



ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 2.1 Kaplamaların benzer özellikleri ve testler	10
Şekil 2.2 Malzeme karışım miktarları	12
Şekil 2.3 Geleneksek beton ve ssb yol karışım Oranı	12
Şekil 2.4 Erken yük taşıma kapasitesi	13
Şekil 2.5 SSB toplam yük taşıma kapasitesi	13
Şekil 2.6 Kaplamaların yüzeyleri ve elmas taşlama	14
Şekil 2.7 SSB kaplama karışımında kullanılacak agregaların tane boyu dağılımı ...	16
Şekil 2.8 Beton karışımı için muhtemel varyasyon	19
Şekil 2.9 Gradasyon karşılaştırması	20
Şekil 2.10 Darbeli, yoğurmalı ve silindir sıkıştırıcıların tipik sıkıştırma mekanizmaları	21
Şekil 2.11 Optimum nem-yoğunluk ilişkisi	22
Şekil 2.12 Dayanım- çimento ilişkisi	22
Şekil 2.13 SSB’lerde kullanılan iş makineleri	27
Şekil 2.14 Yıkılan binaların süreci	36
Şekil 2.15 Türkiye şeker fabrikaları haritası	50
Şekil 2.16 Polipropilen monomeri yapısı	50
Şekil 2.17 Polipropilen lif	51
Şekil 3.1 Karışımında kullanılan tüm malzemeler	55
Şekil 3.2 Bartın çimentosu CEM I 42,5-R	56
Şekil 3.3 Geri dönüşüm agregalarının hazırlanışı	57
Şekil 3.4 Karışımlarda kullanılan agregalar	57
Şekil 3.5 Karışım agregalarının granülometre eğrisi	58
Şekil 3.6 Şeker fabrikası atığı külü	59
Şekil 3.7 Polipropilen lif	59
Şekil 4.1 Karışımların çökme deneyleri	66
Şekil 4.2 a) Kuru birim ağırlık ve b) Kuru birim ağırlık ile basınç dayanımı korelasyonu	67
Şekil 4.3 a) Porozite ve su emme, b) Porozite ve basınç dayanımı korelasyonu	69
Şekil 4.4 a) KGDA içerikleri %0 ve %25 ve b) %50 ve %100 olan SSB numunelerinin basınç dayanımı	70
Şekil 4.5 a) KGDA içerikleri %0 ve %25 ve b) %50 ve %100 olan SSB numunelerinin yarmada çekme dayanımları	74
Şekil 4.6 Basınç dayanımı ve yarmada çekme dayanımı korelasyonu	74
Şekil 4.7 a) SSB’lere ait kapilarite değerleri, b) Kapilarite ve basınç dayanımı korelasyonu	75
Şekil 4.8 Kapilarite deneyi	75
Şekil 4.9 SSB numunelerinin aşınma testi sonuçları	78
Şekil 4.10 Aşınma deneyi	78
Şekil 4.11 Donma çözülme sonrası a) Basınç dayanımları b) Basınç dayanım değişimleri	80
Şekil 4.12 Donma çözülme sonrası a) ağırlık kayıpları, b) ağırlık kaybı ve basınç dayanımı korelasyonu	81

Şekil 4.13 MgSO_4 'e maruz kaldıktan sonra a) Basınç dayanımı ve b) Basınç dayanımı değişimleri	82
Şekil 4.14 MgSO_4 , Na_2SO_4 ve NaCl çözeltileri	82
Şekil 4.15 a) ve b) MgSO_4 sonrası ağırlık değişimi, c) MgSO_4 sonrası ağırlık değişimi ve porozite korelasyonu.....	84
Şekil 4.16 Na_2SO_4 'e maruz kaldıktan sonra a) Basınç dayanımları, b) Basınç dayanım değişimleri	86
Şekil 4.17 Na_2SO_4 sonrası ağırlık değişimleri	86
Şekil 4.18 NaCl maruziyeti sonrası a) Basınç dayanımları, b) Basınç dayanım değişimleri.....	86
Şekil 4.19 NaCl sonrası a) KGDA %0 ve %25 b) %50 ve %100 olan SSB'lerin ağırlık değişimleri	87

TABLÖLAR DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
Tablo 2.1 Kullanılan malzemelerin kıyaslanması.....	15
Tablo 2.2 Agregada gradasyon sınırı.....	15
Tablo 2.3 İri agregada özellikleri.....	16
Tablo 2.4 İnce agregada özellikleri.....	17
Tablo 2.5 GBY ve SSB kaplama türüne göre kıyaslama.....	29
Tablo 2.6 SSB uygulama alanları.....	31
Tablo 2.7 DA ve GDA'nın temel fiziksel özellikleri.....	42
Tablo 3.1 CEM I 42.5-R özellikleri.....	56
Tablo 3.2 Kullanılan su analizi.....	56
Tablo 3.3 Agregaların fiziksel özellikleri.....	58
Tablo 3.4 AK'ye ait kimyasal kompozisyon.....	59
Tablo 3.5 Polipropilen lifin teknik özellikleri.....	60
Tablo 3.6 Karışım tasarımı.....	60

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler

°C	: Santigrat derece
Al ₂ O ₃	: Alüminyum oksit
CaO	: Kalsiyum oksit
Fe ₂ O ₃	: Demir oksit
MgO	: Magnezyum oksit
MgSO ₄	: Magnezyum sülfat
Na ₂ O	: Sodyum oksit
Na ₂ SO ₄	: Sodyum sülfat
NaCl	: Sodyum klorür
SiO ₂	: Silisyum dioksit (silika)
SO ₃	: Kükürt trioksit

Kısaltmalar

AAR	: Alkali Agregat Reaksiyonu
ACI	: American Concrete Enstitute
AK	: Atık Külü
ASTM	: American Society For Testings And Materials
DA	: Doğal Agregat
D-Ç	: Donma-Çözülme
DKA	: Doğal Kaba Agregat
GBY	: Geleneksel Beton Yol
GDA	: Geri Dönüşüm Agregası
İGDA	: İnce Geri Dönüşüm Agregat
KGDA	: Kaba Geri Dönüşüm Agregat
KK	: Kızdırma Kaybı
kN	: Kilo newton
MPa	: Mega Pascal
PP	: Polipropilen
S/Ç	: Su/Çimento
SSB	: Silindirele Sıkıştırılmış Beton
TSE	: Türk Standartları Enstitüsü
UK	: Uçucu Kül

1. GİRİŞ

Ülkemizde yük taşıma sektörünün yaklaşık %76'sı, yolcu taşımacılığının %95'i karayolu ile karşılanmaktadır. Karayolları Genel Müdürlüğü (KGM)'ne bağlı toplam 68526 km'lik yol ağı mevcuttur. Bu yolların 28306 km'si asfalt betonu, 36887 km'si sathi kaplama ve diğer (beton, toprak, parke ve stabilize) yollar ise 3333 km'den oluşmaktadır (KGM, 2022). Çevre koşulları ve ağır yük taşıtlarının geçtiği üstyapılarda zamanla hasar meydana gelmektedir. Oluşan hasarlı yolların gerek servis ömrünü uzatmak gerekse güvenli durumda tutmak için bazı rehabilitasyon tekniklerinin uygulanması gerekmektedir. Dünya üzerinde yaygınlaşan, kaplamaların en iyi performansını garanti ederken maliyeti düşük olan Silindirle Sıkıştırılmış Beton (SSB) güzel bir alternatif olarak önümüze çıkmaktadır (Yetim ve Yılmaz, 2020). Yol yapımında daha rijit yerel malzemelerin kullanılması ve çeşitli sakıncaları görülen esnek asfalt betonu aşınma tabakaları yerine bunların sıkıştırılarak yerleştirilmesi ile ilgilidir. Aslında, esnek asfalt betonu aşınma tabakaları yoğun trafik altında daha yumuşak hale gelmekte ve çok pahalı bir bitümlü malzeme tedariki gerektirmektedir. Bu nedenle, günümüzde dayanıklılık ve sertliği birleştirebilen, uygun maliyetli yol yapım teknikleri bulmak acildir.

Son yıllarda ilgi odağı olan sürdürülebilir inşaat politikaları araştırma konuları arasına SSB'yi de almıştır. Yapılan araştırmalar SSB üretiminde geri dönüşüm agregası (GDA) ve endüstriyel atıkların kullanılmasıyla başarılı sonuçlar elde edilebileceğini kanıtlamıştır (Gök vd., 2021; Kılıç ve Gök, 2021). Doğal hammaddelerin uygun tasarımıyla üretilen ve dünya üzerinde yapı malzemesi olarak açık ara en çok kullanılan betonun, dünya çapında yaklaşık 10 milyar m³'lük üretim miktarı vardır. Bu da dünyada yıllık kişi başına 1,3 m³ beton üretildiği anlamına gelmektedir. Ülkemizde 2021 yılsonu istatistik değerlere bakıldığında 105 milyon m³ hazır beton üretilmiştir (Engin, 2023). Son yıllarda hızla artan nüfus ve kaynak yetersizliği dünyanın yüzleştiği ve etkili çözüm arayışlarına girdiği en önemli konulardan bir tanesidir. Bu çözümlerin arayışlarında yalnızca kaynakların en verimli şekillerde kullanılması değil aynı zamanda; hâlihazırda enerji ve doğal kaynak tüketilerek üretilmiş ve atık haline gelmiş malzemelerin geri dönüşüm, geri kazanım veya tekrar kullanım yollarıyla

yeniden değerlendirilmeleri de ciddi önem taşımaktadır. Beton yapıların servis ömrünün maksimum 50 seneye ulaştığı dikkate alındığında kentsel dönüşüm faaliyetlerinin devamlı artacağı ve buna bağlı inşaat atıklarının da artacağı büyük bir sorun haline gelmektedir. Türkiye’de 6 Şubat 2023 tarihinde gerçekleşen ‘‘Asrın Felaketi’’ denilen merkez üssü Kahramanmaraş ilimiz olan 7,6 ve 7,7 büyüklüğünde iki depremlerde meydana gelmiştir. Bu depremlerden etkilenen 11 ilimizde yapılan ilk hasar tespit çalışmaları raporlarınca 332 bin 947 bağımsız bölümden oluşan 84 bin 726 bina yıkık, acil yıkılacak ve ağır hasarlı olarak tespit edilmiş edilmiştir. Oluşan enkaz miktarının 100 ile 230 milyon ton arasında olduğu tahmin edilmektedir (T.C Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, 2023). İnşaat atıklarının dolayısıyla geri dönüşüm agregası kullanımının çevre ve ekonomi üzerindeki etkileri ciddi önem arz etmektedir.

Yerel maden kaynaklarından çimento üretimi enerji tüketimi bakımından yoğun bir endüstridir. Mevcut küresel eğilim, yenilenemeyen enerji kaynaklarından tasarruf etmek ve daha düşük çevresel etkiye sahip yenilenebilir kaynaklardan enerji elde etmektir. İnşaat sektöründeki mevcut patlama, betonun ana bileşeni olan çimentoya olan talebi artırmıştır. Çimento endüstrisi aynı zamanda birincil karbon emisyonu kaynaklarından biridir ve agregalar gibi doğal kaynakların önemli bir tüketicisidir. Çimento endüstrisinde CO₂ emisyonunun azaltılması, Avrupa Birliği’nde ve dünyada da bir öncelik eksenidir. Enerji üretimi için atık külü (AK) yakma, enerji üretim maliyetinin düşürülmesini sağlamıştır. Ancak bu süreçte yüksek miktarda kül oluşmaktadır. Yenilenebilir enerji endüstrisinin gelişimi ve büyük ölçekli AK yakma, daha yüksek miktarlarda yanıcı ham madde gerektirmektedir. AK yakma tesisleri biyolojik atıkları yakar ve büyük miktarlarda yakma atığı üretir. AK, esas olarak düzenli depolama alanlarında bertaraf edilen küldür. Fakat AK ciddi çevre sorunlarına neden olur. Araştırma sonuçları, bu tür atıkların inşaat ürünleri endüstrisinde etkili bir şekilde geri dönüştürülebileceğini göstermektedir (Cheah ve Ramli, 2011; Demis vd., 2014; Xue vd., 2014). Modifiye betonda AK kullanmak, külü çevresel bir endişe olmaktan çıkarıp oldukça etkili bir alternatif çimentolama malzemesinin üretimi için yararlı bir kaynağa dönüştürmeye yardımcı olmaktadır (Chowdhury vd., 2015). Bu külün beton üretiminde kullanılması, betondaki Portland çimentosu miktarının ve ayrıca CO₂ emisyonunun düşürülmesini sağlamaktadır. AK ile yapılan betonların test

sonuçlarına göre, betonun belirli özelliklerini iyileştirmek için betonda bağlayıcı olarak kullanılabileceğini kanıtlamıştır. Belli bir miktar çimentonun, kül ile değiştirilmesi beton ürünlerin maliyetini de düşürdüğü konusunda çalışmalar mevcuttur. Ulaşılan bu verilere göre AK'nin inşaat alanında kullanılması iki yönlü bir sorunu çözmektedir: atıkların bertaraf edilmesi ve beton ürünlerde çimentonun ikame edilmesidir. AK'nin kimyasal bileşimi, beton endüstrisinde kullanımı için çok önemli bir faktördür. Bu bileşim, AK yetiştirme alanı ve koşulları, toprak ve AK tipi, yakma parametreleri vb. gibi farklı faktörlere bağlıdır. Kimyasal bileşim çok geniş bir aralıkta değişebilmektedir (Nagrokiene ve Daugela, 2018; Vassilev vd., 2013).

Beton yollarda kullanılan beton türlerinin yüksek kaliteli, yüksek basınç ve çekme dayanımına, çevre koşullarına karşı yüksek dayanıklılığa (durabilite) ve yüksek aşınma direncine sahip olmalıdır. Geleneksel betonların basınç dayanımları yüksek olmasına rağmen çekme dayanımı, yorulma dayanımı, deformasyon kapasitesi, aşınma dayanımı, tokluk ve kayma dayanımı düşüktür (Singh ve Kaushik, 2003). Betonda yüksek dayanım sağlandıkça gevrekleşme artar. Buna bağlı olarak sünekliğinde azalma meydana getirir. Yüksek dayanımlı betonlarda bu dezavantajları azaltmak için lif (fiber) takviye edilir. Kendi yapısal özellikleri barındıran lif grupları, beton matrisine üç boyutlu yayılarak betonun mekanik özelliklerini güçlendirirler.

Polipropilen (PP) liflerin kullanımı 1960'lı yıllar olarak gözüксе de aslında yüzyıllardır saman ve hayvan kıllarının kullanımının teknoloji ile günümüze uyarlanmış halidir (Karahana, 2006). PP lifler, petrokimya ve tekstil sektörünün geliştirdiği polimer elyaflardan olup termoplastik grubuna ait hafif ve çok çeşitli boyutlarda üretilen malzemelerdir (Balkan, 2006). Hidrokarbonlar polimerler olan bu lifler, hidrofobik yapısı sayesinde karışım içinde çimento ile zayıf bağlar kurar. Kurulan bu yapı nedeniyle düşük sıcaklıklarda erime, tutuşma özelliği gösterir. Bunun yanı sıra düşük çekme dayanımı ve düşük elastisite modülüne sahip olması PP lifleri plastik şekil değiştirme yapmasına sürüklemektedir.

Beton matrisi içinde mikro ağ yapısı kuran PP lifler üç boyutlu çalışma gösterirler. Oluşan ağ yapısı sayesinde betonun zayıf özelliklerini iyileştirir. Hafif bir malzeme oluşu sebebiyle diğer donatı sistemleri kadar (kümes filesi, hasır demir, metal elyaf

vb.) ölü donatı yükü oluşturmazlar. Mevcut en hafif mikro donatı sistemidir. (Karahana, 2006). PP lifler genellikle organik (bitüm) ve inorganik (çimento, alçı vb.) bağlayıcıların dayanıklılığını (durabilitesini) arttırmak ve mikro donatı olarak görev alması için yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu liflerin uygulanmasının kolaylığı, fazla işçilik gerektirmemesi, çürüme gibi problemler oluşturmaması ve ilave edilen ürünlerin kalitesini arttırması dünya üzerinde tercih edilmesini sağlamıştır (Bahadır, 2010).

1.1 Çalışmanın Amacı ve Özeti

Bu çalışmada GDA, doğal agrega (DA) ve Kastamonu Şeker Fabrikası'nın atık malzemesinden elde edilecek farklı karışım oranlarına sahip doğa dostu silindir ile sıkıştırılmış beton (SSB) türü üretmektir. Çalışmadaki beton türünün karayollarında kullanılabilirliği hedeflenmiştir. Yapılan bu çalışmada karşılaştırma Karayolu Genel Müdürlüğü'nün belirlediği beton yolların standartlarından ve Silindirle Sıkıştırılmış Beton Yol Genel Teknik Şartnamesinden (KGM, 2016) yararlanılarak yapılmaktadır. Atıkların SSB yollar üzerinde kullanılabilirliğinin araştırılacağı bu çalışmada, DA ile üretilen geleneksel betonda kullanılan agrega, GDA ları ile %0; %25; %50 ve %100 oranlarında yer değiştirilerek sonuç elde edilecektir. Betonun fiziksel ve kimyasal özelliklerini iyileştirmek ve incelemek amacıyla endüstriyel atık olarak Şeker Fabrikası atığı olan şeker fabrikası atık külü (AK) %0; %7,5; %15; %30 oranında çimento ile yer değiştirilerek ve hacimce %0; %1; %2; %4 oranında PP lifli ve lifsiz beton karışımlı numuneler üretilecektir. Özetlenen bilgiler ışığında, GDA ile şeker fabrikası atığı AK ve PP lif katkılı SSB üretilmesinin beton yollar üzerinde kullanılabilirliği açısından karışımlar üzerinde fiziksel ve mekanik deneylerin sonuçlarının kıyaslanmasıdır.

1.2 Çalışmanın Kapsamı

Çalışmanın ilk bölümü, tez çalışmasını ortaya çıkaran sorunlar, çözüm alternatifleri, çalışmanın amaçları ve özetleri yer almaktadır.

Çalışmanın ikinci bölümü, literatür çalışması yer almaktadır. Bu bölümde çalışmada kullanılacak malzemelerin özellikleri incelenmiştir.

Çalışmanın üçüncü bölümü, metot ve yöntemini içerir. Çalışmada kullanılan deney yöntemleri, malzeme miktarları ve uygulama detayları mevcuttur.

Çalışmanın dördüncü bölümü, sonuç ve tartışma bölümü yer almaktadır. Bu bölümde diğer çalışmalarla karşılaştırma, yapılan çalışmanın eksik ve zayıf yönleri bulunmaktadır.

Çalışmanın beşinci bölümü, sonuç bölümüdür. Laboratuvar ortamında elde edilen deneysel bulgular doğrultusunda, test sonuçları tartışılarak, SSB karışımında tasarlanan GDA, AK ve PP liflerin kullanımının yollarda onarım ve kaplama tipi seçimi hakkında önerilerde bulunulmuştur.

2. LİTERATÜR TARAMASI

Günümüzde artan araç sahipleri ve araç çeşitleri miktarı ile yolculuk talepleri de artmıştır. Akıllı ulaşım sistemlerinin de hayatımızda yer almaya başlamasıyla birlikte oluşan bu ihtiyaca karşılık ulaştırma politikaları da değişmektedir. Mevcut üstyapıların doğru bakım-onarımı ile yenilenmesi, mevcut üstyapıların trafik kapasitesinin artırılması, akıllı ulaşım sistemlerinin mevcut karayollarına optimizasyonu, geri dönüşümlü malzeme kullanımı ile düşük karbon salımlı modern ulaşım ağı sağlanması başta gelen stratejilerdendir. Bu stratejilerdeki en önemli unsur kullanılan hammaddedir. Özellikle 1970'lerde yaşanan petrol krizinden sonra birçok Avrupa ülkesinde beton yolların yapımı artmıştır. Beton yollar, şehir içi ulaşım ağlarında kullanılabildiği gibi ağır taşıt trafik hacminin yüksek olduğu, esnek üstyapılarda mevcut tabanların yetersiz olduğu alanlarda kullanılmasına alternatif bir çözümdür. Servis süresi boyunca yollar, özellikle çatlama, çatlama ve tekerlek izi gibi çeşitli bozulma türlerine maruz kalmaktadır (Wang vd., 2018). Bu kaplamaları güvenli durumda tutmak ve maliyetli onarım işlerinden kaçınmak için periyodik rehabilitasyon operasyonları gereklidir (Ashrafian vd., 2020). Bu nedenle, dayanıklılığı ve sertliği hesaba katan ekonomik kaplama yapım yöntemlerinin bulunması gerekli hale gelir. Bunun için, evrimsel bir teknoloji olarak kabul edilen üstyapı kaplamalarında SSB'nin kullanılması araştırmacılar tarafından ilgi çekici bulunmuştur (Ali vd., 2019). Kullanılan malzeme, isteğe bağlı olarak çimentolu katkılarla sert, sıfır sarkma çakıl, çimento ve su karışımıdır (Aljerf, 2018). Bu karışım daha sonra, yüksek sıkıştırma gücüne sahip finişerler gibi özel ekipman veya kompaktör silindirleri (Caijun vd., 2016) gibi ekipmanlar kullanılarak yerinde sıkıştırılır. Taze durumda, SSB hafif nemli bir toprak gibi davranır, ancak sertleşmiş durumdayken sıradan beton gibi davranır (Al Baghdady ve Khan, 2018). SSB, iki farklı uygulama boyunca gelişmiştir. Birincisi, barajlar ve büyük yapılar için, ikincisi ise yollar (döşeme) için SSB'dir. Karışım hesapları, yapım yöntemleri ve yerleştirme yöntemleri SSB tipine göre farklılık göstermektedir (Abu-Khashaba vd., 2014). SSB'nin oluşturduğu bir olumsuzluklardan biri olarak 50 km/sa aşan hız durumlarında yüzey durum yapısının düzgün olmaması trafikteki sürüş konforunu azaltmaktadır. Bu tarz durumlar yaşanmaması için çözüm olarak yüksek yoğunluklu kaplama makinesi (high-density payers) kullanılmaktadır

(Yetim ve Yılmaz, 2020). SSB için yapılan deney yöntemlerinin bazıları şunlardır (Harrington vd., 2010; Jittbodee ve Somnuk, 2003; Mehta ve Monteiro, 2006); Kıvam test yöntemi, zemin sıkıştırma yöntemi, optimum çimento hamuru hacim yöntemi, katı süspansiyon modeli.

Ekolojik olarak sürdürülebilirliğin temelinde, sınırlı miktarda olan kaynaklar ile hem bugünü hem de geleceğin ihtiyaçlarının karşılanması ve bu kaynakların devamlılığının sağlanması yer almaktadır. Bu yüzden mevcut doğal hammaddenin tüketim hızını yavaşlatılarak, yenilenme hızından daha düşük olması istenilen bir durumdur (Küçük ve Güneş, 2013). Bu amaç için ülkeler birçok çevre uygulamaları ve strateji planı yapmaktadır. Erol ve Özmen (2018), tarafından yapılan bir çalışmada çevresel sürdürülebilirliği geliştirecek uygulamaların sonucunda su kullanımı, enerji tüketimi, yakıt tüketimi, atık üretimi, geri dönüşüm işlemleri, çevresel kirlilik, gürültü ve arazi kullanım konularından avantaj elde edilebileceği vurgulanmaktadır. Çevre stratejilerden birçoğu da atmosferdeki ısıl dengeyi sağlayan sera gazı salınımları ile ilgilidir (Erol ve Özmen, 2018). Enerji tüketimin, bilinçsiz kaynak kullanımın, yanlış üretim teknolojilerin, ulaşım kaynaklarının gereksiz kullanımların sonucunda topluma ve çevreye zarar veren miktarlarda gaz salınımı olmaktadır.

Atık miktarındaki artışın sonucunda taşıma ve depolama maliyetleri ve depolama alanlarında yaşanan yer sıkıntısı üst seviyelere ulaşmaktadır. Özellikle gelişmekte olan ülkelere katı atık yönetim planlarının uygulanamaması katı atıkların taşınması, depolanması, bertarafı açısından problemler oluşturmaktadır. Bu nedenle katı atık yönetiminin sağlanması ve çevrenin korunması için yeni yasal düzenlemeler, atıkların bertarafı için yeni teknolojiler sağlanması gerekmektedir. Endüstriyel atıkların arıtma ve uzaklaştırma yaklaşımları maalesef, evsel atıklarınki kadar kolay ve daha az masraflı değildir. Çünkü endüstriyel atıklar evsel atıklar gibi tehlikesiz değildir. Katı atıkların yönetiminin iyi yapılması, çevre sağlığı açısından oldukça önemlidir. Katı atık yönetimi atık oluşumunu önleme, yeniden kullanım, geri dönüşüm, geri kazanım ve düzenli depolama aşamalarından oluşur. Atıkların oluşmasını önlemek ardından geri dönüşümünü, geri kazanımını ve yeniden kullanımı sağlamak atık oluşumunun fazla olduğu bölgelerde katı atıkların kontrol edilmesi için önemli unsurlardır. Günümüzde yol kaplama yapımında atık malzemelerin kullanımı giderek artmakta ve

performansları ile ilgili olumlu raporlar bulunmaktadır. Atık malzemeler iki genel kategoriye ayrılır:

(i) Geri dönüştürülmüş malzemeler

(ii) Her biri farklı malzemeler içeren endüstriyel yan ürünler.

GDA'ların beton üzerinde kullanımı konusu birçok araştırmacıya konu olmuştur. Depremler, restorasyon ve yıkım çalışmaları katı atıkların önemli bir bölümünü oluşturmaktadır. Bu atıklarının büyük miktarlarda olması çevresel, ekolojik ve ekonomik olarak birçok problem oluşturmaktadır (Eshtewi, 2021). Geleneksel betonda genellikle üç tip agrega kullanımı mevcuttur. Bunlar; doğal, kırma ve geri dönüşüm agregalarıdır (Neville, 2000). Ülkemiz enerji tasarrufu ve çevreyi korumaya yönelik olarak geliştirilen sürdürülebilirlik kavramı ile birlikte, geri dönüştürülmüş agreganın beton sektöründe yeniden kullanımını ve kullanım oranını artırdığı bilinmektedir. GDA'ların tekrar kullanılması çevreye olan zararın ve kirliliğin azaltılacağı gibi iş, zaman ve enerji tasarrufu da sağlamaktadır. Geleneksel betonda olduğu gibi GDA'lerden oluşan beton türünün mekanik, fiziksel ve durabilite özellikleri üzerine incelemesi bütün dünyada farklı agrega türlerini kullanılarak yapılmaktadır (Oikonomou, 2005). Geleneksel beton üretiminde yaklaşık %12 çimento, %8 karışım suyu ve %75 agrega kullanılmaktadır. Yüksek miktarda kullanılan agrega, ekolojik dengeyi büyük oranda etkilemektedir (Mehta, 2002). GDA'nın beton üretiminde kullanımı doğal hammadde miktarını ve tüketilen enerjiyi azaltmaktadır. Bu sayede sürdürülebilir bir beton elde edilmektedir (Pimplikar ve Sonawane, 2013). Ekonomik olarak bakıldığında normal koşullarda üretilen geleneksel beton hacminin %40'ını kaplayan iri agreganın 1 m³ hazır beton üretim maliyetinin yaklaşık %14'ü, %5 oranında taş unu ile ele alındığında %19-20'sini oluşturmaktadır. Yani beton üretimi için harcanan toplam maliyetindeki payı, çimentodan sonra agrega oluşturmaktadır (Arioğlu vd., 1996). GDA'ları birçok özellik bakımından bilinen DA'lara göre farklılık göstermektedir. Çünkü GDA'lar, DA yüzeyinin çimento hamuru ile kaplanıp sertleştikten sonra betona kırılma işlemi uygulanarak oluşur. İçerisinde bulunan çimento hamuru, yeni oluşan GDA'nın yoğunluğunu, su emme kapasitesini, aderansını, aşınma direncini ve bunun gibi özellikleri etkilemektedir (Çelik, 2007).

GDA'nın yüzeyindeki çimento hamuru ve boşluklu yapısından dolayı su emme oranı DA'ya göre daha yüksektir. Yapılan deneyler sonucu GDA'nın su emme kapasitesi %4 ile %12 arasında değişim göstermektedir. Bu değerler DA için %0,5 ile %1 arasındadır. GDA'nın yoğunluğu ise düşüktür (Katz, 2003). Turanlı (1998), çalışmasında beton atıklarını yeni beton yapımında, iri agrega olarak kullanmış ve GDA ile üretilen betonun normal betona göre basınç dayanımının %12 daha az olduğunu görmüştür (Turanlı, 1998). Demirel (2012), çalışmasında, kırma iri ve ince agrega yerine %10, 20, 30, 40, 50 oranlarında GDA kullanmış ve GDA ikame yüzdesi arttıkça beton basınç dayanımının düştüğünü belirtmiştir. Sonuç olarak GDA'nın yer değiştirme oranı arttıkça beton basınç dayanımının benzer veya çok az değişiklik gösterdiğini belirtmiştir (Demirel, 2012).

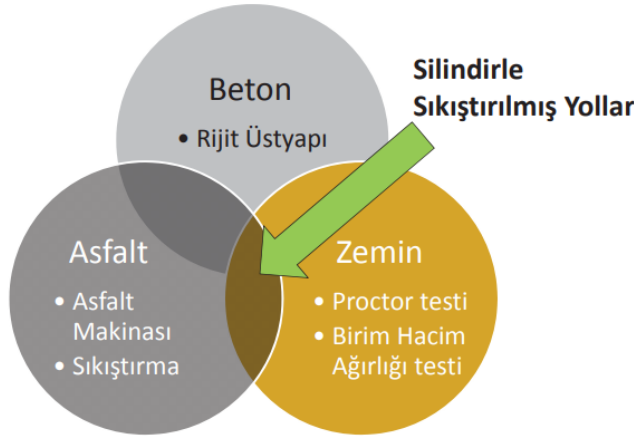
Çevresel kirlilik olarak aynı problem endüstriyel atıklarda da mevcuttur. Bu yüzden çalışmalarda geri kazanılabilir atıkların, hammadde olarak kullanımı üzerine yoğunlaşmıştır. Fabrika üretimleri sonucu ortaya çıkan atık malzemelerin ya da yan ürünlerin değerlendirilmesi sonucu mevcut olan doğal kaynakların kullanımını azaltarak doğa tahribatını önlemektedir. Aynı zamanda atık malzemenin depolanmasından doğacak olan toprak kirliliğini de minimum düzeye indirmektedir. Ancak elde edilen her atık maddenin kullanımı, hammadde ya da katkı olarak, mümkün değildir (Atış vd., 2016). Endüstriyel katı atıkların (kül, cüruf, metal parçaları, odun parçaları, tekstil parçaları, cam kırıkları, hurda lastikler) çevreye verdiği zararın önlenmesi amacıyla kaynağında yok edilmesi veya çevreye zarar verme olasılığının en aza indirgenmesi gerekmektedir. Bu atıkların neden olduğu sorunlar arasında, tarım ürünlerine zarar verme, yağmur ve rüzgârla etrafa yayılma, tozlanma, toprakta süzülme dolayısıyla zehirli madde taşınması ve radyasyon sayılabilmektedir. Bu çevre sorunları nedeniyle, suyun ve havanın kalitesi, doğal hayat ve bölgenin ekonomik durumu bakımından olumsuz sonuçlar meydana gelmektedir (Pehlivan vd., 2014). Yaygın olarak bilinen bu puzolanların dışında endüstriyel atıkların değerlendirilmesine ilişkin yapı malzemeleri çalışmaları devam etmektedir.

Beton heterojen içyapısı nedeniyle kırılma anında düzensiz bir dağılım göstermektedir. Agrega ve çimento matrisi arasındaki zayıf bölgedeki mikro çatlaklar daha büyük çatlak ve kırılmaları oluşturmaktadır. Bu içyapı, betona uygulanan

gerilmelerin yeterli miktarda iletilemediği ve zayıf bağa sahip alanlarda taşıma kapasitesini aşan ani çökmeler gösterir. Betonda yaygın olarak ilave edilmeye başlayan PP lifler, mühendislik bakımından eksik olarak görülen özellikleri iyileştirmek ve ani çökmeleri önlemek için iyi bir çözüm olmuştur (Bayrak, 2018).

2.1 Silindirle Sıkıştırılmış Beton (SSB)

Silindirle Sıkıştırılmış Beton (SSB), çelik bandajlı ve lastik tekerlekli silindirlerle kuru kıvam denilen sıfır çökmeli (zero-slump) bir beton karışımının sıkıştırılarak yerleştirilmesiyle oluşan rijit kaplamadır. Beton karışımı su, kum, agrega (doğal çakıl, kırılmış, geri dönüştürülmüş), çimento ve diğer malzemelerden (uçucu kül, cüruf vb.) üretilebilir. Düşük gözenekli beton, yüksek mukavemete ve uzun süreli dayanıklılığa yol açar ve bu nedenle, sıkıştırılan malzemenin yeterince paketlenmesi için sıkıştırma prosedürlerini optimize etmek önemlidir.



Şekil 2.1 Kaplamaların benzer özellikleri ve testler (Yaman, 2014)

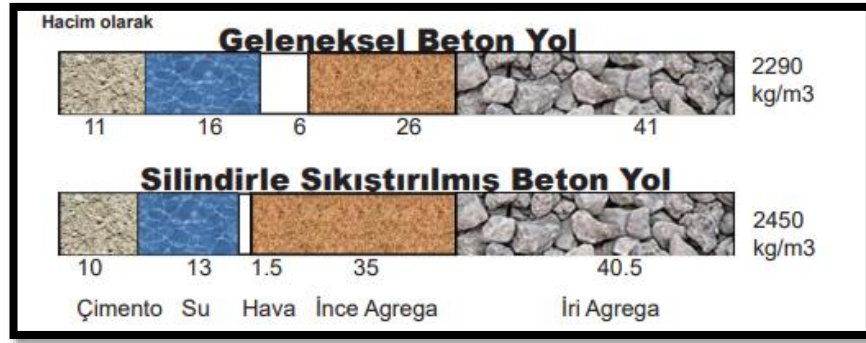
Amerikan Beton Enstitüsü (ACI), Çimento ve Beton Terminolojisinde (ACI 116R-99), silindirle sıkıştırılmış betonu (SSB), "silindirle sıkıştırılan beton; sertleşmemiş durumdayken bir silindiri destekleyecek beton" olarak tanımlar. Tamamen sıkıştırılmış, sertleştirilmiş SSB'nin özellikleri geleneksel olarak yerleştirilmiş betonunkilere benzer (ACI, 2010). SSB, dünya çapında uygulanması artan, alternatif bir karayolu-üstyapı kaplama yöntemidir. SSB isminin, hazırlanan karışımın ağır silindirle sıkıştırma yöntemiyle elde edilmesinden alır. SSB için hazırlanan karışımlar titreşimli silindir altında sabit kalacak kadar sert fakat çimento matrisinin dağılmasına

müsaade edecek kadar nem içeriğine sahiptir. Geleneksel betonla kıyaslandığında SSB, kuru kıvam özelliği yani düşük miktarda su/bağlayıcı oranına sahiptir. Geleneksel beton karışımı ile SSB arasındaki bir diğer fark ise maksimum sıkıştırma derecesi elde edilebilmek için kullanılan ince malzemenin geleneksel betona göre daha fazla kullanılmasıdır (Lopez-Uceda vd., 2018). Geleneksel betonda bulunan mevcut çimento-uçucu kül oranı ağırlığın %15'i kadar olurken SSB için yaklaşık %12'ye düşmektedir (Harrington vd., 2010). Diğer bir fark ise agrega granülometrisidir (PCA, 2021). Betonlarda iskelet görevini üstlenen agregalar, aynı zamanda betonunun kalitesini ve maliyetini belirlemektedir. SSB için kullanılan agregalar hacimde %85'ten fazla olması nedeniyle agrega granülometresinin doğru seçilmesi gerekmektedir. Bu betonlarda en büyük agrega çapı (d_{max}) ve ince agrega miktarı, geleneksel betona göre farklılıklar gösterir. Agrega granülometresi, SSB'nin sıkışma miktarını etkilemektedir (Mardani vd., 2020). Karışımın ayrışma yapmaması ve düzgün yüzey görüntüsü elde edilebilmesi için en büyük tane boyutunun (d_{max}) yüksek seçilmemesi gerekmektedir (PCA, 2021). SSB kaplamaların düşük hidrasyon ısısı sayesinde yolların erken trafiğe açılması özelliğinin yanı sıra inşaatı kolay, hızlı ve donatı gerektirmeyen uygulamaları sayesinde yol, baraj, uçak pistleri gibi uygulamalarda maliyet kazancı sağlamaktadır (Delatte vd., 2003; PCA, 2005).

SSB kaplama uygulamaları yaklaşık tabaka kalınlıkları 15-25 cm arasında değişen, finisher denilen asfaltlama makinesi yardımıyla serilmekte ve titreşimli ağır silindirler ile birkaç pas sıkıştırılma işlemi gerçekleştirilmektedir (Yetim ve Yılmaz, 2020). Nihai sıkışma ilk 1 saat içinde tamamlanır. Geleneksel beton gibi yapılan işlemlerde donatı gerektirmez. Derz kesimi zorunlu olmayıp ihtiyaç halinde derz aralığı geleneksel betona göre bir miktar daha geniş bırakılır (Harrington vd., 2010).

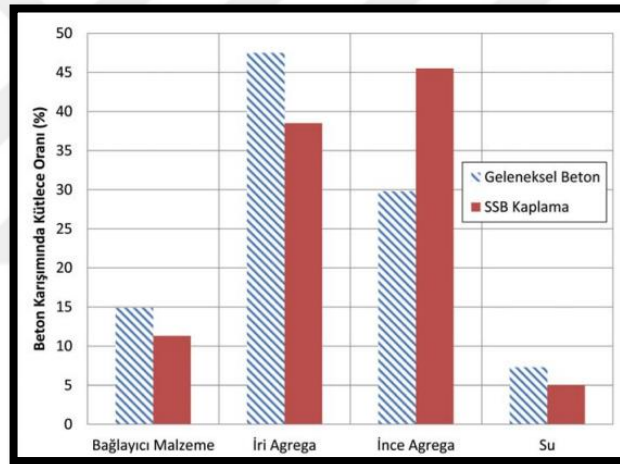
2.1.1 Genel Özellikler

SSB'de çimento miktarı genellikle 100 ile 200 kg/m³ arasındadır, su içeriği 100 kg/m³ ile 150 kg/m³ arasında değişir ve hava içeriği %1-3 civarındadır. SSB'de maksimum agrega boyutu 50 mm ile 75 mm arasında değişmektedir.



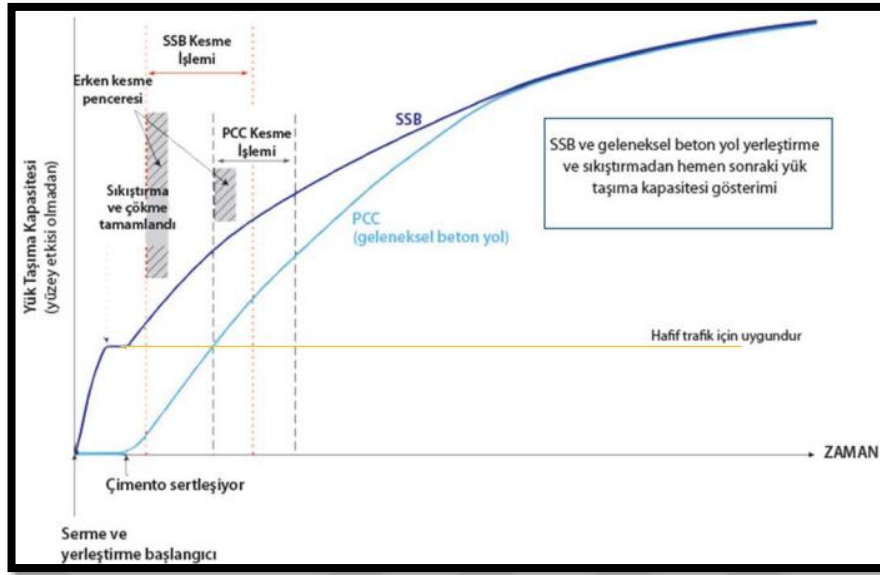
Şekil 2.2 Malzeme karışım miktarları (Yaman, 2014)

SSB tasarımlarında ince taneli agregalar sıkı bir şekilde toplanır. Bu sıkışma, agregalar arasındaki aderans kuvveti sayesinde daha fazla sürtünme direnci göstermesiyle başlangıçtaki taşıma kapasitesinin daha yüksek olmasına sebep olur (ACI, 2011).



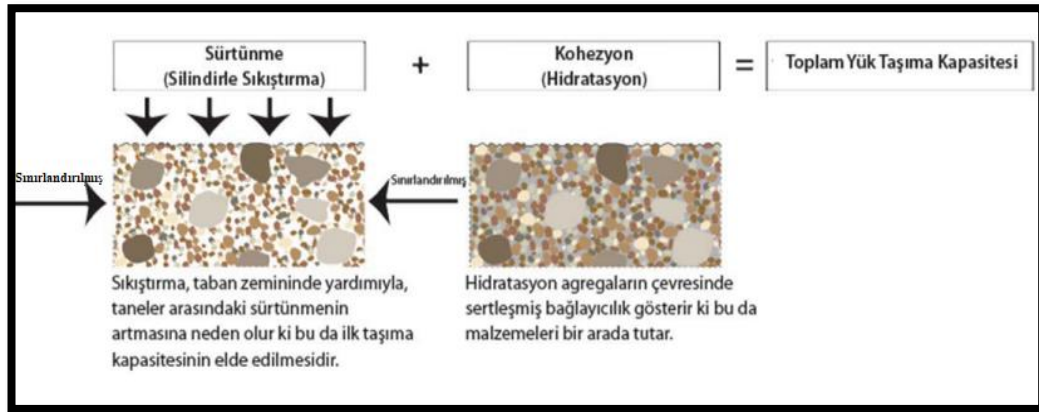
Şekil 2.3 Geleneksel beton ve ssb yol karışım Oranı (Abut, 2017)

Beton yolların inşaatı mekanik (oturma) ve kimyasal (hidratasyon) olarak iki ana proses içerir. Mekanik (oturma) prosesi, geleneksel betonlar için serici (finisher) denilen titreşim mekanizmasıyla gerçekleşir ve fazladan sıkıştırma işlemini uygulamaya gerek kalmaz. SSB için mekanik proses, yüksek yoğunluklu veya geleneksel sericiler ile başlar, ağır çelik tambur ve lastik silindirlerle sağlanır. Her iki kaplama türünde de serim bittikten sonra, zaman içerisinde farklı dayanım gelişimleri gösterirken, bir süre sonra birbirine benzemeye başlar. Şekil 2.4'te bu farklar grafik üzerinde görülmektedir.



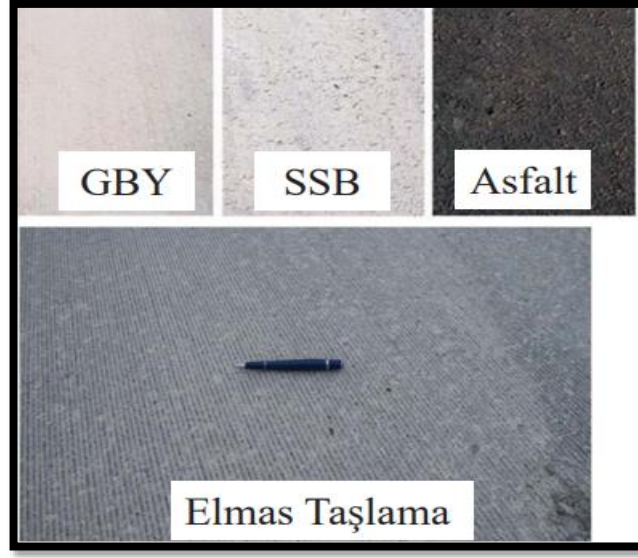
Şekil 2.4 Erken yük taşıma kapasitesi (Yaman, 2014)

Geleneksel beton, serimden sonra agregaların kenetlenmesini sağlayan çimento hamurunun hidrasyonu başlayana kadar plastik kıvamdadır. Bu nedenle geleneksel betonda hafif araç trafiği için yeterli yük taşıma kapasitene gelene kadar belirli bir zaman gerekmektedir. SSB’de ise serimden hemen sonra bu kapasiteye ulaşabilmektedir. Erken taşıma kapasitesi, agregalar arasında sürtünmeye ve birleştirmeye neden olan sıkıştırma enerjisi sayesinde sağlanır.



Şekil 2.5 SSB toplam yük taşıma kapasitesi (Yaman, 2014)

SSB’nin taşınması, döşenmesi ve sıkıştırılması çok basit ve pratik olduğundan, zaman ve maliyet açısından geleneksel betona göre çok daha ekonomiktir. SSB ayrıca kompozit sistemlerde temel malzeme olarak kullanılabilir (Aghabaglou ve Ramyar, 2013).



Şekil 2.6 Kaplamaların yüzeyleri ve elmas taşlama (Yaman, 2014)

Yüzey dokusu karşılaştırmalarına (Şekil 2.6) göre silindir ile sıkıştırma sonrası asfalta benzer fakat geleneksel beton yola (GBY) göre daha açık ve pürüzlüdür. Servis ömrünce 2 ile 4 yıl arasında ince agregaya kaybı gözlenebilmektedir. 50 km/sa hızı geçen yerlerde yani daha yoğun pürüzlü yüzeyler bileme (grinding) veya elmas taşlama yöntemi uygulanarak oluşturulur (Yaman, 2014).

2.1.2 SSB Üretiminde Kullanılan Malzemeler

SSB içeriği kaba ve ince agregaya, su, çimento, mineral ve kimyasal katkı maddelerinden oluşmaktadır. Su/çimento oranı 0,2-0,4 arasında değişmektedir. Segregasyonu önlemek, işlenebilirliği arttırmak, yapılan betonun ekonomik ve kaliteli oluşunu belirlerken kullanılan en önemli unsur doğru agregaya seçimidir. SSB karışımının %70-80 oranını agregalar oluşturur. Kaba agregaya olarak kullanılan ürünler; çakıl (kırılmış veya kırılmamış), kırma taş, geri dönüşüm betonlarıdır. Kırılmış ürünler SSB'lerde sıkıştırması yuvarlak çakıllara göre biraz daha zor olsa da taşıma ve yerleştirme esnasında segregasyon riski daha düşüktür. İnce agregaya olarak kullanılan ürünler; doğal ve kırılma ile oluşan kum veya her ikisinin dahil olduğu karışımlardır.

Tablo 2.1 Kullanılan malzemelerin kıyaslanması

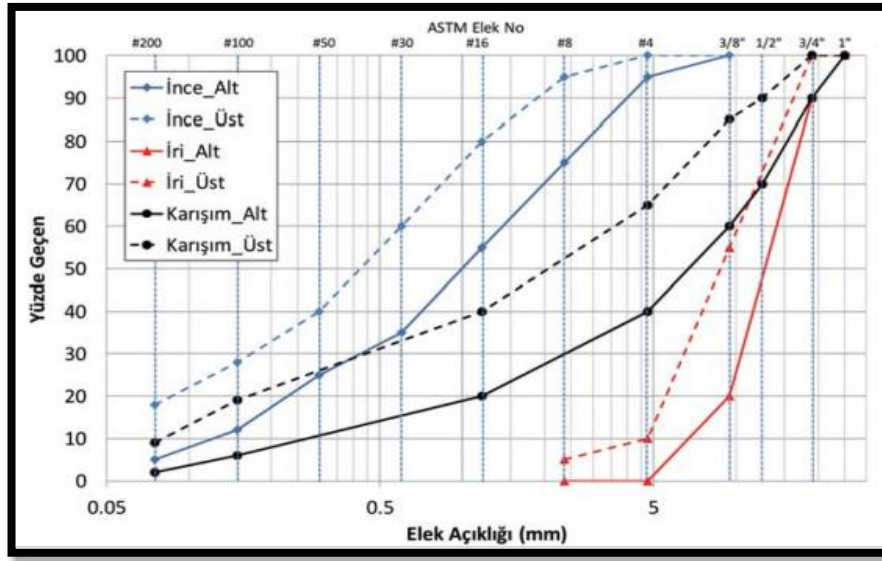
Malzemeler	Mutlak Hacim	
	SSB	GBY
Bağlayıcı	9%	10%
Su	10%	15%
İnce Agregası	34%	23%
Kaba Agregası	44%	46%
Hava	3%	6%
Toplam	100%	100%
Çimento Hamuru	22%	31%
W/C Oranı	0.35	0.48
İnce Agregası Oranı	0.44	0.33

Yüksek oranda silt parçalarına sahip kumlar (plastik olmayan), mineral filler olarak kullanıldığında çimento ihtiyacını biraz düşürmektedir. Bünyesinde yüksek oranda kil içeren karışımlarda ihtiyaç duyulan su oranı artar ve buna bağlı olarak rötre ve çatlaklar meydana gelir. Betonda oluşan bu deformasyonlar dayanımı ve dayanıklılığı azaltmaktadır. SSB’lerde agrega gradasyonu geleneksel betona göre farklıdır. SSB için kullanılan max agrega büyüklüğü 25 mm ve daha altıdır. SSB yollara ilişkin PCA (Portland Çimento Birliği) tarafından hazırlanmış şartnamede belirtilen agrega gradasyonu Tablo 2.2’de verilmiştir (PCA, 2005).

Tablo 2.2 Agregası gradasyon sınırı (PCA, 2005)

Elek Boyutu, mm	Elekten Geçen, %
1” (20 mm)	100
3/4” (19 mm)	90-100
1/2” (12,5 mm)	70-90
3/8” (9,5 mm)	60-85
No.4 (4,75 mm)	40-60
No.16 (1,18 mm)	20-40
No.100 (150 µm)	6-18
No.200 (75 µm)	2-4

Kullanılacak agregalardaki zararlı madde yüzdesi ağırlığının %2’ini aşmamalıdır. Karışıma dahil olacak bütün agregalar ASTM C33/C33M-18 şartlarını karşılamalıdır.



Şekil 2.7 SSB kaplama karışımında kullanılacak agregaların tane boyu dağılımı (Harrington vd., 2010)

SSB için agregaların serbest nem oranı incede %4, kabada %6 sınırı mevcuttur. İnce agregalar için max serbest nem oranı kontrol altında tutulmalıdır. Karıştırma esnasında serbest nem yüzdesindeki her bir saatlik değişim %0,5'ten fazla olmamalıdır. Beton santralleri içinse sekiz saatlik karıştırma süresince değişim %2 sınırında kalmalıdır. İri agregalarda serbest nem içeriği şantiye ortamına bağlı olarak minimum değişim sağlanması istenmektedir (TÇMB, 2018). ASTM C33/C33M-18 şartlarına ilave olarak SSB'de kullanılacak iri agregalar nitelik olarak aşağıdaki tabloda bulunan şartları sağlamalıdır.

Tablo 2.3 İri agrega özellikleri (TÇMB, 2018)

Nitelik	Özellikler
Şekil	Boşluk yüzdesi %48'den az olmalı
Su emme	Su emme kütlesinin %1'i geçmemeli
75 mikron elekten geçen malzeme miktarı	Maksimum %1
Hafif malzemeler	Hafif malzemelerin örneğin kömür ve linyit kütlesinin %1'i geçmemeli
Kırılma Değeri	Kırılma değeri en az 110 kN olmalı

İnce agregaların kalitesinin yüksek, temiz sulardan ve ocaklardan, kırmataş ve benzeri ürünlerden oluşmalıdır. Oluşturulacak karışımın kalitesinin yüksek olması için bitkisel maddelerin ve şist, toz, kir gibi yabancı maddelerin bünyesinde barındırmaması,

mevcut ise bünyelerinden farklı metotlarla arındırılması gerekmektedir. SSB için uygun ince agrega toz (0,0075 mm'den düşük) miktarı %6-20 arasında ve incelik modülü 1,58-2,7 arasında olmalıdır (TÇMB, 2018). SSB karışımında ince agrega gradasyonunun düzgün tespit edilmesiyle; işlenebilirlik artmakta, sıkıştırılabilirlik artmakta, agregaların birbiri arasındaki boşlukları doldurarak dayanımında artış olmakta, geçirimsizliği artmakta, boşlukların dolmasıyla daha az miktarda su ve çimento gereksinimi duyulmakta ve kohezyon artarak segregasyon önlenmektedir (Sağlam, 2022). Tablo 2.4'te ince agregalarda aranan özellikler görülmektedir.

Tablo 2.4 İnce agrega özellikleri (TÇMB, 2018)

Nitelik	Özellikler
Şekil	Boşluk yüzdesi %48'den az olmalı
Su emme	Su emme kütlesinin %1'i geçmemeli
75 mikron elekten geçen malzeme miktarı	Maksimum %25
Hafif malzemeler	Hafif malzemelerin örneğin kömür ve linyit kütlesinin %1'i geçmemeli
Kırılma Değeri	Kum ile yapılan harcın mukavemeti yıkanmış kum ile yapılanın %85'inden daha az olmamalı

Yeterli stabilizasyon için yeni sıkıştırma işlemi uygulanmış karışımda büyük bir oranda kırılmış malzeme mevcut tutulur. Agregaların en az iki ayrı grubun karışımından (örn: 0/5 mm ve 5/20 mm) oluşması gerekmektedir. Yüzey dokusunun önemsiz olduğu kaplamalarda, ince ve iri agregalar birlikte harmanlanıp depolanabilir. Takviye tabakası için agrega seçimindeki önemli unsur, karışımın sıkıştırılmasıyla ulaşılan yüksek iç dayanım yeteneğidir. Stabilitate, anlık taşıma gücü testiyle, CBR testiyle aynı ekipmanlar yeni sıkıştırılmış karışım üstüne uygulanır. Anlık taşıma gücü testindeki indeks değeri 65 üstü olduğunda, SSB'nin yeterli kapasitesini sağlayacağı düşünülmüştür. Kırılmış iri agrega eklendiğinde, bu indeks değerinin üstünde sayılar elde edilmektedir (Çetin, 2009).

SSB için Portland Çimentosu Tip-I (Normal) ve Tip-II (Sülfata direnci arttırıcı) kullanılmaktadır. Eğer erken priz yapması gerektiren koşullar bulunuyorsa Tip-III çimentosu tercih edilebilir. Çimento oranı için kuru karışımın toplam ağırlığının %10-

17 arasında olup, her m³'te 300±30 kg eklenir. Bağlayıcı maddelerin (çimento+uçucu kül) %25-40'ını uçucu küller (C veya F sınıfı) oluştururlar (Çetin, 2009). Kullanılacak uçucu küller ASTM-C618-22 sınıfında bulunan şartlar sağlanmalıdır. Bunun yanında kullanılacak bütün çimentolar ASTM C150-07 standartlarına uygun olmalıdır. Çimentoların 7 günlük hidratasyon ısısının en üst sınırı 300 kJ/kg (75 kal/gr) olarak belirlenmiştir. Bununla beraber çimentodaki sodyum oksit (Na₂O) olarak belirtilen alkali miktarı %0,6'yı geçmemelidir ve bu değerin üstünde değerlerdeki çimentolar kullanılmak zorundaysa laboratuvar ortamında alkali agrega reaksiyonu (hem alkali silis hem alkali karbonat) kontrolleri sağlanmalıdır (TÇMB, 2018).

Kullanılacak karma suyu bütün beton tiplerindeki standartları sağlaması gerekmektedir. SSB için karışıma katılacak karma suyu TS EN 1008 standardını ve CRD-C 400 şartlarını karşılamalıdır. Beton için içilebilir nitelikte temiz ve içeriğinde tuz, yağ, alkali ve asit gibi endüstriyel atıklarla beraber organik atıklarında bulunmaması istenmektedir. SSB için kullanılacak karma suyu miktarı içerdiği agrega ve çimentonun (ya da bağlayıcı bileşen) karakteristik özelliklerini göz önünde bulundurarak hesaplanmalıdır (Sağlam, 2022). SSB tasarımları için kullanılan karma suyu 90-120 kg/m³, su/çimento oranı ise 0,30-0,45 arasında belirlenmektedir. SSB karışımında kullanılacak su miktarı genelde 90-120 kg/m³ arasında bulunmaktadır (PCA, 2021; TÇMB, 2018). SSB'nin kür işlemi için, numune karışımında kullanılacak agreganın soğutulmasında ve yıkanmasında kullanılacak karma suyu da endüstriyel atık, organik atık ve diğer zararlı maddeleri içermemesi gerekmektedir (TÇMB, 2018).

SSB karışımında da geleneksel betonda kullanılan mineral ve kimyasal katkıları kullanılabilmektedir. Bu karışımlar daha az su ihtiyacına ve karıştırma süresine sahip olduğu için katılan kimyasal katkıları SSB'lerde daha düşük etki göstereceğinden daha fazla katkı miktarı gerekmektedir. Yapılan çalışmalar ışığında katılması gereken kimyasal katkıların geleneksel betona göre dört kat fazla olması olumlu sonuçlar elde edilebileceği yönündedir. Su azaltıcılar (yüksek etkili) ve süper akışkanlaştırıcılar, sıkıştırma işleminde betonun stabilitesini azalttığından çok tercih edilmemektedir. Su azaltıcılar (yüksek etkili), karışım suyunu düşürmekte, kıvamını koruyup işlenebilirliği arttırdığı için daha az maliyetli beton üretimine katkı sağlamaktadır (Sağlam, 2022). SSB'lerde süper akışkanlaştırıcılar ise karışım süresini azaltmaktadır.

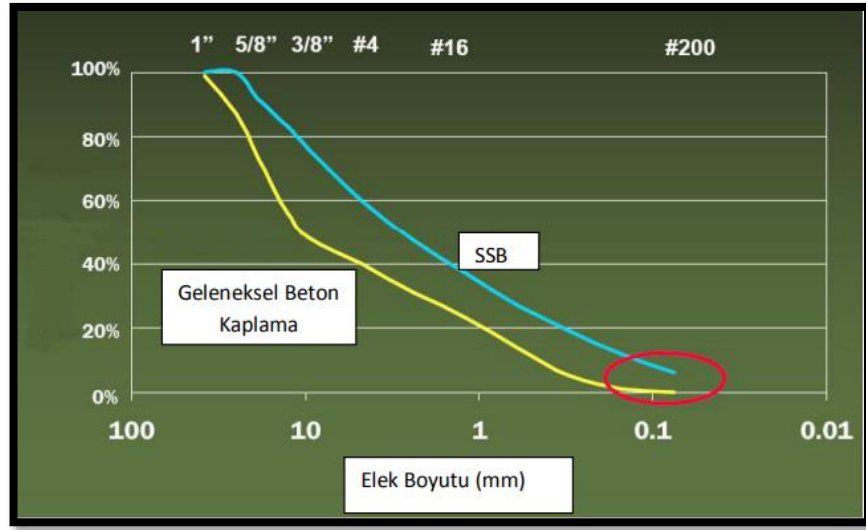
Özellikle polikarboksilat esaslı olan süper akışkanlaştırıcılar, SSB karışımında işlenebilirliği ve üretim kapasitesini arttırmaktadır (Harrington vd., 2010). SSB’lerde kullanılan mineral katkılar (uçucu kül, cüruf ve silis dumanı vb.), beton sıcaklığını azaltarak termik çatlak oluşumunu önler ve dayanımı artırır. Özellikle uçucu külün betonda kullanımı işlenebilirliği artırır. Mineral katkıları sayesinde daha az miktarda kullanılacak olan çimento miktarı ile hem daha ekonomik hem de daha çevre dostu bir beton üretilir (Yaman ve Ceylan, 2013). Şekil 2.8’de SSB için muhtemel varyasyonlar gösterilmiştir.



Şekil 2.8 Beton karışımı için muhtemel varyasyon (URL-1, 2018)

2.1.3 SSB Karışım Tasarımı ve Esasları

Karışım oranlarını saptayabilmek için kıvam testlerini içeren yöntemlerle; karma suyu miktarı, bağlayıcı madde (çimento vb.) miktarı ve içermesi gereken ince ve kaba agrega miktarları belirlenebilmektedir. Bu adımdan sonra serme sıkıştırma işlemleri için istenilen kıvama göre bu oranlar değiştirilebilmektedir. Geleneksel betona göre daha düşük su/çimento, uçucu kül oranına sahip olan SSB’ler aynı zamanda bünyesinde hava kabarcıkları barındırmazlar. SSB için karışım tasarımı, geleneksel beton karışım tasarımıyla ufak farklılıklar olsa da aynı yöntemler uygulanır. Bu farkların nedeni şöyle sıralanabilir; taze haldeki SSB hamurunun kıvamı daha yoğun, normal gradasyondan farklı parametreler kullanılması ve sıkıştırma işlemidir. Gradasyon farklılıkları Şekil 2.9’da gösterilmiştir (Çetin, 2009).



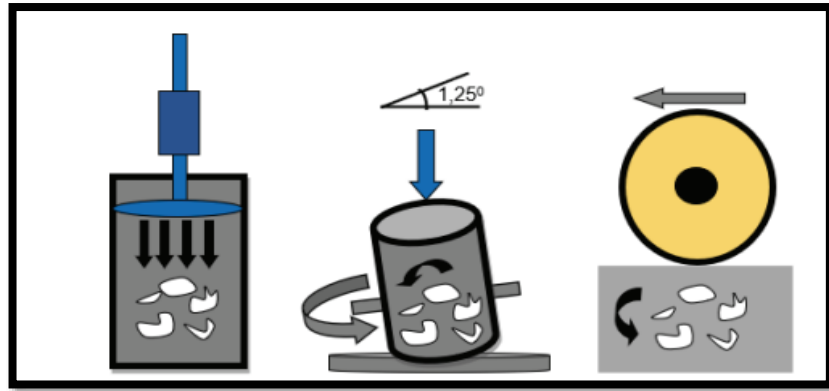
Şekil 2.9 Gradasyon karşılaştırması (Çetin, 2009)

SSB için yapılan karışımlarda genellikle iki metot uygulanır. Bunlar (Harrington vd., 2010);

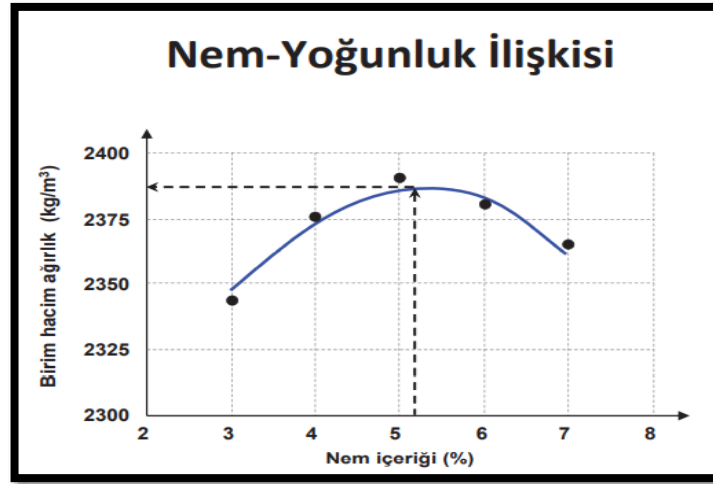
- i. Zemin Sıkıştırma Metodu: Bu metot için önce max sıkıştırma için ihtiyaç olan su miktarı saptanır ve sonra da suya bağlı olarak çimento gibi bağlayıcı malzeme miktarı belirlenir. Bu yöntem çoğunlukla yol uygulamalarında kullanılır.
- ii. Klasik Beton Karışım Tasarımı Metodu: Betonun mühendislik açısından istenilen bütün özellikleri için hazırlanan tasarım yöntemidir. Baraj uygulamalarında genellikle kullanılır.

Betonda segregasyon oluşmaması ve kolay karılma sağlanıp, yüzey düzgünlüğünü arttırmak için en büyük agrega boyutu 16/20 mm ve altı boyutlar kullanımı ile sınırlandırılma önerilmektedir. Genellikle 75 mikronluk elekten geçen ince agrega miktarı ile sınırlıdır. Yeni sıkıştırma işleminden geçen malzemeler, en az sürede trafiğe açılması gereken yol kaplamaları için önemlidirler. Yeni sıkıştırılan malzemelerin, yeterli stabilizasyonu için yüksek oranda kırılmış malzeme karışıma dahil olur (TÇMB, 2020). SSB kaplama tasarımlarında rijit kaplama tasarım yöntemleri takip edilmektedir. Beton tasarımında titreşimli silindiri taşıyabilecek kadar kuru, üretilen hamurun yeterince dağılmasını sağlayacak kadar yaş olmalıdır (Yaman, 2014).

SSB'nin çimento içeriği, toplam kuru karışım ağırlığının %10-17'si arasında olmakla beraber her metreküp için 300 ± 30 kg civarında ağırlığa sahiptir ve çimento-uçucu kül karışımı katkı çimento grubu sıklıkla kullanılır. Çimentonun 28. ve 90. gün benzer basınç dayanımına sahip geleneksel betondaki çimento miktarına kıyasla bir miktar daha azdır. Katkılı çimentodaki mevcut aktif katkılar oransal olarak %50'nin üzerinde olarak görülebilmektedir. Uçucu külün kullanımı SSB tip betonlarda işlenebilirliği arttırırken çatlak kontroлінde olumlu bir rol oynar. Katkılı çimentolar OPC'ye (Ordinary Portland Cement- Geleneksel Portland Çimentosu) göre daha az maliyetlidir ve priz alma süresi ciddi ölçüde daha yavaş ilerlemektedir. Priz alma sürecinin bir miktar yavaş alması bu grup çimentoyla yapılan inşaat işçiliğinde büyük kolaylık sağlamaktadır. Soğuk hava şartlarının olduğu bölgelerde uçucu kül yerine silis dumanı (bağlayıcı madde miktarının %10'u kadar) ikame etmektedir. Çimento stabilizasyonlu granüler malzemeler için su miktarı, kuru malzemelerin ağırlığının %4,5-6,5 arasındadır. Bu oranı belirlemek için zemin sıkıştırma yöntemlerinden olan ASTM D1557'ye göre Modifiye Proktor Deneyi (Yaman, 2014) ve Titreşimli Çekiç Metodu ile hazırlanan karışımlar sıkıştırılarak SSB'nin birim ağırlığı (kuru)- nem miktarı arasında kurulan ilişki ortaya koyulur ve farklı nem içerikli olan seviyeler belirlenir. Bu ilişki kurulduktan sonra optimum nem içeriği, yoğunluk-nem eğrisinin tepe noktası, tespit edilir.

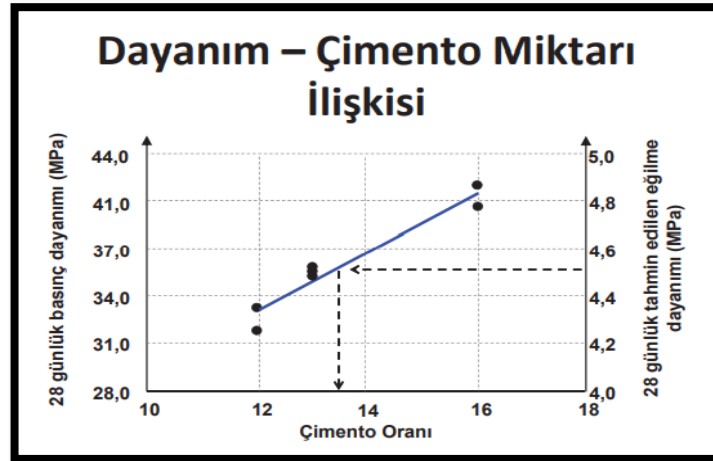


Şekil 2.10 Darbeli, yoğurmalı ve silindir sıkıştırıcıların tipik sıkıştırma mekanizmaları (Shabani vd., 2021)



Şekil 2.11 Optimum nem-yoğunluk ilişkisi (Yaman, 2014)

Modifiye Vebe Kıvam Ölçer Testi gibi deneylerle genellikle taze haldeki malzemelerin titreşim ve aşırı yük bindirme etkisi altında bırakılarak uygun işlenebilirlik noktası belirlenir. Bununla beraber Katı Süspansiyon Modeli ya da Optimum Hamur Hacim Metodu gibi diğer yöntemlerde uygulanabilir (TÇMB, 2020). Beton tasarımında farklı oranlarda çimento kullanılarak deneme numuneler üretilir ve bu numunelerden uygun dayanımı sağlayan dozaj seçilir.



Şekil 2.12 Dayanım- çimento ilişkisi (Yaman, 2014)

İşlenebilirlik

SSB'nin işlenebilirliği, karışımındaki malzemelerin ayrışma yapmadan serilmesi ve sıkıştırması için gereklidir. İşlenebilirlik; çimento içeriğine, su içeriğine, mineral ve kimyasal katkılara, agregaların gradasyonu, agregaların şekli gibi faktörler

etkilemektedir. SSB'nin kıvamı modifiye edilmiş VeBe aleti yardımıyla ölçülür ve test metodu CRD-C 53'te detaylıca yer verilmiştir. Çoğu Corps of Engineers, kütle SSB uygulamasında VeBe kıvamları için 12-15 arasında olan değerlerdeki karışımlar tercih edilmiştir. VeBe süresi 30 saniyeden fazla olan karışımlarda da başarılı sonuçlar elde edilmiştir. Bu aralıklarda üretilen SSB'ler işlenebilirliği yüksek, yerleştirilmesi kolay ve tabakalar arasında oluşan derzler birbirleriyle konsolide olmuştur. Daha kuru kıvamlı olan karışımlar, çimento gibi bağlayıcı maddelerin daha iyi etki göstermesi ve yüzey düzgünlüğünün daha az deforme olmasını sağladığı için daha yüksek ekonomidir (DSİ, 2014).

Dayanım

SSB'nin mukavemeti geleneksel beton gibi yapının tasarımıyla belirlenir. Betonlarda dayanımın büyük çoğunluğu bağlayıcı malzeme içeriğine bağlıdır. SSB; malzeme özellikleri, ince malzeme miktarı, karışımın uygulanabilirliği ve nem içeriği olarak geleneksel betondan farklıdır (DSİ, 2014). SSB ile temel katmanlarda kullanılan çimento ile işlenmiş malzemeler birbirine karıştırılmamalıdır. Her iki malzemede bağlayıcı malzeme (çimento), agrega ve düşük su içeriği ile karıştırıldıktan sonra silindir yardımıyla sıkıştırma işlemi uygulanır. Fakat çimento ile işlenmiş malzemeler daha düşük çimento oranına sahip olduklarından, daha düşük dayanım göstermektedir. Kaplama işlemlerinde SSB terimi, yalnızca yapısal betonlar geleneksel betonların basınç dayanım (28 günlük basınç dayanımı minimum 25 MPa olan beton türleri) parametresiyle benzerlik gösteren malzemeler için kullanılır (TÇMB, 2018).

Lif (fiber) içeren ya da içermeyen bütün betonlar için basınç dayanımı aranan en önemli özelliklerdendir (Auta vd., 2015) (Kiyanets, 2018). SSB içinde geleneksel betonda olduğu gibi bir takım deney testlerinin başarıyla tamamlanması gerekmektedir. Bu testler (ACPA, 2014);

i. Titreşimli tabla (ASTM C1176-92)

ii. Proctor testi (ASTM C1557)

iii. Karot testleri (ASTM C42)

Dayanıklılık

SSB'nin durabilitesi; dayanımına, bağlayıcı malzeme oranına, kullanılan agregaların kalitesine ve sıkışma oranına bağlıdır. Seçilen agreganın ve bağlayıcı malzemenin kriterlere uygun tipte ve oranda kullanılması halinde SSB için fiziksel (aşınma, erozyon) ve kimyasal (alkali-agrega reaksiyonu, sülfat saldırısı) reaksiyonlara karşı mükemmel sayılabilecek dayanıklılık gösterir. Zayıf karışımlı SSB'ler, düşük oranda bağlayıcı malzeme kullanıldığı için yüksek bağlayıcılı SSB'lere göre daha geçirgen bir halde üretilir. Bu tarz tasarımlarda proje özelliğine bağlı olarak zayıf tip SSB'ler iç bölgelerde uygulanırken, yüksek oranda bağlayıcı malzeme ile üretilen SSB'ler dış kaplamalarda ya da geçirimsiz membran kullanımı ile izolasyonu sağlanmalıdır. Hava katkısız üretilen SSB'lerde doygunluk kritik noktalarda olduğu zaman, donma-çözölmeye karşı zayıflık gösterebilmektedir. Fakat kritik doygunluğa ulaşmadığı soğuk hava durumlarında bile belli bir derecede donmaya dayanıklıdır. Hava sürükleyici katkı maddeleri ile sert iklim koşullarına (donma-çözölme) karşı dayanıklılık artar ancak hava sürükleyici katkılı SSB'lerin saha ortamında üretimi riskli olduğu bilinmektedir. Hava sürükleyici katkı kullanılacaksa üretilecek tasarım aşağıdaki kriterleri sağlamalı, laboratuvar ve saha deneylerine tabii tutulmalıdır.

i. Hava sürükleyici katkı maddesinin aktivitesi ve miktarı

ii. Sürüklenecek havanın SSB ile etkinliği ve su ihtiyacı

iii. İşlenebilirlik ve sıkıştırma işlemlerinde stabil hava-boşluk etkileri

iv. Agregası ve bağlayıcı malzemenin ince kısmındaki mevcut hava içeriğinin etkileri (DSİ, 2014).

Betonun aşınma direncini ölçen birkaç kriter vardır; yani, agregası oranı, agregası türü (hem ince hem de kaba), mukavemet, karışım oranı, lif içeriği, kürlenme yöntemleri ve yüzeyden bitişe kadar olan yöntemlerdir (Rao vd., 2016).

2.1.4 SSB'nin Avantajları ve Dezavantajları

Avantajlar

SSB kullanılacak yapılarda donatısız ve kalıpsız uygulamalar yapılabilmektedir. Hızlı tamamlanması gereken projelerde, uygun materyal ve araçla en az iş gücü kullanılarak hızlı gerçekleşmesini sağlamaktadır. SSB yollar, diğer yol uygulamalarına (asfalt veya geleneksel beton) göre mukavemet ve durabilite açısından daha iyi sonuçlar göstermektedir. SSB'nin ilgi çekmesinin bir önemli faktörü ise geleneksel beton uygulamalarına kıyasla daha hızlı işin tamamlanması ve daha ekonomik iş bitirimi olmasıdır. SSB içeriği bakımından daha az bağlayıcı madde (çimento gibi) kullanıldığı için rötire oluşumunu azaltmakla birlikte rötire kaynaklı gerilmelere daha direçlidir. SSB uygun tasarımların yapılmasıyla birlikte yüksek dayanımlara (basınç, eğilme ve kayma) ihtiyacı olan alanlarda da (ağır endüstriyel tesisler, askeri sahalar, madencilik alanları, yoğun yük altına maruz kalan sahalar vb.) iyi performansla hizmet etmektedir (Sağlam, 2022). Zor iklim ve çevre koşullarına uygulanacak olan SSB tasarımlarının iyi yapılması dahilinde geçirimsizlik düşer ve donma-çözülme olayı, kimyasal etkilere dayanıklılığı artar. Yoğun trafik hacmine ve ağır vasıtaların trafiğine sahip yollarda bile aşınmaya karşı dayanıklılık göstermektedir. Buzlanmaya karşı kullanılan lastik zinciri gibi malzemelerin fazlaca kullanıldığı kaplama yüzeylerindeki deformasyonu oluşturmaz ve onarıma gerek bırakmaz. Asfalt kaplama uygulamalarında kullanılamayan ince agregalar bu beton karışımında kullanılabilir. SSB kaplamaların açık yüzey rengi sayesinde yol aydınlatma ihtiyacı düşer ve düşük güneş ışığı yansıtma indeksi sayesinde sıcak havadan oluşan deformasyonları engeller (TÇMB, 2020) (Harrington vd., 2010).

Dezavantajlar

Ülkelere göre değişebilecek ekipman ve makine sayısı nedeniyle SSB'nin üretim miktarı sınırlı olabilir. Betonlarda taşımada kullanılan transmikserlerin ya da betoniyerli kamyonların SSB'nin kuru kıvamı yüzünden karıştırma süresi geleneksel betona göre biraz daha uzundur ve karışımı tamamlanacak olan beton miktarı daha azdır. Soğuk derzin yapılmayacağı durumlar için yatay tabakaların ve levhaların 1 saat

içinde SSB'nin yerleştirimi bitirilmelidir (Gladden, 2021). Sıkıştırma prosedürü bittikten sonra tabaka kalınlığı 25 cm üzerinde olmamalıdır. Bazı sahalarda (havaalanı pisti, ağır endüstriyel tesisler gibi) daha kalın tabaka kullanılması gerekmektedir. Bu tarz sahalarda için birden çok yatay tabaka inşa edilmelidir ve tabakalar arası birbirine bağlı olmalıdır. Sıcak havalarda yapılan uygulamalarda beton içerisindeki suyun buharlaşmasını planlanarak kıvam tasarımı yapılmalıdır (TÇMB, 2020). SSB kuru kıvamlı bir beton türü olduğu için katkı maddeleri kullanılırken geleneksel betona eklenen dozaj miktarından fazla kullanılmalıdır (Gladden, 2021). SSB için bir diğer kısıtlama ise yüzey koşullarından dolayı konforlu bir sürüş hizmeti verememesidir. SSB kaplamaları için, elmas taşıma işlemi gerekmektedir. Bu işlemden sonra profil ve yüzey düzgünlüğü oluşturmak zorlaşmaktadır (TÇMB, 2020). Yüksek hızlı trafik akışına sahip kaplamalar için SSB kaplama yüzeylerine bir miktar bitümlü sıcak karışım dökülmesi gerekebilir (Çetin, 2009).

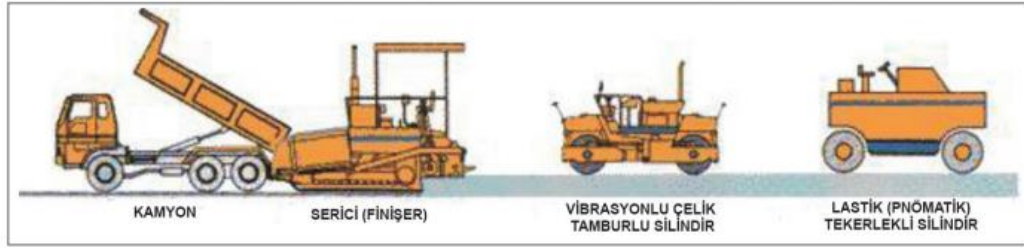
2.1.5 SSB Prosesleri

Karıştırma ve Taşıma

SSB türü betonlarda akışlı beton mikserleri, tamburlu mikserler ve beton santralleri kullanılır. SSB, kuru kıvamından dolayı daha uzun sürede karıştırılma işlemini tamamlar (minimum 60 saniye). Bu nedenle üretilecek olan beton tesislerinde üretim miktarı daha düşüktür. Segregasyon oluşmaması için beton santrallerde düşme mesafesi azaltılmalıdır. Taşınma işlemi kamyonlar (açık gövdeli ve damperli) ile yapılır. Taşınma işlemi sırasında betonda nem farklılıkları oluşmaması için olumsuz hava koşullarında (yüksek sıcaklık, rüzgar vb.) branda ile kapatılarak karşılaşılabilecek olumsuzlukları engellemek gerekmektedir (TÇMB, 2020).

Serme

SSB yol inşaatları için farklı iş makineleri kullanılabilir. SSB'lerde serilme işlemi genellikle asfalt serici yardımıyla yapılır. Fakat büyük miktarda olan malzemeler için modifiye edilmiş başka sericiler (Şekil 2.13) de kullanılabilir.



Şekil 2.13 SSB'lerde kullanılan iş makineleri (URL-4, 2019)

Sericilerin çalışması yüzeyde deformasyon ya da çöküntü oluşmaması için sabit hızla gerçekleştirilir. Özellikle serim işlemi için çift tokmaklı serici kullanımı tercih edilir. Bunun sebebi ise hazırlanan karışımı, serimi sırasında ön sıkıştırma işlemini de gerçekleştirmesidir. Serici yardımıyla, kompaksiyon olmadan önce, döşeme genişliğince ıslak yoğunluk minimum %80'e yakın sıkıştırma sağlamaktadır (Abut, 2017). Bu ekipmanlar modifiye Proktor seviyesine yakın bir sıkıştırma yaparlar. Kaplama yüzeyinde yapılan yüksek yoğunluklu ön sıkıştırma işlemi, sonrasında üstünden geçecek malzemenin yapacağı deformasyonları düşüreceği için yüzeyin düzgünlüğünü artırır. Ondülasyon oluşturmamak için seçilen sericiler, mikserin kapasitesinin 1,5 katı ve üstündeki değerlere sahip sericiler tercih edilmelidir. Segregasyon (ayrışma) riski ile yüzleşmemek için yerleştirme boyunca sericinin deposu tamamen boşaltılmamalı ve malzemelerin üstünü boşluksuz şekilde 32 serim halinde, yüzey düzgünlüğüne dikkat edilerek yapılmalıdır. Bu adımlar gerçekleştirilirken kaplama kalınlığını multi-plex ve gergi sistemlerle seviye kontrolü sağlanmalıdır (Harrington vd., 2010). Greyderlerle yapılan serim ise ön sıkıştırma ve yüzey düzgünlüğü bakımından yeterli sonuçlar vermemektedir. Düzensiz yerleşim planındaki sahalar için greyderler en uygun ekipmanlardır (TÇMB, 2020).

Sıkıştırma ve Yüzey Bitirme İşlemi

Sıkıştırma işleminde ağırlığı minimum 11 ton olan, statik çizgisel yükü 30 kg/cm'den daha fazla, yüksek titreşimli (iki frekansa sahip vibrasyon sistemi) bandajlı silindir ve lastiğe düşen yükü minimum 3,5 ton olan lastik tekerlekli silindir yardımıyla SSB tip betonun sıkıştırılması yapılır. Sıkıştırma prosedürü yola paralel olarak yapılır ve düşük kotlu kenar alanından başlayıp eksene doğru devam ettirilir (Abut, 2017). Taze haldeki karışımın üzerinden iki statik geçiş ile yani bir ileri bir geri hareketiyle serilen malzeme yerleştirilir ve sonradan titreşimli geçişlerle istenilen yoğunluk elde edilir.

Yüzeydeki çatlak ve boşlukları kapatmak için lastik tekerlekli silindir ile sıkıştırma işlemi sağlanır. Çoğu çalışmanın sonuçlarına göre 60-90 dakika arasında gerçekleşen sıkıştırma işlemlerinin daha sağlıklı sonuçlar verdiğini göstermiştir. Bu belirtilen süre normal bir SSB kullanımı için geçerlidir. Yüksek dozlu katkı malzemesi içeren çimentolar veya priz geciktirici katkı kullanılan SSB'lerde bu süre daha uzamaktadır. Ağır yük taşıyacak saha uygulamalarında yüksek kalınlıkta (60 cm kadar çıkabilen) kaplama ihtiyaçları olabilir. Bu tip durumlar için 25 cm dökülen kaplamalardan istenilen seviyeye çıkacak şekilde birkaç tabaka dökülebilir. Tabakalar arasında bağlantı kurulması için çok iyi bir sıkıştırma işlemi yapılması tavsiye edilmektedir. Alta dökülen tabaka ve üstüne gelecek tabaka arasındaki bağlantıyı sağlamak için alt tabakanın işlenebilirlik süresi sınırlı tutulmalı ve alt tabakanın yüzeyi nemli olmalıdır (TÇMB, 2020).

Sıkıştırma işlemi biten SSB için doğal sonlandırma denilen yaklaşıma göre olduğu halde bırakılır. Bazı yeni yöntemler taze haldeki karışımın işlenmesi, malalanması ya da fırçalanmasını, sertleşmiş betonda ise yüzeyde elmas taşlama yöntemiyle bitirilmesinin öngörür (TÇMB, 2020).

Kürleme ve Yüzey Koruma

Kür koşulları ve yüzey koruma işlemi geleneksel beton yollarla benzer adımlar uygulanmaktadır (PCA, 2021). SSB'nin kuru kıvamı (düşük su içeriği), kürleme yönteminin yapılmasının daha önemli kılar. Kimyasal püskürtme, su tutucu yöntemler ve su ile kür olmak üzere üç tip kürleme yöntemi uygulanabilmektedir (Abut, 2017). Sıkıştırma işlemi bittikten sonraki en kısa süre içinde kürleme yapılmalıdır. Eğer sıkıştırılan beton yüzeyi açık kalacaksa su kürü 1 hafta boyunca yapılmalıdır. Bitümlü emülsiyonların kullanımı, eğer SSB tabakası üstüne asfalt ya da sathi kaplama yapılacağı durumlarda kullanılır. Bitümlü emülsiyon tabakasının üstünden saha ekipmanları geçecekse, bu tabaka kum veya talaş yardımıyla korunmalıdır (TÇMB, 2020).

Derzler

SSB yollarda derzler son yıllarda popüler olmuştur. SSB'nin rötire ihtimali geleneksel betona kıyasla daha az rastlanır. Bu yüzden bu beton türünde yapılan derz kesimi daha uzun mesafelerde uygulanır (Abut, 2017). Yapılan enine ve boyuna derzler olabildiğince dik konumda olmalıdırlar. Yapılmadığı zaman sıcaklığın artmasıyla bitişik levhaların kenarlarında kabarmalar yapabilir. Dik konum sağlanabilse diye bazı yöntemler takip edilebilir. Genellikle derzler açık halde bırakılır. Eğer SSB'nin üst kısmına uygun izolasyon yöntemleri uygulandığında, geleneksel beton kaplamalarında olan bütün prosedürler izlenir. Enine yapılan derzler, dayanım ve dayanıklılık kazanmasıyla beraber birkaç saat ya da gün ile değişebilen sürenin geçmesiyle kesimi yapılabilir. Taze haldeki karışıma yapılan derzler, SSB kaplamasının üstüne bitümlü emülsiyon tabakası yerleştirildiğinde kullanılmaktadır (TÇMB, 2020).

2.1.6 Geleneksel Beton ve SSB Özelliklerinin Karşılaştırılması

Tablo 2.5'te geleneksel beton kaplamalar ile SSB kaplamaların tasarım ve uygulama hakkındaki sekiz ana özelliklerini kapsayan karşılaştırma detaylıca yer verilmiştir.

Tablo 2.5 GBY ve SSB kaplama türüne göre kıyaslama (Topličić-Ćurčić vd., 2015; Yaman ve Ceylan, 2013)

Özellikler	Geleneksel Beton	SSB
Karışım	İyi gradasyonlu kaba ve ince agregalar tipik olarak karışımın hacimce % 60 - 75'ini oluşturur. Tipik bir su-çimentolu malzeme oranı 0,40 ile 0,45'tir; bu, çimento hamurunu agrega parçacıklarını iyice kaplamak ve parçacıklar arasındaki boşlukları doldurmak için yeterince nemli yapar.	Yoğun ve iyi gradasyonlu kaba ve ince agregalar tipik olarak SSB karışımlarının hacimce %75-85'ini oluşturur. SSB karışımları, daha yüksek ince tane içeriği ve daha düşük çimento ve su içerikleri nedeniyle geleneksel betondan daha kurudur.
İşlenebilirlik	Karışım plastiktir ve akıcıdır, böylece kaplama makinesi tarafından manipüle edilebilir ve nispeten serttir (çökme, kaplama makinesinden ekstrüde edildikten sonra şeklini korumak için genellikle yaklaşık 5 cm'dir.)	Karışım nemli, yoğun taneli agrega kıvamındadır. SSB'nin nispeten kuru ve sert karışımı, geleneksel beton kaplama makineleri tarafından manipüle edilecek kadar akışkan değildir.
Kaplama Yapılması	Hazırlanan karışım, beton serici yardımıyla seviyelendirip sıkıştırma işlemi yapılır.	Asfalt kaplama sericisi yardımıyla kalıp sistemi gerektirmeden karışımın serme işlemi yapılır.

Tablo 2.5'in devamı

Özellikler	Geleneksel Beton	SSB
Sıkıştırma	Yüzey tipi vibratör yardımıyla ilk olarak taze betonda sıkışmış havanın dışarı atılması sağlanır. Beton sericiden çıkan karışımın terleme olayıyla ilave bir sıkıştırma işlemi uygulanır.	Karışımın beton silindir ile dıştan sıkıştırılmasıyla yapılır. Beton karıştırıldıktan ilk 60 dakika içinde beton sertleşmeye başlamadan bu işlem yapılır.
Yüzey Düzeltme	Beton priz almadan önce yapılır. Araç-yol arasındaki sürtünmeyi arttırmak için mekanik yüzey pürüzlendirme yapılır.	Asfalt yol tarzında SSB açık yüzeyli olmasına rağmen daha ince malzeme kullanımı ile yoğun bir yüzey oluşturulabilir. Elmas taşılama metoduyla kaplama şekillendirilir.
Hidratasyon	Karışımların uygun koşullar sağlandığındaki hidratasyonu betonda nihai dayanıklılığı arttırdığı için önemlidir. Betonun bakımı hidratasyona yardımcı olmaktadır.	
Kür İşlemi	Yüzey düzeltme işlemi tamamlandıktan sonra kür yapılır. Kür işlemi betonlarda gerekli bir prosedürdür. Betonda dayanım kazanmak için yeterli hidratasyon süresi ve koşullar sağlanmak zorundadır. Beton bünyesindeki suyun buharlaşmasının kontrol edilmesi için kür işlemi gereklidir.	Silindire sıkıştırma işlemi tamamlandıktan sonra kür yapılır. Kür işlemi betonlarda gerekli bir prosedürdür. Betonda dayanım kazanmak için yeterli hidratasyon süresi ve koşullar sağlanmak zorundadır. Beton bünyesindeki suyun buharlaşmasının kontrol edilmesi için kür işlemi gereklidir.
Çatlama, Yük Transferi ve Güçlendirme	Derzli kaplamalarda çatlak kontrolü kesilen derzlerle sağlanır. Minimum 20 cm ve üstü beton kaplamalarda yük transferinin doğru yapımı için derz bölgelerindeki kayma donatılar ile agregaların aderansını sağlayan boyuna donatı kullanılır. Beton kaplama sürekli donatıya sahip ise kısa aralıklarla atılan çelik donatılar kendiliğinden oluşan çatlakların yük transferinde agregaların aderansı ve donatılarla beraber yardımcı olur.	SSB kaplama uygulamalarında genellikle yol derzler kesilmez. Kesme yapılmadığı durumlarda 4.5-9 m aralığında kendiliğinden oluşan çatlaklar ve agregaların aderansı ile yük transferi gerçekleşir. Araç (araba, kamyon gibi) trafiği uygulamalarında çatlak kontrolünün sağlanması için kesme yöntemi aranır. Geleneksel betona göre daha seyrek miktarda derz kesilir. Enlemesine derzler 4.5-9 m aralığındadır. SSB uygulamasında yapılan sıkıştırmadan dolayı derzlerde kayma donatısı yerleştirilmez.

2.1.7 SSB Uygulama Alanları

SSB'nin farklı alanlarda uygulama sahaları mevcuttur. Tablo 2.6'da görüleceği üzere ağır hizmet uygulamalarında, endüstriyel uygulamalarda ve karayolları uygulamalarında SSB kullanımı oldukça yaygındır.

Tablo 2.6 SSB uygulama alanları



Ağır Hizmet Uygulamaları

- Limanlar ve Havaalanları
- Askeri Tesisler
- Intermodal (Karma) Tesisler



Hafif Ticari ve Endüstriyel Uygulamalar

- Depolar ve İmalat Tesisleri
- Ticari ve Endüstriyel Otoparklar
- Bakım ve Depolama Alanları



Karayolu Uygulamaları

- Otoyoldaki Toplayıcı Yollar ve Emniyet Şeritleri
- Küçük Ölçekli Anayollar
- Şehiriçi Sokaklar ve Yerel Yollar
- Anayollar ve Otoyollar

2.1.8 SSB Hakkında Yapılan Çalışmalar

Chhorn vd. (2017), yapmış olduğu deneylerde yol kesitleri için sürtünme özelliklerini incelemişler. 13 ve 19 mm en büyük tane boyutuna sahip agregalardan oluşan SSB kaplamaların mikro yapıları- Vebe süresi hakkında bağlantı kurmuşlardır. Bu deneylere göre kuru kıvamlı karışımların yetersiz harç oranına sahip olduğu için sıkıştırma işleminden sonra agregaların yüzeyleri harç yardımıyla kaplanamadığı için agrega dokusu ortaya çıkmıştır. Islak kıvamlı karışımlarda ise yeterli harcın agrega yüzeylerini sararken, agregalar arasındaki boşlukları da doldurarak kaymaya böylece sürtünme direncine neden olmaktadır. Bu çalışmada hazırlanan beş farklı karışım için ideal Vebe süresinin 55 sn olduğunu ve 19 mm'lik karışımlar, 13 mm'lik karışımlara göre yüksek olduğu belirtilmiştir (Chhorn vd., 2017).

Algin ve Gerginci (2020), yaptığı çalışmada donma-çözülme direncine karşı sentetik fiber katkılı SSB kaplamalarında kayma direnci araştırılmıştır. Bu araştırma için her yüz döngü tekrarından sonra parametreler not edildikten sonra dört defa kuru ve ıslak ortam koşulları altında kayma direnci dayanımlarına bakılmıştır. Donma-çözülme dayanımı için bütün numunelerde döngü öncesi BPN değeri (kayma direnci değeri) ölçülmüştür. Bu değerler sonucunda kontrol numunesinde yani fiber eklenmemiş olan

numunede 300 döngü sonra BPN değerinde düşüş olduğu gözlenmiştir. Kuru haldeki numunelerin BPN değerleri 54 ve üzeri olarak kaydedilmiştir. Elde edilen veriler neticesinde SSB kaplamalar için donma-çözülme tekrarları öncesi ve sonrasında kayma potansiyelinin çok düşük olduğuna varılmıştır. Islak haldeki numunelerde BPN değeri daha düşük çıkmış olup, SSB kaplamalarında kayma potansiyelinin düşük olduğu bulunmuştur. Eklenen fiberler aşınmaya karşı olumlu sonuçlar vermiştir (Algin ve Gerginci , 2020).

Pei-wei vd. (2006), yapmış olduğu çalışma Çin'deki Longtan barajında kullanılan SSB için donma-çözülme dayanıklılığı ve hava boşluğunun betona kattığı özellikler ASTM C666 standardına göre incelenmiştir. Donma-çözülme tekrarlarına maruz kalan numunelerde dayanım ve kütle kaybı arasında doğrusal bir orantı olduğu gözlemlenmiştir. Uçucu kül (%50 oranında) ve HNM (%8 oranında) yani MgO içeren genleşme ajanına sahip olan karışımda su/bağlayıcı oranı 0,48'den az ve açıklık faktörü 0,4 mm'den az ise, D300 parametresinin üstünde bir durabilite faktörü elde edilebileceğini sunmuşlardır (Pei-wei vd., 2006).

Mardani vd. (2013), tarafından yapılan çalışmalarda SSB'nin donma-çözülme direnci ve geçirimsizlik incelenmiştir. Bağlayıcı madde olarak kullanılan çimentonun birbirinden farklı oranlarda uçucu kül ikamesi ile yapılan tasarım sonuçlarında 90 güne kadar uçucu kül oranının artmasıyla durabilite de düşüş olmuştur. Bazı grup agregaların uçucu kül (UK) ile ikamesi olan karışımlarda, durabilite bakımından numuneler olumlu yönden geliştiğini deneyler sonucu belirlenmiştir (Mardani-Aghabeglou vd., 2013).

SSB de sık görülen bir problem olan buz çözücü tuzların neden olduğu tuz kireçlenmesidir. Ghahari vd. (2017), yapmış olduğu çalışmada tuz kireçlenmesinde çözüm önerisi olarak çimentolu malzeme ve hava sürükleyici ajan olarak puzolanların kullanmıştır. Ağırlıkça %20 oranında çimentonun tras puzolanla değişimi ile gerçekleşen bu deneyde, erken yaş mukavemeti bakımından %35 daha az basınç dayanımı gösterirken 90 günlük basınç dayanımlarındaki fark %14'tür. Yani sonuçlarda belirtilen değerlere göre kullanılan puzolan malzemenin basınç dayanımını

artırmadığı belirlenmiştir. Numunelerin ortalama basınç dayanım değeri 34.30 MPa olarak ölçülmüştür (Ghahari vd., 2017).

Atık malzemenin çevresel etkilerini azaltmak amacıyla SSB’de çapraz bağlı polietilen (XLPE) kullanılmıştır. XLPE, elektrik tellerinin ve kablolarının yalıtımında yaygın olarak kullanılan bir malzemedir. Shamsaei vd. (2017), tarafından yapılan araştırmaya göre, XLPE’nin agrega yerine kullanılması, düşük birim ağırlığı nedeniyle çimentonun birim ağırlığını azaltmıştır. Ancak XLPE kullanımının CS’yi azalttığı da görülmektedir. Benzer şekilde, kırıntı kauçuk miktarı arttığında, sonuç olarak CS azalmıştır (Adamu vd., 2018). SSB’nin eğilme dayanımı, geleneksel beton için önemli olduğu kadar hizmet kalitesi açısından da önemlidir. Son zamanlarda yapılan bir çalışmada, bir atık malzeme olan çapraz bağlı polietilenin (XLPE) SSB’deki etkisi araştırıldı. Kaba agrega yerine %5, %15 ve %30 oranında XLPE kullanılmıştır. %5 XLPE ile SSB’nin eğilme dayanımının numune 0’dan daha düşük olduğu belirlenmiştir. Ağırlıkça %5 oranında XLPE ilavesi ile CS %3,42 oranında düşmüştür. Basınç dayanımı ortalaması 28,49 MPa iken eğilme dayanımı 5,51 MPa olarak ölçülmüştür (Shamsaei vd., 2017). Çimento yüksek hacimli uçucu kül (UK) ile değiştirildiğinde aşınma direnci azalmaktadır. Agrega yerine kırıntı kauçuğu eklenmesinin de beton karışımı üzerinde aynı etkiye sahip olduğu belirlenmiştir (Adamu vd., 2018).

Rao vd. (2016), tarafından yapılan bir çalışmada, farklı hacimlerde (%10, %20, %30, %40, %50 ve %60) öğütülmüş granül yüksek fırın (GBBS) çimento ile değiştirilmiştir. GBBS ilavesi ile basınç dayanımının iyileştirilebileceği gözlenmiştir. GBBS ilavesi, çimentonun katkısı kadar yüksek basınç dayanımları sağlayabildiğini ortaya koymuşlardır. GGBS artırılarak çimento azaltıldığında eğilme dayanımı artar. Yarma gerilmesinde de benzer bir etkiye sahiptir. Artan miktarda GGBS ile bölünmüş gerilme, artan bir eğilim gösterir. Bu ikame ile basınç dayanımı %4,51 artarken, basınç dayanımı ortalamaları 45,15 MPa ve eğilme dayanımı 7,90 MPa olarak ulaşılmıştır (Sravana ve Rao, 2016). UK, SSB üzerindeki GBBS etkilerine kıyasla SSB üzerinde benzer bir etkiye sahiptir. Çimentodan uzaklaştırılan miktar UK olarak eklendiğinde karışımlar hemen hemen aynı basınç dayanım değerlerine sahiptir. Bu iki deneysel çalışmaya dayanarak, hem uçucu kül hem de GBBS’nin SSB tasarımları için çimento

ikame malzemeleri olarak kullanılabileceği sonucuna varılabilir. Ayrıca, bu katkılar betona dahil edildiğinde, karışımlar hemen hemen aynı basınç dayanımı sonuçlarını göstermektedir (Sravana ve Rao, 2016).

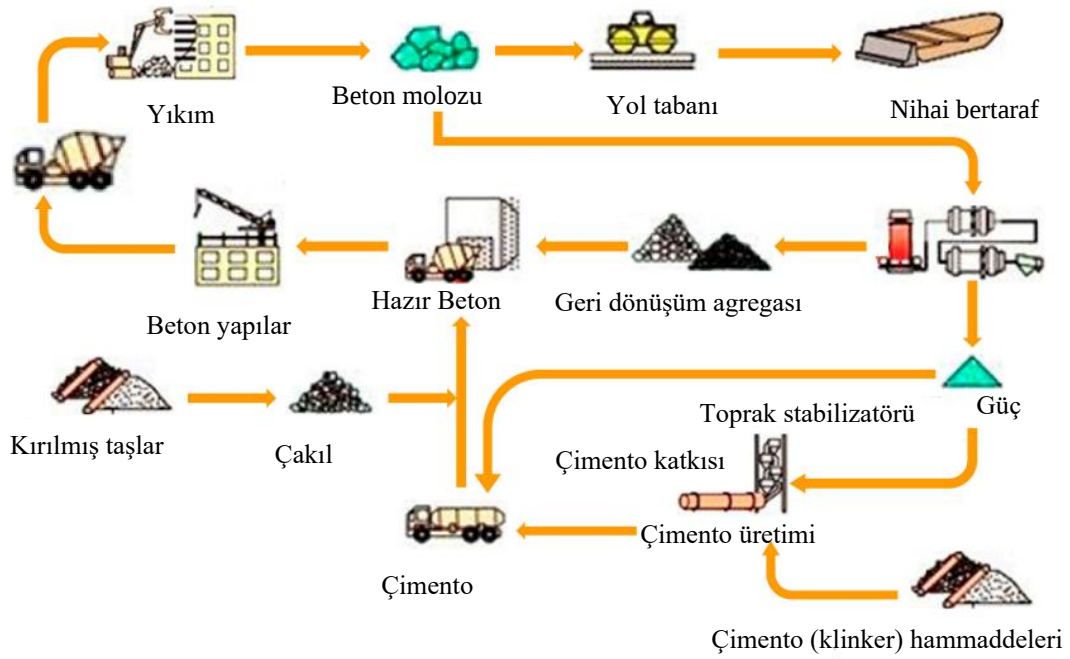
Madhkhan vd. (2012), SSB karışımına çelik lif ilavesinin etkisi incelenmiştir. Test sonuçları, çelik elyaf kullanımının basınç dayanımını yaklaşık %20-30 artırdığını göstermektedir. Benzer şekilde poliprolin elyaf da artan bir etki yapmıştır (Madhkhan vd., 2012).

Karadelisand ve Lin, 2015, yaptığı çalışmada çelik elyafın konvansiyonel beton ve SSB'deki etkinliği araştırılmıştır. SSB'deki çelik veriminin konvansiyonel betona göre önemli ölçüde daha yüksek olduğu gözlenmiştir (Karadelis ve Lin , 2015). PP elyaf da SSB üzerinde benzer artırıcı etkiye sahiptir (Benouadah vd., 2017). Fakat Tayland'da yapılan diğer araştırmalar, SSB'ye çelik lif eklenmesinin basınç dayanımında bir miktar azalmaya neden olduğunu göstermektedir (Sukontasukkul vd., 2019).

2.2 Geri Dönüşüm Agregası

Günümüzde sürdürülebilirlik konusu dünya üzerinde ciddi bir kalkınma sorunudur ve inşaat sektöründe de araştırmaların ilgi odağı olmuştur (Fediuk vd., 2017). Beton ve betonarme üretimindeki teknolojik ilerleme, özellikle yüksek kaliteli agrega kullanımı olmak üzere ek hammadde kaynakları gerektirmektedir (Lesovik vd., 2018). Bu sorunun uygulanması, sürekli artan mineral ve enerji kaynaklarının eksikliği ve ayrıca çevrenin korunması için çevresel gereksinimler tarafından engellenmektedir (Klyuev vd., 2018). Bu nedenle, düşük kaliteli hammadde yataklarını ve ilgili endüstrilerden gelen atıkları kapsamlı bir şekilde kullanmaktır (Fediuk vd., 2018). Beton atığın yeniden kullanılması ve geri dönüştürülmesi, yol boyunca sürdürülebilirliği sağlamak için başarılı bir strateji olabilir (de Brito vd., 2018). Atık beton toplanır ve ezilir ve daha sonra doğal kaba agregaların (DKA) yerini aldığı yapısal betonda kullanılır (Abdel-Hay, 2017). Dünya çapında, kullanılmamış agrega kullanımını en aza indirmek amacıyla çevresel, teknik ve ekonomik olarak kabul edilebilir olduğunda malzeme olarak yeniden kullanım için beton atıklarının geri dönüşümünü iyileştirmek için çeşitli kontrol önlemleri getirilmiştir (Pavlu vd., 2019). Çevre sorunlarının, depolama

alanlarının yetersizliği nedeniyle arttığı bilinmektedir. Sürdürülebilir kalkınmada beton atıkların kullanılması bu tür sorunları azaltabilir (Abdulmatin vd., 2019). Bununla birlikte, çoğu beton fabrikasının geri dönüşüm agregası (GDA) üretme ve bunlardan tam olarak yararlanma konusunda isteksiz olduğu gözlemlenmiştir (Rizvi vd., 2009). Üretim tesisleri, yalnızca beton için belirsiz özellikleri nedeniyle değil, aynı zamanda henüz belirlenmemiş olan keşfedilmemiş üretim süreçleri nedeniyle de GDA'nın kullanımında henüz uzmanlaşmamıştır (Shin vd.,2014). Çoğu beton santralinin GDA'yı optimumda üretmek ve kullanmak konusunda tereddüt ettiği gözlemlenmiştir (Abdel-Shafy ve Mansour, 2018). Ancak, bu sorunu incelemek gerekli hale geldi. Dünya üzerinde meydana gelen insan yapımı ve doğal afetler sonucunda, yıkılmış birçok şehir, yerleşim yeri ve ev bulunmaktadır. Bu yerleşim alanlarının yeniden inşa edileceği, yıkılan bina ve yapıların bir kısmının nasıl kullanılacağı konusu akıllarda ciddi bir soru işareti bırakmaktadır (Kenai, 2018). Çözüm yollarından biri, her şeyi yeryüzünün nispeten alçak formlarına çıkarmak, depolamak, toprakla örtmek, üstüne bir orman dikmek, yeni yapı malzemeleri üretmek ve bunlardan şehirler ve yerleşim yerleri yeniden inşa etmektir (Marinkovi'c, vd., 2010). Ancak bu çok pahalı bir girişimdir (de Brito vd., 2018). Bu durumdan çıkmanın ikinci yolu, yıkılan bina ve yapıların parçalarının, yıkılanların yerine yeni bina ve yapıların onarılması ve inşa edilmesi için yapı malzemeleri oluşturmak için kullanılmasıdır (Pacheco-Torgal vd., 2013).



Şekil 2.14 Yıkılan binaların süreci (Makul vd., 2021)

Doğal afetler, trafik yollarının genişletilmesi, kentsel dönüşüm, yapısal yıkım ve amaç değişikliği nedeniyle eski binaların yıkılıp yenilerinin yapılması yaygın bir uygulamadır (Al-Bayati vd., 2018). Eski binaların yıkılması sırasında büyük miktarda beton atığı oluşur; daha sonra, genellikle önemli sağlık riskleri oluşturan ve çevreye zarar veren çöplüklere atılır (Zulkati vd., 2013). 1980’li yıllarda, GDA’nın özellikleri üzerine araştırmalar başlanmıştır (Carpenter ve Wolosick, 1980). GDA üretiminin uzun ömürlülüğü ve sürdürülebilirliği hakkında yetersiz bilgi, sektörün değişen yönlerini etkilemesi nedeniyle yakından ilgilenilmesi gereken ciddi bir konudur (Mália vd. 2013). Standart GDA üretim endüstrilerindeki üretim, kalite kontrol ve üretim maliyetlerinin, doğal beton agregalarından daha düşük bir maliyetle beton bileşenler olarak satın alınan GDA’ların faydalarına ağır basıp basmadığı bilinmemektedir (Wu vd., 2014). GDA üretimi için üretimin yavaş kabul edilmesinin bir açıklaması, dökme hazır beton üretimi için mevcut tesislerdir (Akhtar ve Sarmah, 2018).

GDA, Portland çimentolu beton yıkımından kaynaklanmaktadır. Orijinal betonun yıpranmış veya taze, gevşek veya yoğun, zayıf veya güçlü olabileceği göz önüne alındığında, agrega parçalarının önemli ölçüde değişmesi beklenebilir (Shi, vd., 2016). Kırma işleminde, yapıştırılmış harç ile beton agregası topakları oluşur ve bu yapılar

daha az verimlidir (Li vd., 2012; Poon vd., 2004). Kırılmış betondan da ince taneler oluşur (Etxeberria vd., 2007).

Agregalar genellikle toplam beton hacminin yaklaşık yüzde yetmişini kaplar (Almeida ve Cunha, 2017; Malešev vd., 2010). Bu agregaların sayısının büyük bir yüzdesi esas olarak iri agregadır. Ancak inşaat sektöründe kaba agregaya olan talep çok fazladır (Tabsh ve Abdelfatah, 2009). Bu yüksek talepleri karşılamak için doğal kaynaklardan hammaddelerin giderek artan şekilde çıkarılması şarttır (Guo, vd., 2018). Doğal büyük agregaların sürekli artan kullanımı ekolojik bir dengesizlik yaratmaktadır (Tam vd., 2005). Bu nedenle inşaat sektöründe alternatif hammaddelerin kullanımı elzemdir (Otsuki vd., 2003). Yıkılmış beton binalardan elde edilen GDA'nın kullanımı, bu amaca ulaşmak için bir yaklaşımdır (Silva vd., 2015). Geri kazanılmış beton malzemelerin yapılarda kullanılması, doğal kaba agregaya ihtiyacını en aza indirir (Radonjanin vd., 2013). Buna karşılık, bu, doğal agregaya geri kazanımından kaynaklanan olumsuz çevresel etkileri en aza indirir (Domingo-Cabo, vd., 2009). Artan depolama maliyetleri ve doğal agregaya (DA) eksiklikleri de betonda GDA kullanımına katkıda bulunmuştur (Gómez-Soberón, 2002). Ayrıca, şantiye ile DA kalite kaynağı arasındaki artan mesafeler, yüklenicileri DA'yı, GDA ile değiştirmeyi düşünmeye zorlamıştır (Katz, 2004).

GDA'nın yüksek performanslı ve yüksek dayanımlı yapı betonlarında kullanımı, uygun kalite kontrolü ve karıştırma ve puzolanik katkıların eklenmesi sayesinde mümkündür. Fakat her bir GDA tipi ile betonun özelliklerini dikkatli bir şekilde incelemek gerekir (Etxeberria vd., 2007). Özellikle, betonun mukavemeti, ikame oranı, nem içeriği, GDA tipi ve su-çimento oranı gibi çeşitli unsurlardan etkilenir (Sagoe-Crentsil, vd., 2001). Doğal agregalardan farklı olarak, GDA genellikle daha yüksek su emme özelliğine sahiptir ve bu da özellikle işlenebilirlik olmak üzere beton özelliklerini önemli ölçüde etkileyebilir (Tam vd., 2018). Ek olarak, daha kuru GDA'lı beton, suya doymuş betondan daha yüksek bir çökmeye ve daha hızlı çökme akışına sahiptir (Duan vd., 2013). İnce agreganın tamamen yerini alacak güçlerin zamanla arttığı ve daha yüksek bir kombinasyon yüzdesine sahip karışımların daha iyi kompozit performans elde ettiği açıktır (Bui vd., 2017). İnşaat maliyetlerini en aza indirmenin tek güvenilir yolu, mevcut yerel kaynakları kullanmak ve yenilikçi yapı

malzemeleri getirmektir. GDA'nın betonda ince agregası olarak kullanılması, özellikle yıkım atıklarının serbestçe bulunabildiği alanlarda en iyisi gibi görünmektedir (Al-Bayati ve Tighe, 2019).

GDA'nın fiziksel özellikleri, taze ve sertleşmiş betonun özellikleri üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Ayrıca, yüksek GDA emilimi betonun işlenebilirliğini etkileyebilir. Ayrıca büyük GDA gözenek hacimleri, betonun dayanıklılık özelliklerini (geçirgenlik ve su emme), mukavemetini ve gözenekliliğini etkileyebilir. Betonun taze ve sertleşmiş özellikleri, KA'nın tamamen veya kısmen ikamesi olarak kullanılan GDA yüzdesinden büyük ölçüde etkilenir. Poon vd. (2002), yedi farklı değişken kullanarak, %0,0-100 KDA'yı GDA ile değiştirirken somut performansı tahmin etmek için bir toplam miktar ve tip modeli oluşturmuşlar (Poon vd., 2002). Araştırmacılar, GDA kullanılarak oluşturulan betonların, DA betonlarından daha düşük bir modüle ve basınç dayanımına sahip olduğunu bildirdi. Daha yüksek GDA içeriği ayrıca su emilimini artırır, ancak yoğunluğu azaltır, bu da beton gözenekliliğinin artmasına neden olur. Kaba GDA (KGDA) kullanımı, beton yoğunluğunu %50-100 oranında azaltır ve su emilimini sırasıyla yaklaşık %2,11 -%3,50 ve %0,14 -%0,38 oranında artırır. Ayrıca, topraklanmış GDA içeriği arttıkça, klorür iyonu penetrasyonuna karşı direncin azaldığı, buna karşılık betonun çekme yarma ve basınç dayanımının azaldığı belirtilmektedir (Ratnayake ve Samarakoon, 2016). Buna ek olarak, araştırmacılar, artan GDA içeriği ile beton kuruma büzülmesinin arttığını belirtmişlerdir. Su/çimento oranı düşürülerek kontrol edilebilir.

Yüksek çimento içeriğine sahip GDA betonlarının karbonatlaşmaya karşı oldukça dirençli olduğu bildirilmektedir. Wang vd. (2016), yapmış olduğu çalışmada, GDA betonundaki daha yüksek çimento içeriğinin, tercih edilen bir basınç dayanımı ile sonuçlandığı bulunmuştur (Wang vd., 2016). Wijayasundara vd. (2017), yapmış olduğu çalışmada, betonun GDA çekme dayanımının, betondaki çimento içeriği arttıkça arttığı da belirtilmiştir (Wijayasundara vd., 2017). GDA betonunun bozunması, karışım tasarımında kullanılan su/çimento oranıyla ilişkilidir. Orijinal GDA betonuyla karşılaştırıldığında, GDA betonlarının belirli bir basınç dayanımı elde etmek için daha yüksek çimento içeriği ve daha düşük su/çimento oranı gerektirdiği bildirilmektedir (Wijayasundara vd., 2018). DA'nın su/çimento oranı 0.290'da

erimeye ve donmaya karşı direnci son derece yüksekti. Ancak GDA betonu için aynı su-çimento oranı uygun donma-çözülme direnci sağlamaz.

Kırma beton hurdasının bileşiminin yaklaşık %30 oranında hidratlanmamış Portland çimentosu içerdiği tespit edilmiştir, bu da onun çok bileşenli oldukça aktif bağlayıcıların üretiminde aktif bir mikro doldurucu olarak kullanılmasını mümkün kılar (McNeil ve Kang, 2013). Beton hurdasından elde edilen agrega, kırılmış betonun çimento hamurundan tanelerinin yüzeyinde kısmi veya katı bir kabuğa sahiptir, hem çimento hamurunun yapısal özelliklerini hem de aralarındaki yoğun ara yüzey geçiş bölgesini oluşturma sürecini aktif olarak etkiler (Ajdukiewicz ve Kliszczewicz, 2002). Beton kompozitlerin yapısı, daha düşük su emme (%3-7'ye kadar) ve boyut olarak oldukça küçük ve düzgün gözeneklerin varlığı ile karakterize edilir (Evangelista ve de Brito, 2007).

Kaynakların veya GDA türlerinin somut performans üzerindeki etkisini araştırmak için çeşitli çalışmalar yapılmıştır (Oikonomou, 2005; Tam, 2008). Teh vd. (2018), basınç dayanımında artış bildiren duvar seramiklerinden yapılan geri dönüştürülmüş agregalardan yapılan betonlar dışında, kaba GDA ile yapılan betonların basınç dayanımı daha düşüktür (Teh vd., 2018). Betonun elastisite modülü tüm GDA tipleri için düşürülmüştür. Bununla birlikte, kırmızı seramiklerden yapılan GDA'lar, daha düşük yoğunluktan dolayı betonun modülünü düşürmede daha büyük bir etkiye sahipti.

Dış ortamdaki kürlenme, GDA betonları için DA betonlarından daha zararlıdır. Verian vd. (2018), çalışmalarında dış ortamda sertleştiklerinde DA ve GDA betonları arasındaki yarmada çekme dayanımı farklılıklarının büyük olduğunu belirtmişlerdir (Verian vd., 2018). Wang vd. (2016)'daki çalışmasında, suyla kürlen GDA betonunun karbonizasyon derinliğinin, GDA havayla kürlen GDA betonunun neredeyse iki katı olduğu bulmuşlardır (Wang vd., 2016). Suda kürlenmenin neden olduğu karbonizasyon derinliğindeki azalma, kısmen betonun daha yüksek iç nem içeriğine bağlı olabilir. Agreganın nem durumu betonun işlenebilirliğini etkiler. Betonun ilk çökmesi (işlenebilirlik ölçümleri) büyük ölçüde beton karışımının başlangıçtaki serbest su içeriğine bağlıdır. Verian vd. (2018), havayla kuruyan ve doymuş yüzey

kuruyan GDA'nın tipik ilk çökme ve çökme kaybı göstermesine rağmen, fırında kurutulmuş GDA'nın daha hızlı çökme kayıpları ve daha yüksek ilk çökme ile sonuçlandığı göstermişlerdir (Verian vd., 2018). Uygun hava sürüklenmesi sayesinde, GDA'dan dayanıklı beton elde edilebilmektedir (Kisku, vd., 2017). DA betonları için hava sürüklenmesi, GDA betonları kadar başarılıdır (Toši'c vd., 2015). Ayrıca GDA betonunun donma dayanımını arttırmada sürüklenen havanın kullanılması su/çimento oranını düşürmekten daha etkilidir (Mas vd., 2012).

Kimyasal Özellikler

Sağlamlık, agregaların atmosferik etkiler gibi çevresel etkilere karşı kararlılığının bir göstergesidir (Andal vd., 2016). Magnezyum sülfatlar ve sodyum sülfatlar için mukavemet testi esas olarak agreganın bütünlüğünü değerlendirmek için kullanılır. GDA'lar genellikle magnezyum sülfat dayanıklılık testlerinden geçer, ancak sodyum sülfat dayanıklılık testlerinden geçemez. Poon vd. (2008), yapmış olduğu deneyde GDA ve DA için sırasıyla magnezyum sülfatın güç kaybı %70 ve %2,50 sonucuna ulaşmışlardır (Poon ve Lam, 2008). Bu rakamlar, dünya çapında birçok araştırmacı tarafından elde edilen sonuçlarla aynıdır. Sodyum sülfatların güvenilirlik testleri de incelenmiş olup, kayıpların GDA ve DA için sırasıyla %12,0 ve %9,0 olduğu bulunmuştur. GDA'nın başarısızlığı, esas olarak agregalardaki gözenek boyutlarının dağılımı ile ilişkili olduğu birçok araştırmacı tarafından beyan edilmiştir (Andal vd., 2016).

Orijinal beton agregası alkali agrega reaksiyonlarına yatkınsa, GDA betonları alkali agrega reaksiyonlarına (AAR) maruz kalabilir. Ayrıca, GDA'ya yapıştırılan harçlar veya çimento hamurunun alkali içeriği, GDA'lı yeni betonların AAR duyarlılığı üzerinde önemli bir etkiye sahip olabilir. GDA'nın alkali içeriği, solüsyonunun içeriği ile ilgilidir. Daha fazla harç içeren GDA'lar daha yüksek alkali içeriğine yol açar ve bu nedenle alkali agrega reaksiyonlarına daha duyarlı hale getirir.

Yapıştırılmış çimento bulamaçlarında bulunan sülfatlı maddeler nedeniyle GDA yüksek sülfat içeriğine sahip olabilir. Genellikle, Andal vd. (2016), yapmış olduğu çalışmada GDA ve DA için suda çözünür sülfatların içeriğini araştırmışlardır (Andal

vd., 2016). Araştırmacılar, sülfat içeriğini GDA ve DA için sırasıyla 0,032 g/L ve 0,0250 g/L olarak bulmuşlardır. GDA'nın sülfat içeriği, yapıştırılan harç/çimento hamuru miktarına bağlıdır. GDA'daki daha yüksek sülfat içeriği, daha yüksek miktarda harcın GDA'ya bağlanacağını gösterir. Klorür odaklı antifriz maddelerine uzun süre maruz kalan bazlardan oluşan GDA'da yüksek seviyelerde klorür bulunmuştur. Daha yüksek klorür içeriğine sahip GDA, çelik takviyenin aşınması nedeniyle yeni betonun dayanıklılığını etkileyebilir (Andal vd., 2016; Lye vd., 2016). Çeliğin artan korozyonu, betonarme yapıların erken bozulmasına neden olabileceğinden, klorür içeriği 0,04 kg/m³'ten daha yüksek olan eski betondan yapılan GDA yeni betonda kullanılmamalıdır. Ayrıca, GDA'larda polimer malzemeler, kauçuklar, plastikler, derz contaları, tekstiller, ahşap ve kağıt bulunabilir (Andal vd., 2016; Lye vd., 2016; Tabsh, 2009). Betonda bu malzemeler çözülduğünde, kurduğunda dengesiz hale gelir.

Fiziksel Özellikler

Beton özellikleri ve karışım oranları, GDA'nın fiziksel özelliklerinden etkilenir. Absorpsiyon, gözenek hacmi, kütle yoğunluğu, özgül ağırlık, doku ve GDA'nın şekli gibi temel özellikler, safsızlıklar ve artık bulamaç/macun varlığı nedeniyle genellikle doğal agregadan daha düşüktür (Andal vd., 2016). Etkinin büyüklüğü, GDA'da bulunan geri dönüştürülmüş bulamaçların veya macunların miktarına ve yapısına bağlı olarak değişecektir. Mevcut literatürden (Khatib, 2005), GDA'nın ana fiziksel özelliklerinin bir özeti Tablo 2.7'de gösterilmektedir.

GDA, yüksek gözeneklilik, emme, yüzey pürüzlülüğü ve açısallığı nedeniyle taze betonun performansını etkileyebilir (Martín-Morales vd., 2011). GDA'ların daha büyük boyutu ve köşeli olması, betonun işlenebilirliğini azaltacak ve düzgün bir şekilde döşenmesini zorlaştıracaktır (James, 2011).

Tablo 2.7 DA ve GDA'nın temel fiziksel özellikleri (Limbachiya vd., 2000; Poon vd., 2002)

Fiziki Özellikler	DA	GDA
Gözenek Hacimleri (%hac.)	0,50–2	5–16,5
Absorpsiyonlar (ağırlıkça)	0,50–4	3–12
Sıkıştırılmış Yığın Yoğunlukları (kg/m ³)	1450,00–1750	1200–1425
Spesifik Yer Çekimi	2,40–2,90	2,10–2,50
Şekiller ve Dokular	Pürüzsüz ve iyi yuvarlanmış	Pürüzlü, yüzeylerle köşeli

Taze Hal Özellikleri

Beton karışımlarındaki GDA oranındaki iyileşme ile işlenebilirlik düşüş oranları artmaktadır (Ceia vd., 2016). Bu nedenle, GDA betonları, DA betonlarına benzer işlenebilirlik elde etmek için daha fazla suya ihtiyaç duyar (Ajdukiewicz ve Kliszczewicz, 2007). GDA'yı entegre eden beton karışımları genellikle ilk oturma gereksinimlerini karşılar (Lye vd., 2016). Yapılan çalışmalara göre, daha fazla GDA alımı, asfaltlama ve betonlamanın tamamlanması için gereken süreyi sınırlayan hızlı bir işlenebilirlik kaybına yol açabilir (Zega vd., 2010). Hızlı işlenebilirlik kaybıyla ilgili problemler, şantiyelerde daha fazla su eklemek yerine süperakışkanlaştırıcı miktarını karıştırmadan veya artırmadan önce GDA su içeriği değiştirilerek ve kontrol edilerek ele alınmalıdır (Kleijer vd., 2017). Genel olarak, GDA parçacıklarının keskinliği ve yüzey pürüzlülüğü betonun işlenebilirliğini azaltır ve uygun şekilde bitirmeyi daha sorunlu hale getirir.

GDA'nın betonun ıslak yoğunluğu üzerindeki etkisini araştırmak için çeşitli çalışmalar yapılmıştır (Wijayasundara vd., 2018). Bu çalışmalar doğrultusunda, GDA betonunun ıslak yoğunluğu işlenmemiş beton agregalarından daha düşüktür. DA betonu ile karşılaştırıldığında, GDA betonunun ıslak yoğunluğunun %5-15 daha az olduğu gözlemlenmiştir (Mohseni vd., 2017). Bu GDA, DA'dan daha az yoğun olan yapıştırılmış eski çimento macunları veya harçları içerir (Shaikh vd., 2019). Genel olarak, sertleştirilmiş GDA betonunun yoğunluğu, doğal agregalı betondan %5-15 daha azdır (Hiete vd., 2011). Bunun nedeni, GDA'ya (Rodríguez, vd., 2019) eklenen kullanılmış malzemelerdir. Agreganın boyutuna bağlı olarak, yeniden beton agregalarına eklenen harç miktarı hacimce %30 ile %60 arasında değişmektedir (Wagih vd., 2013). İkincil harcın yoğunluğu çoğu doğal beton malzemeden çok daha

düşüktür (Sim ve Park, 2011). Bu durum, daha düşük bir GDA beton yoğunluğu ile sonuçlanır (Zega vd., 2011).

Beton karışımının stabilitesi, azaltılmış terleme ve arttırılmış kohezyonun bir sonucu olarak arttırılmıştır. Bu nedenle, DA betonunun ayrışmaya karşı direnci, GDA betonununkine eşdeğer olabilir. Genel olarak, DA betonunun ıslanması GDA betonununkinden daha fazladır (Abdel-Hay, 2017). Karıştırma sırasında eski çimento hamurlarının bir kısmı GDA'lerden silinir ve beton karışımında ek ince taneler oluşturur. Böylece, bu ince parçacıklar, karışımında bir miktar su emiliminden sonra betonun ıslanmasını en aza indirir. Daha düşük serbest su içeriği ile daha ince parçacıklar da beton karışımının yapışmasını arttırır. Ayrıca daha yüksek GDA seviyelerinde artan yüzey pürüzlülüğü ve köşeliliği, beton karışımındaki maddelerin birbiriyle yaptığı tutunma kabiliyetini arttırır. Beton karışımının stabilitesi, iyileştirilmiş kohezyon direnci ve minimum ıslanma kabiliyeti ile arttırılır (Eddine ve Salah, 2012).

Betondaki hava içeriği, harçlarının hacminden önemli ölçüde etkilenir. GDA, daha yüksek harç içeriğine sahip oldukları için betonların hava içeriğini etkiler. GDA içeren taze beton, taze DA betonunun hava içeriğinden genellikle %60 daha fazladır (Limbachiya vd., 2000). Bu da geri dönüştürülmüş GDA harçlarına giren havadan kaynaklanmaktadır.

Mekanik Özellikler

Silva vd. (2014), betonun bazı mekanik özellikleri üzerinde küçük bir oranda atık plastik elyaf ve atık yapı malzemesi eklemenin etkisini incelemişlerdir (Silva vd., 2014). Yapılan bu çalışmada, atığın hacim oranı hacimce %0,1-0,2 olarak belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlar, basınç ve eğilme mukavemetindeki gelişmeyi kanıtlamış olup, kontrol karışımına kıyasla elyaf takviyeli beton numunelerin yoğunluğunda bir artış göstermiştir. GDA betonunun basınç dayanımı genellikle işlenmemiş betonunkinden %5-10 daha düşüktür (Hamad ve Dawi, 2017). GDA kalitesine bağlı bu dayanımlar %25'e kadar azaltılabilir. Tipik olarak, GDA'lı beton karışımlarında daha yüksek hava içeriği de daha düşük dayanım değerlerine yol

açabilir (Aliabdo vd., 2018). Bununla birlikte, geri kazanılmış beton, başlangıçta yeni betonlardan daha düşük su/çimento oranıyla üretilmiş eski beton kaynaklarından elde edilirse, GDA betonları DA betonlarıyla aynı ve bazen daha yüksek basınç dayanımına sahip olabilir.

Duan vd. (2020), GDA'nın ağırlıkça %30'luk bir ikame derecesine kadar betonun basınç dayanımı üzerinde herhangi bir etkisinin olmadığını, ardından azaldığını bulmuşlardır. Ayrıca GDA kuru halde kullanıldığında betonun basınç dayanımının çok daha düşük olduğu gösterilmiştir (Andal vd., 2016). Yüksek dayanımlı betonlarda GDA kullanılması sonucu basınç dayanımının %20'den %30'a düşürülmesi gerçekleştirilmiştir. Diğer araştırmacılar tarafından da benzer sonuçlar kaydedilmiştir (Andal vd., 2016; Arredondo-Rea vd., 2019; Aslani vd., 2018). İnce GDA'lar betonun basınç dayanımını etkileyebilir. GDA betonunun basınç dayanımı, Bartolacci vd. (2018), 'ne göre orijinal GDA betonunun kaba agregasının ince agrega oranına bağlı olduğunu belirtmişlerdir (Bartolacci vd., 2018). Kaba agreganın ince agregaya oranının daha düşük olması, kaba GDA parçacıklarına daha fazla harcın yapışmasına ve dolayısıyla GDA betonunun mukavemetinde azalmaya neden olur. Bu nedenle, ince GDA'nın betonda kullanılması genellikle tavsiye edilmez. Maria vd. (2018), %20'ye kadar ince GDA içeren betonlar için basınç dayanımında azalma meydana gelmediğini sonuç olarak belirtmişlerdir (di Maria vd., 2018). Mukavemet, bu seviyenin üzerinde artan GDA içeriği ile azalır. GDA betonunun mukavemeti, yeniden oluşturulmuş agregaların bir kısmının karıştırma sırasında puzolanik sıvılar olmadan veya puzolanik sıvılarla karıştırılmak üzere ıslatılmasıyla veya betonu karıştırmadan önce GDA'nın kolloidal silika veya su gibi puzolanik sıvıların karışımlarına batırılmasıyla artırılabilir. GDA'daki mikro çatlakların, puzolanik reaksiyonlar veya çimento hidratasyonu sırasında emilmiş puzolanik akışkanlar veya su emilmiş çimento jelleri ile doldurulması beklenir. Sonuç olarak, GDA betonunun dayanımı artırılabilir.

GDA'nın betonun çekme dayanımı üzerindeki etkisine ilişkin sınırlı literatür bulunmaktadır (Dimitriou vd., 2018; Guo vd., 2018; Kim vd., 2008). GDA betonunun çatlama üzerindeki çekme dayanımı, GDA betonundan daha düşüktür. Çeşitli araştırmacılar, GDA betonunun yarmada çekme dayanımının DA betonunkinden %0-10 daha az olduğunu bildirmiştir (Dimitriou vd., 2018; Guo vd., 2018; Kim vd., 2008). 90 ile 365

günlük bir süre boyunca, gerilme mukavemetinde istatistiksel olarak anlamlı bir azalma olmamıştır. Guo vd. (2018), GDA betonlarının NA betonlarından daha yüksek çekme dayanımına sahip olduğunu belirtmişlerdir (Guo vd., 2018). Bu nedenle, GDA'nın beton çatlama tokluğu üzerindeki etkisini araştırmak için daha fazla araştırmaya ihtiyaç vardır.

GDA betonunun eğilme dayanımı, DA betonunkinden daha düşüktür (Ding vd., 2016; Durdyev vd., 2017; Hamad ve Dawi, 2017). Ding vd. (2016), yaptığı çalışmalara göre 3 günlük GDA betonunun eğilme dayanımı DA betonundan daha yüksek olduğu, ancak 28 günlük dayanım daha düşük olduğunu bulmuşlardır (Ding vd. 2016). Durdyev vd. (2017), yaptığı çalışmalarında, DA betonunun mukavemeti düzenli olarak artış göstermiş ve daha sonraki bir yaşta GDA betonundan daha fazla eğilme mukavemetine sahip olmuştur. GDA'nın betonun eğilme mukavemeti üzerinde net bir olumsuz etkiye sahip olmadığı kaydedilmiştir (Durdyev vd., 2017). Bununla birlikte, yeterli dayanım verildiğinde, GDA betonları, bazen %100 GDA ikameleri ile bile çeşitli amaçlar için üretilebilir.

Betonun elastisite modülü, daha yüksek elastisite modülüne sahip bir agrega ile artırılır. Böylece betonun elastisite modülü, betondaki artan GDA içeriği ile azalır (Bartolacci vd., 2018; Elhakam vd., 2012; Jacintho vd., 2020). Genel olarak, GDA betonunun elastisite modülü, DA betonundan %10-33 daha azdır. Betonlarda %30 oranında GDA kullanımının elastisite modülünde yaklaşık %15 oranında azalmaya yol açtığı gösterilmiştir (Bartolacci vd., 2018). DA betonu ile karşılaştırıldığında, GDA betonunun elastisite modülü %46'ya kadar düşebilmektedir. Betonun elastisite modülündeki azalma, GDA'nın genellikle DA'ya kıyasla daha düşük bir elastisite modülüne sahip olmasından kaynaklanmaktadır. Diğer bir yandan betonun elastisite modülündeki azalma, doğal agrega bazlı betonların çoğundan daha düşük elastik modüle sahip harçların (geri dönüştürülmüş ve yeni) toplam içeriğinin artmasıyla ilişkilidir (Makul vd., 2021).

Dayanıklılık ve Fonksiyonel Özellikler

Agreganın gözenekliliği, işlenmemiş betondan agrega içeren kontrol betonlarından daha azdır (Chatterjee ve Sui, 2019; Deakins ve Bensemann, 2019; Dhir vd., 2019). Ayrıca tüm betonlar için, toplam gözenekliliğin %50'si GDA'da arttığı araştırma sonuçlarıca bildirilmiştir (Jin vd., 2017). GDA betonunun bu özellikleri, GDA ve çimento içeriği, agrega miktarı ve puzolan yüzdesi gibi beton karışımlarının bileşimindeki farklılıklardan kaynaklanmaktadır. Betonun geçirgenliği, hem beton matrisinin (bağlayıcı ve çimento hamuru) geçirgenliğine hem de agreganın emme kapasitesine bağlıdır. Ek olarak, betonun geçirgenliği gözenek sürekliliği, dağılımı, boyutu ve gözenekliliğinden etkilenir (Makul vd., 2021).

Bir takım araştırma, GDA betonunun sülfat direncinin, doğal beton agregalarınınkiyle hemen hemen aynı veya biraz daha düşük olduğunu göstermiştir (Júnior vd., 2019) (Jain vd., 2012). Genel olarak, GDA betonunun sülfat direnci; silis dumanı, uçucu kül ve ince taneli yüksek fırın cürufaları kullanılarak ve doğru karışım oranı kullanılarak geliştirilebilir. Yapının iyi kalite kontrolü ve karışımların doğru doz oranı, GDA betonlarındaki çelik donatının korozyon oranını azaltabilir. GDA betonlarına ankrajlı çeliğin korozyon davranışını belirlemek için polarizasyon yaklaşımları uygulanır (Meneses vd., 2018). Bazı araştırmacılar, daha düşük klorür seviyeleri (%0,50) ve bağlayıcı türü için korozyon oranının hiçbir zaman agregalara bağlı olmadığını söylemişlerdir. DA betonu ile karşılaştırıldığında, %65 ince yüksek fırın cürufu ve %30 toz haline getirilmiş yakıt külü içeren GDA betonunun, daha yüksek klorür seviyelerinde korozyon reaksiyonlarını hafifletmede daha başarılı olduğunu bildirmişlerdir (Makul vd., 2021).

Karbonatlaşma ile ilgili olarak, mevcut araştırmalar GDA'nın çelişkili etkilerine işaret etmektedir. Mohammed ve Najim (2020)'e göre, artan GDA içeriği ile karbonatlaşma derinliğinin azaldığını ve %100 yerine ikame haricinde daha iyi performansla sonuçlandığını bildirdi. GDA betonları, aynı su/çimento oranında DA betonu ile aynı mukavemeti elde etmek için daha yüksek bir çimento içeriği gerektirir (Mohammed ve Najim, 2020). Çimento içeriği ne kadar yüksek olursa, beton karbonizasyonun derinliğini etkileyen alkali rezervleri de o kadar yüksek olur. Buna karşılık, aynı su-

çimento oranında, GDA betonunun DA betonlarından daha fazla karbonizasyon derinliğine sahip olduğu bulunmuştur (Kou vd., 2008; O'Donnell vd., 2019). Ayrıca GDA betonunun karbonizasyon oranı DA betonunun dört katı olduğu araştırma sonuçlarınca ortaya çıkmıştır. Artan karbonatlaşma, GDA betonlarında takviye çeliği korozyonu riskini artırabilir. Artan beton kaplama, uygun ek çimentolu malzemeler, kürlenmeyi düzeltir ve daha düşük su/çimento oranı bu tür riskleri dengeleyebilir. Öte yandan, başka çalışmalar, RCA içeren betonun gözenek dolgu maddesi olarak işlev görmesi için yüksek inceliğe sahip daha fazla ek malzeme gerektirdiğini söylemişlerdir. Böylece bu, karbondioksit difüzyonunu azaltacak ve karbonatlaşma hızını yavaşlatacaktır (Levy ve Helene, 2004; Singh ve Singh, 2016). Bununla birlikte, GDA'nın beton karbonatlaşma direnci üzerindeki etkisini analiz etmek için daha fazla araştırmaya ihtiyaç vardır.

2.3 Endüstriyel Sektörlerde Açığa Çıkan Küller

Dünya üzerindeki nüfus artışı, kentselleşme ve sanayileşme sürecinin ilerlemesi sınırlı miktarda bulunan hammadde tüketimini arttırmakta ve farklı sektörlerde (tarımsal, madencilik, endüstri vb.) işlenen hammadde sonucu ortaya çıkan çeşitli katı atık miktarını da arttırmaktadır. Betonun yapıtaşlarından biri olan çimento; üretimi için sınırlı hammadde kaynağının varlığı, yüksek enerji tüketimi, yenilenemeyen fosil yakıt kullanımı ve üretim sürecinde ortaya çıkan zararlı gazlar bakımından hem sürdürülebilir bir malzeme olmayıp hem de yüksek çevre kirletici madde sınıfına giren bir endüstridir. Mevcut kaynakların gün geçtikçe tükenmesi ve çeşitli hammaddelerin işlenmesi sırasında oluşan katı atık miktarı gelecek için büyük bir problem oluşturmaktadır. Ekolojiyi ve insan sağlığını tehlikeye atan bu probleme çözüm niteliğinde araştırmacılar organik bazlı katı atıkların inşaat sektöründe yeniden kullanımını ve bu atıkların doğrudan ya da yanma prosesi sonucunda oluşan külün kullanımıyla birlikte oluşturulan yapı malzemelerinin özelliklerini incelemeye başlamışlardır (Demir ve Elmalı, 2020). Yanma prosesi ile organik malzemelerin yanması sonucu amorf yapıdaki maddeler kristalleşir. Bu işlem sonucu atıkların ağırlıkları azalarak kül elde edilmektedir (Biricik vd., 1996).

Biyolojik atık; tarım, ormancılık, balıkçılık, su ürünleri yetiştiriciliği ve belediye atıklarından elde edilen atık kalıntılarının biyolojik olarak parçalanabilen kısmı olarak tanımlanmaktadır. Bugün, küresel ölçekte, biyolojik atık yakılmasıyla enerji üretimi yaygın bir uygulamadır. Bu tür uygulamalar sonuç olarak önemli miktarda dip külü ve uçucu kül üretir (biyolojik atık ve yanma odasının tipine bağlıdır) ve bunlar büyük ölçüde çöplüklere atılır. Avrupa Direktifi 2008/98/CE gibi dünya çapında çeşitli yasama organları, taş ocaklarından çıkarılan agregalara olan talebi azaltmak ve düzenli depolama alanlarına atılan atıkları azaltmak için inşaat malzemesi olarak AK'nin geri dönüştürülmesini tavsiye etmiştir. Ek olarak geri dönüşüm, döngüsel atık ekonomisi olarak adlandırılabilir binlerce iş üreterek ülke ekonomisini geliştirebileceği ön görülmektedir. Çeşitli araştırmalar, hurma yağı yakıt külü (Awal ve Mohammadhosseini, 2016; Mohammadhosseini vd., 2017; Mohammadhosseini ve Yatim, 2017; Mohammadhosseini vd., 2020), pirinç kabuğu külü (Kameshwar vd., 2020), pirinç samanı külü (Pandey ve Kumar, 2020) ve şeker kamışı küspesi külü (Murugesan vd., 2020) gibi AK'nin sıradan Portland çimentosunun kısmi ikamesi olarak yapısal, kaplama ve kompozit betonların üretiminde başarıyla kullanılabilirliği sonucuna varmıştır. Bununla birlikte, bitümlü karışımlarda alternatif dolgu maddesi olarak AK, özellikle odun külünün potansiyelini araştıran çok sınırlı çalışma vardır.

Binici vd. (2008), mısır koçanı, buğday samanı ve çınar yaprağı külünün mineral katkı olarak kullanılmasının betonun durabilitesine etkisini araştırmışlardır. İnce agrega yerine %2,4 ve 6 oranında kül ikame etmektedir. Test sonuçları bu küllerin ilavesi ile geleneksel betona kıyasla iyi işlenebilirlik ve aşınma direnci sağladığını gözlenmektedir. Sonuçlar kül içeriğindeki artışın betonların sodyum sülfat direncinde önemli bir artışa neden olduğunu göstermektedir. Bu nedenle dayanıklı beton üretimi için bu küllerin kullanımı katkılı betonlar önerilebilir. En başarılı seri %6 oranında mısır koçanı külünün 1 yıllık kür uygulaması sonucunda dayanıma yaklaşık %40 artış sağlandığı bulunmuştur (Binici vd., 2008).

Rukzon ve Chindaprasirt (2012), yapmış olduğu çalışmada beton numunelerinin basınç dayanımını arttırmak için mineral katkı gibi %10, %20 ve %30 oranlarında çimento yerine olarak şeker kamışı posası külünü kullanılmışlardır. Deney sonuçları küllü katkıların basınç dayanımına, klora karşı difüzyona, poroziteye karşı

olumlu etki yaptığını ve optimum su/bağlayıcı oranının 0,3 olduğunu belirtmişlerdir (Rukzon ve Chindaprasirt, 2012).

Sargın vd. (2013), pirinç kabuğu külü ve geleneksel kireçtaşı dolgu karışımları ile hazırlanan asfalt betonunun performansını karşılaştırmışlardır. Kireçtaşı ve pirinç kabuğu külünün eşit oranlarda karıştırılmasıyla hazırlanan asfalt karışımlarının en yüksek Marshall stabilitesini sağladığı sonucuna varmışlardır (Sargın vd., 2013).

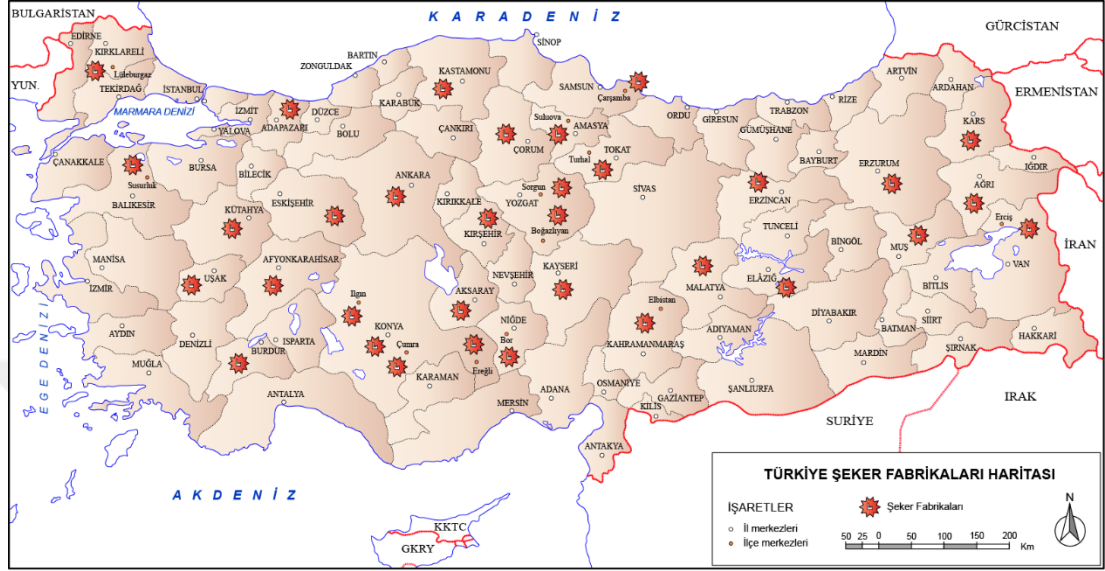
Ataie ve Riding (2013), kütlece %20'lik bir çimento değiştirme oranında kullanıldığında, ön işleme tabi tutulmuş buğday sapı külünün, çimento hamuru numunelerinin hidrasyonunu hızlandırırken, ön işleme tabi tutulmamış buğday sapı külünün, çimentonun hidrasyonunu geciktirdiği gözlemlenmiştir. Buğday sapı külünün, numunelerdeki çimentonun %20'si yerine kullanıldığında harç numunelerinin basınç dayanımını %25 arttırdığı ve harç örneklerinin kalsiyum hidroksit içeriği ve harcın basınç dayanımının, külün amorf silika içeriği ile ilişkili olduğu sonucuna ulaşılmıştır (Ataie ve Riding, 2013).

Zainudin vd. (2016), şeker kamışı küspesi külü içeren asfalt beton karışımının mekanik özelliklerini, geleneksel dolgu maddesini içeren karışıminkiyle karşılaştırmışlardır. Şeker kamışı küspesi külü içeren asfalt karışımı, geleneksel karışıma göre daha iyi Marshall stabilitesi ve esneklik modülü sergilemiştir (Zainudin vd., 2016).

Tahami vd. (2018), geleneksel taş tozu dolgu maddelerini farklı oranlarda pirinç kabuğu külü ve hurma çekirdeği külü ile değiştirerek asfalt karışımlarını hazırlamışlardır. Önerilen AK içeren karışımlar, geleneksel karışımlara göre daha yüksek stabilite ve üstün tekerlek izi ve çatlama direnci sergilemiştir (Tahami vd., 2018).

AK, gelişmekte olan bir teknoloji olarak kabul edilmektedir. Organik bazlı olan bu atıkların inşaat sektöründe yeniden kullanımı ile yetersiz depolama alanlarındaki sıkıntılar giderilmekte ve çevre kirliliği önlenmektedir. Türkiye AK potansiyeli olarak güçlü bir ülkedir. Bu atıkların değerlendirilmesi için gerekli politikaların geliştirilmesi ile daha sürdürülebilir, düşük maliyetli ve çevreci üretim sektörünün yolunu açabilir (Gürel, 2020). Şekil 2.15'te Türkiye'de aktif olan 33 şeker pancarı fabrikasının haritası

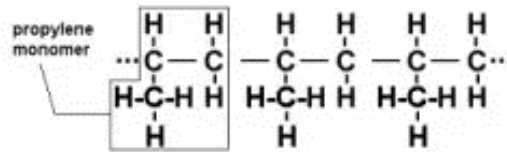
mevcuttur ve bu fabrikaların şeker kapasitesi yaklaşık 3,6 milyon ton/yıldır. Türkiye, dünya üzerinde 2020/2021 yıllarında şeker üretimi %9'luk bir orana sahipliğiyle pancar şekeri üremiyle 5. sıradadır (T.C. Tarım ve Orman Bakanlığı, 2023).



Şekil 2.15 Türkiye şeker fabrikaları haritası (Coğrafya Harita, 2023)

2.4 Polipropilen Lif

PP bir termoplastiktir. C_nH_{2n} monomerine dayanan doğrusal bir yapıdır. PP'ler, uygun katalizör (titanyum klorür vb.) ile propilen gazından üretildiği gibi petrol arıtma işlemlerinin bir yan ürünüdür. Üretim şeklinin kolaylığı ve üretimde çok yüksek saflık derecesinin varlığı bu ürünü daha ilgi çekici hale getirmektedir (Dunee, 2011).



Şekil 2.16 Polipropilen monomeri yapısı (Kiron, 2013)

Kullanılan çoğu PP, polistiren, PVC, poliamid, vb. gibi radikallerin rastgele yerleştirildiği (yani ataktik) amorf termoplastiklerin aksine oldukça kristalli ve geometrik olarak düzenlidir (yani izotaktik). PP'nin düşük yoğunluklu polietilen (LDPE) ile yüksek yoğunluklu polietilen (HDPE) arasında orta düzeyde bir kristallliğe sahip olduğu bilinmektedir. Öte yandan PP, polietilene göre daha yüksek çalışma

sıcaklıklarına ve çekme dayanımına sahiptir. İlk PP reçinesi, ticari üretimi 1957 yılında başlamasına rağmen, İspanya’da Giulio Natta tarafından üretilmiştir (Kiron, 2013).

PP’ler hafif ürünlerdir (Şekil 2.16). Yorulma, darbe, asit, organik çözücü maddeler, kimyasal bileşikler ve elektrolitler karşısında yüksek direnç gösterirler. Elektrik yalıtımı iyi derecededir. Çatlak kontrolü karşısında iyi performans gösterirler. Bunun yanı sıra yanıcı bir malzeme olup, UV-ışınları altında dayanıksız, klor içerikli bileşikler ile kolay etkileşime girebilirler ve kolay oksitlenebilirler (Wikipedia, 2021).



Şekil 2.17 Polipropilen lif (URL-3, 2023)

Bu lif türünün beton için en büyük avantajı, plastik büzülme nedeniyle oluşma ihtimali olan çatlakları kontrol edebilmesidir. Plastik büzülme, prizi başlayan numunelerin farklı nedenlerden kaynaklı yüzeyindeki suyun buharlaşması sonucu meydana gelen hızlı büzülme olayıdır. PP lifler, plastik büzülmede oluşan iç gerilmelerine karşı direnç gösterir ve büzülme sonucu oluşacak çatlakları minimum derecede tutar (Acun, 2000).

Geleneksel beton düşük destek gücüne sahiptir, kolayca çatlar ve kırılma eğilimlidir, oysa PP elyaf takviyeli betonun çatlak ilerlemesi üzerinde iyi bir engelleyici etkisi vardır. Çatlama sonrası performansı ve beton tokluğunu önemli ölçüde iyileştirebilir (Banthia ve Sappakittipakorn, 2007; Cai vd., 2018; Liu vd., 2017). PP elyaf, organik sentetik bir malzemedir ve ana malzeme, modifiye edilmiş

PP reçinedir. PP elyaf, hem sentetik elyaf hem de çelik elyaf PP elyafın ana özellikleri şunları içerir (Li ve Chen, 2019):

- i. Güçlü tokluk, karıştırma aletlerinde ve taşıma araçlarında önemsiz derecelendirilebilecek hasar oluşturur.
- ii. %98'den fazla asit, alkali direnci ve iyi pas önleme özelliğine sahiptir.
- iii. Çok hafif ve ince yapılı, 0,8–1,0 mm çapında, kolay taşınabilir ve betonla karıştırılabilir.
- iv. Güzel görünüm, çimentoya benzer renk oluşturur.
- v. Herhangi bir tehlikesi olmayan yüksek bir güvenlik faktörü içerir.

Fiziksel Özellikleri

PP lifler renksiz, pürüzsüz, esnek ve uzun silindir biçimde bir görünüme sahiptirler. Kullanım alanına göre istenilen uzunlukta ve incelikte üretim sağlanabilmektedir. Renkli üretim için sıvı polimere renk pigmentleri eklenerek istenilen renk tonu elde edilebilir. Yapısal olarak amorf turlar. Özgül ağırlıkları $0,85 \text{ g/cm}^3$ 'tür fakat kristal oranı yüksek liflerde $0,94 \text{ g/cm}^3$ 'e ulaşılabilir. Hafiflik bakımından suda yüzebilen bu lifler, naylondan %20, polyesterden %30 daha hafiftir. Nem karşısında dayanıklı olan bu liflerin çekme dayanımları da yüksektir. Betonda oluşan rötre miktarı arttıkça PP liflerde uzamalar oluşur. Dayanım kazandıkça uzamalar azalır. Sürtünmeye karşı dirençleri mükemmeldir (Uçar, 2022; URL-2, 2017).

Kimyasal Özellikleri

Asitler ve alkaliler karşısında yüksek direnç gösterirler. Güneş ışığı altında uzun süre kalmasında deforme olurlar. Elektriksel iletkenlikleri düşüktür. Yüksek sıcaklık ve yangın ortamında erirler. Kendi kendilerine sönerler ve küle dönüşürler. Erime noktası yaklaşık 170°C 'ye ulaşmaktadır (Uçar, 2022).

PP liflerin, betonun farklı özelliklerine olan katkıları hakkında yapılan çalışmalardan bazıları aşağıda yer almaktadır.

Acun (2000), yapmış olduğu deneylerde PP liflerin beton performansına etkileri araştırmıştır. Belirli oranlarda (hacimce %0,06; %0,08 ve %0,09), 2 cm boyutunda üretilen lifleri kullanmıştır. Geleneksel beton üretilen bu deneylerde %0,06 oranındaki numunelerde basınç dayanımının en iyi sonucu vermiştir fakat lifsiz betona kıyasla etkisinin çok olmadığı, eğilme dayanımının ise %0,09 oranındaki numunede lifsiz betona kıyasla yaklaşık 1,5 kat arttığı sonucuna varılmıştır (Acun, 2000).

Aulia (2002), PP liflerin betonun dayanımı üzerine etkileri hakkında yapmış olduğu deneysel çalışmada, fibrile F19 tip lifleri %0,02 oranında (hacimce) kullanmıştır. Deney sonucu bu oranda katılan numunelerin basınç dayanımında %5,61 ve elastisite modülünde %5,20 kadar bir artış olduğunu belirtmiştir (Aulia, 2002).

Erbaş (2003), M12 ve F19 tip PP liflerin betonun durabilitesine etkisi hakkında deneysel çalışma yapmıştır. F19 tip lifli numunelerde eğilme çekme dayanımını arttırdığı, M12 tip lifli numunelerde ise basınç dayanımını yaklaşık %10 arttırdığı sonucuna varmıştır. İki farklı lif tipinin de basınç dayanım değerlerinde %5-ile %9 arasında olumlu bir artış olduğu gözlenmiştir (Erbaş, 2003).

Song vd. (2005), PP liflerin mekanik dayanımları ve rötre çatlakları hakkında çalışma yapmışlardır. Hacimce %0,6 kg/m³ kullanılan numunelerde basınç dayanımında %5,8; yarma dayanımında %9,7; darbeye dayanımında ilk çatlağı %11,9; kırılmayı %17 oranında arttırdığı sonucunu elde etmişlerdir (Song vd., 2005).

Karahan (2006), 19 mm boyutundaki lifleri farklı oranlarda (hacimce %0,05, %0,1 ve %0,2) kullanmışlardır. Su/çimento oranını 0,35 (çimento miktarı 400 kg/m³) oranında belirlemişlerdir. Yapılan deneyler sonucunda dayanım %0,05 oranında artarken dayanıklılıkta etkisi görülmemiştir (Karahan, 2006).

Açıkgenç vd. (2012), %1 ve %2 PP lif oranına sahip betonların mukavemet ve dayanıklılık özelliklerine etkilerini araştırmışlardır. Deneylere göre lif oranının artması su emme ve çökme değerini düşürdüğü, aşınma kaybını ve basınç dayanımını

azalttığı, eğilme çekme dayanımlarının arttırdığı sonucu elde edilmiştir (Açıkgenç vd., 2012).

Arazsu (2012), yaptığı çalışmada taze ve sertleşmiş numunelerdeki PP liflerin özelliklerini incelemiştir. Deney sonucu işlenebilirlik özelliğini için bir miktar olumsuz etkisi olmasına rağmen mekanik özellikleri için olumlu etki sağladığı bulunmuştur (Azarsu, 2012).

Topçu vd. (2016), farklı karışım oranlarına sahip PP lifli betonların (hacimce %0,6; %0,8; %0,9 ve %1,1) fiziksel ve mekanik özelliklerine etkilerini araştırmışlardır. Sonuçlara göre su emme kapasitelerinin lif tipine göre değişim gösterdiği, basınç dayanımında ve elastisite modülünde az oranda düşüş, eğilme dayanımında az oranda yükselme gözlenmiştir (Topçu vd., 2016).

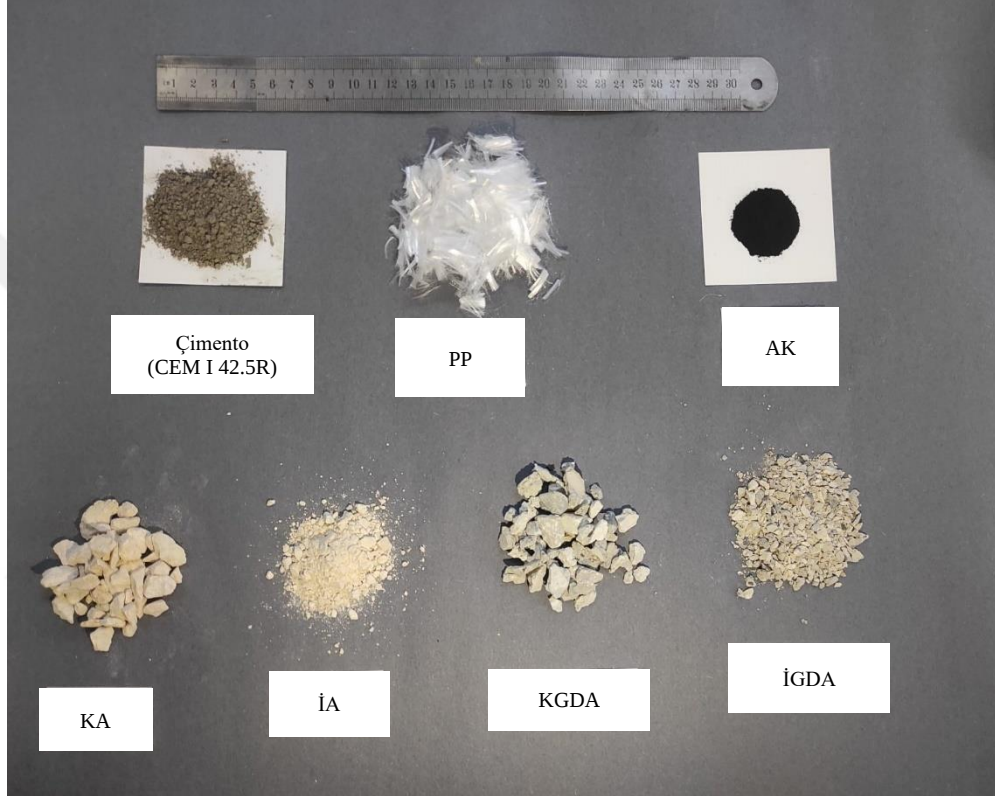
Aghaboglou vd. (2018), deneysel çalışmalarında üç farklı karışım oranına sahip beton üretilip, kontrol numunesine göre karşılaştırmışlardır. %0,8 oranına sahip PP lifli beton karışım en yüksek dayanım ve ultra ses hızına eriştiğini ulaşımlardır. %0,8 oranının üstüne sahip lifli karışımlarda dayanımın olumsuz etkilendiği sonucuna varmışlardır (Aghabaglou vd., 2018).

Rishav ve Rajini (2020), silis dumanlı ve farklı miktarlarda PP lifli (çimento ağırlığına göre %0,4-%0,8-%1,2 ve %1,6 oranında) atık takviyeli beton üretmişlerdir. Deneyde su/çimento oranı 0,40'tır. PP elyaf atığının 28 günlük basınç dayanımını %26, yarmada çekme dayanımını %34 arttırdığı kanıtlanmıştır (Rishav ve Rajini, 2020).

Tuqa (2020), GDA içeren PP lif katkılı yüksek dayanımlı beton hakkında deneysel araştırma yapmıştır. Lif uzunluğu 12 mm ve karışım oranları hacimce %0,15- %0,3- %0,45- %0,6- %0,75 ve %0,9 olarak belirlenmiştir. GDA, DA ile yer değiştirilerek %50- %100 olarak yer almıştır. Deney sonuçları liflerin işlenebilirlik özelliğini olumsuz etkilediğini, %0,6 lif katkılı numunede maksimum basınç ve eğilme dayanımı sırasıyla 80,1 MPa ve 4,9 MPa olarak bulmuşlardır (Tuqa, 2020).

3. DENEYSEL PROGRAM

Bu bölüm içerik olarak yapılan çalışmada kullanılan malzemelerin özellikleri hakkındaki detayları, laboratuvar ortamında izlenen adımları ve numunelere uygulanan deneylerin yöntemlerini barındırmaktadır.



Şekil 3.1 Karışımında kullanılan tüm malzemeler

3.1 Malzemeler

3.1.1 Çimento

Bu çalışmada TS EN 197-1 standardına uygun CEM I 42,5-R çimento tipi kullanılmıştır (Şekil 3.1). Bartın Çimento Fabrikası'ndan temin edilen çimentonun kimyasal ve fiziksel özellikleri Tablo 3.1'de yer almaktadır.



Şekil 3.2 Bartın çimentosu CEM I 42,5-R

Tablo 3.1 CEM I 42.5-R özellikleri

Oksit	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	KK
(%)	64,08	19,03	4,15	3,56	1,04	3,01	0,45	0,71	3,55
Özg. Ağır. 3,13 Özgül Yüzey (cm ² /g) 3230 Priz Baş./Bitiş (dak.) 210/270									

3.1.2 Su

Beton karışımında ve kür bakımı için suya ihtiyaç duyulmaktadır. Kullanılan karışım suyunun TS EN 1008 standardına göre temiz, içilebilir, kokusuz ve berrak olması gerekmektedir. Deneysel çalışmamızdaki karışım suyu, betona zarar verebilecek maddeler içermeyen ve sıcaklık değeri 20±5°C olan Kastamonu Üniversitesi kampüsündeki mevcut şebeke suyu kullanılmıştır. Kür bakımı ve karışım için kullanılan suyun özellikleri aşağıdaki tabloda yer verilmiştir.

Tablo 3.2 Kullanılan su analizi

Analizler	Sonuçlar	Limitler
Koku	-	-
Amonyum (mg/L)	0,02	
İletkenlik (mS/cm)	<2500	0- 2500 (TS 97, 2019)
pH	7,93	

3.1.3 Agreg

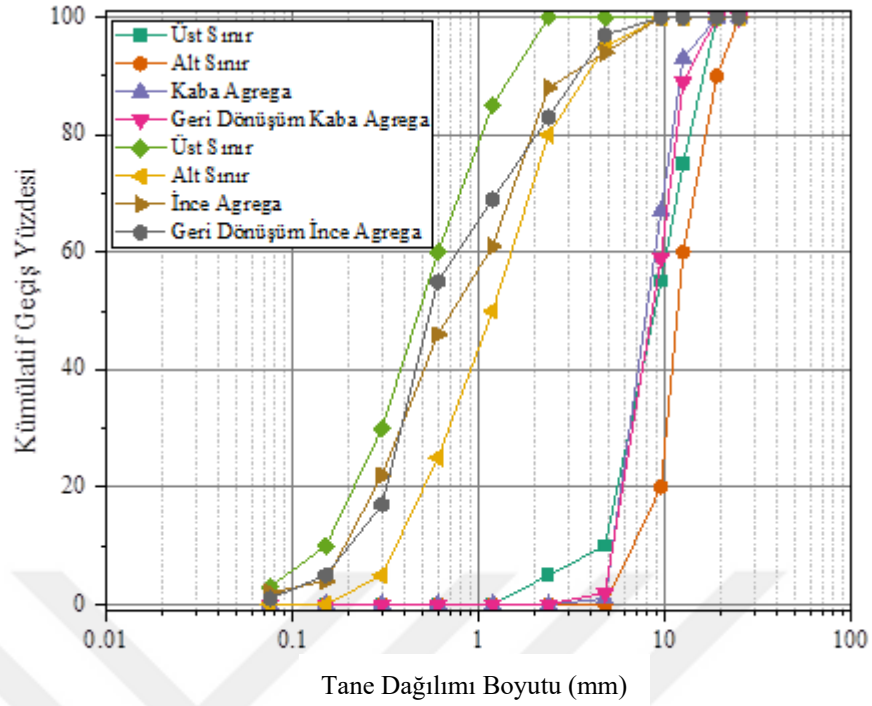
Lif katkılı SSB için üretimde DA ve GDA olmak üzere Şekil 3.4'te görüldüğü gibi iki farklı tip agrega kullanılmıştır. Elek analizine tabii tutulan agregalar boyutlarına göre ince ve kaba olarak ayrılmıştır. Doğal agregalarda (DA), 11-5 mm (kaba) ve 5-0 mm (ince) tane boyutuna; GDA'larda, 12,5 - 4,75 mm (kaba) ve 4,75-0 mm (ince) tane boyutuna sahip agregalar kullanılmıştır. 15x15x15 boyutlardaki GDA numunelerini ilk olarak press makinesinde parçalayarak konkasöre uygun boyutlara getirilmiştir. Parçalanan GDA beton örnekleri konkasörde kırılarak kaba ve ince agrega boyutu elde edilmiştir. TS 1227'ye uygun elek serisi ile agregaların tane boyutu dağılımını bulabilmek için elek analizi yapılmıştır. Bu çalışmada hacimce %0, %25, %50 ve %100 oranlarında DA ile yer değiştirilerek GDA kullanılmıştır. Kullanılan agregaların fiziksel özellikleri Tablo 3.3'de verilmiştir. Dökülen betonların s/ç oranları 0,5-0,7 olarak belirlenmiş olup, karışım tasarımı bu orana göre hazırlanmıştır.



Şekil 3.3 Geri dönüşüm agregalarının hazırlanışı



Şekil 3.4 Karışımlarda kullanılan agregalar



Şekil 3.5 Karışım agregalarının granülometre eğrisi

Tablo 3.3 Agregaların fiziksel özellikleri

Agrega	Elek Açıklığı (mm)	Özgül Ağırlık	24 Saatte Su Emmesi, (%)	İncelik Modülü
Kaba Agreg	5–12	2,68	1,67	6,34
Geri Dönüşüm Kaba Agreg	5–12	2,48	5,78	5,67
İnce Agreg	0–5	2,63	2,34	2,43
Geri Dönüşüm İnce Agreg	0–5	2,41	8,53	2,32

3.1.4 Şeker Fabrikası Atığı Külü

Karışımlarda kullanılan Şeker fabrikası atığı külü (AK), Kastamonu Şeker Fabrikası'ndan temin edilmiştir. Çimento yerine hacimce %7,5; %15 ve %30 oranında AK ikame sağlamaktadır. Şeker Fabrikası'ndan gelen AK'nin, çimento gibi yeterli inceliğe ulaşması için bilyeli öğütücüde 2 saat öğütülmüştür. Bu döngü sonucunda 150 micron inceliğinde ak elde edilmiştir.

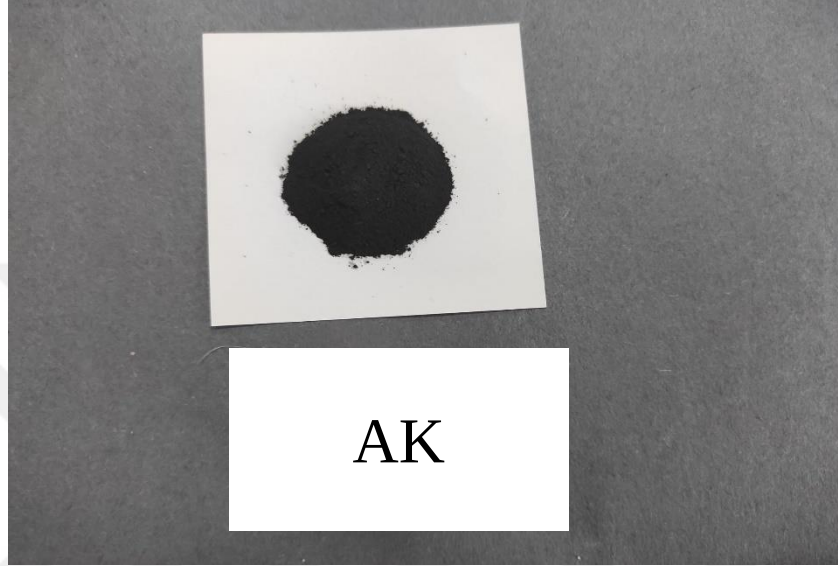
AK'nin Kimyasal ve Fiziksel Özellikleri

- AK özgül ağırlık 2,33

- Özgöl yüzey alanı (blain metodu ile belirlenmiş) 3650 cm²/g

Tablo 3.4 AK'ye ait kimyasal kompozisyon

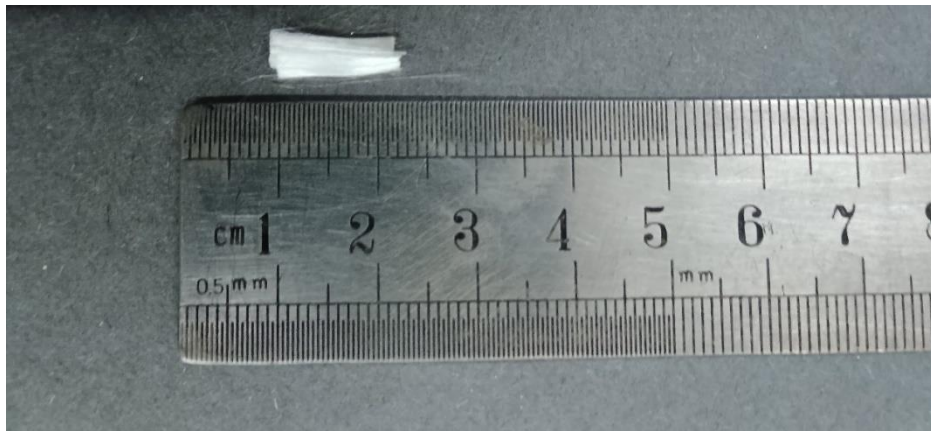
CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	Na ₂ O _(eq)	MgO	SO ₃	KK
41,9	14,2	8,6	3,2	6,9	5,3	4,7	14,7



Şekil 3.6 Şeker fabrikası atığı külü

3.1.5 Polipropilen Lif

Yapılan çalışmada hacimce %0; %0,5; %1 ve %2 oranlarında 12 mm boyundaki PP lif kullanılmıştır. Lifin teknik özellikleri Tablo 3.5'de gösterilmektedir.



Şekil 3.7 Polipropilen lif

Tablo 3.5 Polipropilen lifin teknik özellikleri

Görünüm	Kıvrımlı beyaz lifler
Yoğunluk (g/cm ³)	0,91
Uzunluk (mm)	12
Tane boyutu (µm)	34
l/d	400
Çekme Dayanımı (MPa)	450
Elastisite Modülü (MPa)	>3500
Kırılma Uzaması (%)	20
Erime Isısı (°C)	170

3.2 Beton Karışımı ve Kür Bakımı

Bu çalışmada DA (ince-kaba), GDA (ince-kaba), AK ve PP lifi kullanılarak üretilen SSB'nin karışım tasarımı Tablo 3.6'de detaylıca gösterilmiştir. Yapılan tasarım 1 m³'e göre hesaplanmıştır. Toplamda 16 farklı seri beton üretimi (Taguchi L16 ortogonal serisi) gerçekleştirilmiştir. 4 farklı tip agrega kullanılmıştır. Agregalar doymun yüzey kuru halindedir. AK belirli oranlarda çimento yerine ikame etmiştir. Her seriden 14 küp ve 6 silindir numune elde edilmiştir. Numunelerin hepsi TS 1247'de belirtilen kür tanklarında 20±5°C sıcaklık aralığında su kürü uygulanmıştır. Belirli yaş aralıklarında (7, 28 ve 90 gün) bekleyen numuneler fiziksel, kimyasal ve mekanik testlerden geçmiştir.

Tablo 3.6 Karışım tasarımı

Karışım İsmi	Karışım Oranları (%)				Malzeme Miktarları (kg/m ³)							
	KGDA	İGDA	AK	PP	KGDA	KDA	İDA	İGDA	Çimento	AK	Su	PP
K0İ0B0P0	0	0	0	0	0	740	1109	0	350	0	211	0,0
K0İ25B7.5P0.5	0	25	7,5	0,5	0	730	822	277	324	26	207	4,5
K0İ50B15P1	0	50	15	1	0	722	541	547	297	52	204	9,1
K0İ100B30P2	0	100	30	2	0	705	0	1068	245	105	197	18,2
K25İ0B7.5P1	25	0	7,5	1	183	549	1097	0	324	26	210	9,1
K25İ25B0P2	25	25	0	2	182	546	819	276	350	0	207	18,2
K25İ50B30P0	25	50	30	0	178	535	535	540	245	105	203	0,0
K25İ100B15P0.5	25	100	15	0,5	177	531	0	1074	297	52	198	4,5
K50İ0B15P2	50	0	15	2	361	361	1085	0	297	52	210	18,2
K50İ25B30P1	50	25	30	1	356	356	802	270	245	105	206	9,1

Tablo 3.6'nın devamı

Karışım İsmi	Karışım Oranları (%)				Malzeme Miktarları (kg/m ³)							
	KGDA	İGDA	AK	PP	KGDA	KDA	İDA	İGDA	Çimento	AK	Su	PP
K50İ50B0P0.5	50	50	0	0,5	360	360	540	546	350	0	204	4,5
K50İ100B7.5P0	50	100	7,5	0	354	354	0	1073	324	26	197	0,0
K100İ0B30P0.5	100	0	30	0,5	710	0	1066	0	245	105	209	4,5
K100İ25B15P0	100	25	15	0	712	0	801	270	297	52	206	0,0
K100İ50B7.5P2	100	50	7,5	2	708	0	531	537	324	26	204	18,2
K100İ100B0P1	100	100	0	1	703	0	0	1064	350	0	198	9,1

K50İ25B30P1: KGDA%50, İGDA%25, AK%30 ve PP%1 içeriğini gösterir.

(KGDA: Kaba Geri Dönüşüm Agregası; İGDA: İnce Geri Dönüşüm Agregası; AK: Şeker Fabrikası Atığı Külü; PP: Polipropilen Lif; KDA: Kaba Doğal Agregası; İDA: İnce Doğal Agregası)

3.3 Deneysel Yöntemler

3.3.1 Taze Betonda Çökme Deneyi/ Slump Test

Taze betonun çökme testi veya çökme konisi testi, hazırlanan karışımın kalitesini, işlenebilirliğini ve kıvamını tayin etmek için kullanılır. Genellikle su-çimento oranını gösteren işlenebilirliği bulmak için beton çökme değeri kullanılır, ancak malzemelerin özellikleri, karıştırma yöntemleri, dozaj, katkıları vb. gibi çeşitli faktörler de betonun çökme değerini etkilemektedir.

Bu çalışmada TS EN 12350-2 Beton- Taze Beton Deneyleri- Bölüm 2: Çökme (Slump) Deneyi standardına göre çökme testi uygulanmıştır. Kesik koni kalıbına (koni üst çapı: 100mm, koni alt çapı: 200 mm, yükseklik: 300mm) üç eşit tabaka halinde, her katman sıkıştırma çubuğu (çap:16 mm, uzunluk: 600 mm) yardımı ile 25 defa şişlenerek yerleştirilmiştir. Yerleştirme işlemi tamamlandıktan sonra koni içinde mevcut bulunan taze haldeki betonu sarsmadan, 5-10 saniye arasında sabit hızla koni yukarı çekilmiştir. Taze haldeki betonun yüzey seviyesi ile çöken harcın arasındaki mesafe cetvel yardımıyla ölçüp, çökme değeri ölçülmüştür.

3.3.2 Fiziksel Deneyler

100x100x100 mm boyutlarındaki küp numunelerde ASTM C 20 ve ASTM C 642 standartlarına göre su emme kapasiteleri, porozite değerleri ve birim hacim ağırlıkları belirlenmiştir. 90 günlük numunelerde fiziksel deneyler tamamlanmıştır.

3.3.3 Basınç Dayanım Testi

Beton karışımları, bir yapının tasarım gereksinimlerini karşılamak için çok çeşitli mekanik ve dayanıklılık özellikleri sağlayacak şekilde tasarlanabilir. Betonun basınç dayanımı, mühendislerin bina ve diğer yapıların tasarımında kullandığı en yaygın performans ölçüsüdür. Basınç dayanımı, silindir ya da küp beton numunelerinin bir basınç test makinesinde kırılmasıyla ölçülür. Deneyde TS EN 12390-3'e göre 10x10x10 cm küp numunelerin 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanımları ölçülmüştür. Kür havuzunda bulunan numuneler test öncesi yeterli kuruluğa ulaşmışlardır.

3.3.4 Yarmada-Çekme Dayanım Testi

Betonun eğilme mukavemeti, takviyesiz betonun çekme mukavemetinin bir ölçüsüdür. Test edilen beton kirişin veya levhanın bükülmeye karşı direnç gösterme yeteneğini ifade eder. Basınç dayanımında olduğu gibi, betonun eğilme dayanımı da inşaat projelerinde kullanılmadan önce iyice test edilmesi gereken betonun bir diğer önemli özelliğidir. Çatlama eğiliminden dolayı betonun bükülme mukavemeti genellikle basınç mukavemetinden çok daha düşüktür (basınç mukavemetinin %10-20'si arasında) (Almanaratain, 2021). TS EN 12390-6 standartlarına göre gerçekleştirilen deneyde, yeterli kuruluğa sahip 10x20 cm'lik silindir numunelerin 7, 28 ve 90 günlük yarmada-çekme dayanımları ölçülmüştür.

3.3.5 Kapilarite Deneyi

Kapilarite deneyleri, beton bir yapının geçirgenlik özellikleri hakkında bilgi edinmek için yaygın olarak kullanılan bir test yöntemidir. Kılcal su emme testi, ASTM C1585'te önerilen geleneksel gravimetrik yöntemle göre yapılmaktadır. Deneyden önce numuneler sabit ağırlığa varana kadar $105 \pm 5^{\circ}\text{C}$ 'de etüvde bekletilmektedir. Etüv kurusu ağırlığa sahip numuneler, ayrı çatlak bulunan numunelerinin yan yüzeyleri ve kısmi alt yüzeyi, tek çatlaktan tek boyutlu su akışını sağlamak amacıyla likit su yalıtım malzemesi ile kapatılmaktadır. Her bir numunenin, su emme testinden önce ilk ağırlıkları kaydedilir ve daha sonra su içeren sığ bir plastik tepsi içindeki iki hatlı destek üzerine yerleştirilir. Kılcal su emme testi sırasında numunenin tek çatlaklı alt yüzeyi daima su ile temas halinde olacak şekilde batırma derinliği 5 ± 1 mm olarak

tutulmaktadır. Deney başlangıcından 1140. dakikaya (24 saate) kadar test düzeneğinden çıkarılır ve emilen suyun kütle değişimini kaydetmek için 0,01 g hassasiyetle elektronik teraziye yerleştirilir. Kılcal katsayılar, ağırlık farkları numune yüzey alanı ve zamanı ile ilişkilendirilerek hesaplanmıştır.

3.3.6 Aşınma Direnci Deneyi

Aşınma testi, ASTM C944/ C944-M standartlarını kullanarak yapılmıştır. 90 gününü tamamlamış 3 adet 10x10x10 cm boyutundaki küp numuneler kür havuzundan çıkartılarak yeterince kuruması beklenmektedir. Her numunenin her üç farklı yüzeyine ayrı ayrı olmak üzere, dikey yönde 97 N, 200 rpm hıza sahip, 750 mm çapındaki aşındırıcı çelik diskler 2 dakikalık zaman aralıklarında 6 dakika boyunca aşındırma testi uygulanmaktadır. Deney süresince aşınmayı saptayabilmek için öncesinde ve sonrasında kalınlık ölçümü yapılmaktadır. Yüzdelik ağırlık kaybı için, her yüzeyinin kalınlıkları 2 dakikalık zaman aralıklarında kaydedilmektedir. Her bir küp numunenin üç yüzeyindeki ağırlık kaybının ortalaması hesaplanmaktadır. Yüzdelik ağırlık kaybı hesaplanan her numune kayda alınmaktadır.

Ağırlık kaybının % 'sini bulmak için Denklem 3.1 kullanılmıştır.

$$\% \text{ Ağırlık kaybı} = m_1 - m_2 \times 100 \quad (3.1)$$

m_1 = Testten önceki ağırlığı

m_2 = Testten sonraki ağırlığı

3.3.7 Donma-Çözülme Dayanıklılığı

Donma-çözülme döngüsü, beton ve tuğla gibi inşaat yapı malzemelerindeki hasarın önemli bir nedenidir. Donma-çözülme hasarı, suyun sert, gözenekli bir malzemenin boşluklarını doldurması ve ardından donup genleşmesi sonucu meydana gelir. Donmuş suyun hacmi sıvı sudan %9 daha fazladır, dolayısıyla su donduğunda çevredeki malzemeye basınç uygulanır ve basınç malzemenin çekme mukavemetini aştığında çatlaklar meydana gelir. Bu işlem sırasında boşluklar genişletilerek bir sonraki erime sırasında ilave su birikmesi sağlanır; bu, bir sonraki dondurma sırasında

ilave çatlamalara neden olur. Sonraki donma-çözülme döngülerinde önemli hasar meydana gelebilir (TechnicalNews, 2019).

ASTM C666 standardına uygun olarak 90 gününü kür havuzunda tamamlamış 10x10x10 cm boyutundaki küp numunelerin üzerinde donma-çözülme deneyi gerçekleştirilmektedir. Numunelerin, istenilen (90-120-150 döngü gibi) donma-çözülme tekrarları bitiminde fiziksel farklılıkları incelendikten sonra ağırlık kayıpları ve basınç dayanımları kaydedilmektedir.

3.3.8 Magnezyum Sülfat ($MgSO_4$) ve Sodyum Sülfat (Na_2SO_4) Dayanıklılığı

Sülfat tuzlarının çözelti halinde bulunduğu sulu ortamlar beton için tehlike yaratabilmektedir. Bu ortamlar toprak, deniz suyu, atık sular veya yağmur suları olabilir. Magnezyum sülfat ($MgSO_4$) ve sodyum sülfat (Na_2SO_4) halinde bulunan sülfat iyonları sertleşmiş beton ile reaksiyona girerek yeni ürünler oluştururlar. Oluşan ürünler betonun hacimsel stabilizasyonunu bozarak, çatlak oluşumuna neden olmaktadır.

10x10x10 cm boyutundaki küp numuneler 28 gün kür bakımını bitirdikten sonra sudan çıkartılıp %10 $MgSO_4$ ve %10 Na_2SO_4 çözeltisi hazırlanıp ayrı ayrı özel kabinlere yerleştirilmektedir. Kür tankından çıkarılan numuneler yeterli kuruluğa ulaştığında ağırlıkları hassas terazi ile ölçülüp, kaydedilmektedir. 90 günlük test süresinde her 30 günlük periyotlarda çözelti yenilenmektedir. $MgSO_4$ ve Na_2SO_4 etkilerini hesaplayabilmek için hassas terazi ile tüm numunelerin ağırlık ölçümleri yapılmış olup, ağırlık kaybı hesaplanmaktadır. Bu işlem bittikten sonra numunelerin basınç dayanımları belirlenmektedir.

3.3.9 Sodyum Klorür ($NaCl$) Dayanıklılığı

Beton, yapı olarak mükemmel geçirimsizliğe sahip olmayan bir malzemedir ve çeşitli ortam koşulları ile bazı klor iyonları betonun iç bölgelerine sızabilir. Cl iyonlar, betonarmenin içerisinde bulunan donatıların üzerinde korozyonun başlaması için ortam hazırlamaktadır. Donatının korozyona uğramasıyla birlikte, beton içerisindeki donatı zayıflamaya başlar ve donatının taşıma kapasitesi düşer. Bununla birlikte

betonda iç gerilmeler sonucu çatlaklar ve yüzey bölgelerinde pullanma meydana gelebilir.

Küp numunelerden 10x10x10 cm boyutunda 28 gün kür bakımını bitirdikten sonra sudan çıkartılıp %5 sodyum klorür (NaCl) çözeltisi hazırlanıp ayrı ayrı özel kabinlere yerleştirilmektedir. Kür tankından çıkarılan numuneler yeterli kuruluğa ulaştığında ağırlıkları hassas terazi ile ölçülüp, kaydedilmektedir. 90 günlük test süresinde her 30 günlük periyotlarda çözelti yenilenmektedir. NaCl etkilerini hesaplayabilmek için hassas terazi ile tüm numunelerin ağırlık ölçümleri yapılmış olup, ağırlık kaybı hesaplanmaktadır. Bu işlem bittikten sonra numunelerin basınç dayanımları belirlenmektedir.

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1 Çökme Deneyleri

Bu çalışmadaki hazırlanan 16 seri taze beton karışımları çökme değeri sıfır slump olacak şekilde üretilmiştir. Şekil 4.1’de üretilen betonların çökme deneylerinin detayları yer almaktadır. Üretilen numunelerin su/bağlayıcı oranı 0,56-0,6 arası değişmektedir. Tüm numunelerde PP lif oranının yükselmesi işlenebilirliğin azaldığı ve topaklanma eğiliminin yüksek olduğu gözlemlenmiştir. İşlenebilirliğin düşmesindeki en büyük neden, artan PP lif miktarı ile topaklanmaların meydana gelmesi ve karışım içerisindeki malzemelerin hareket kabiliyetinin azalmasıdır.



Şekil 4.1 Karışımların çökme deneyleri

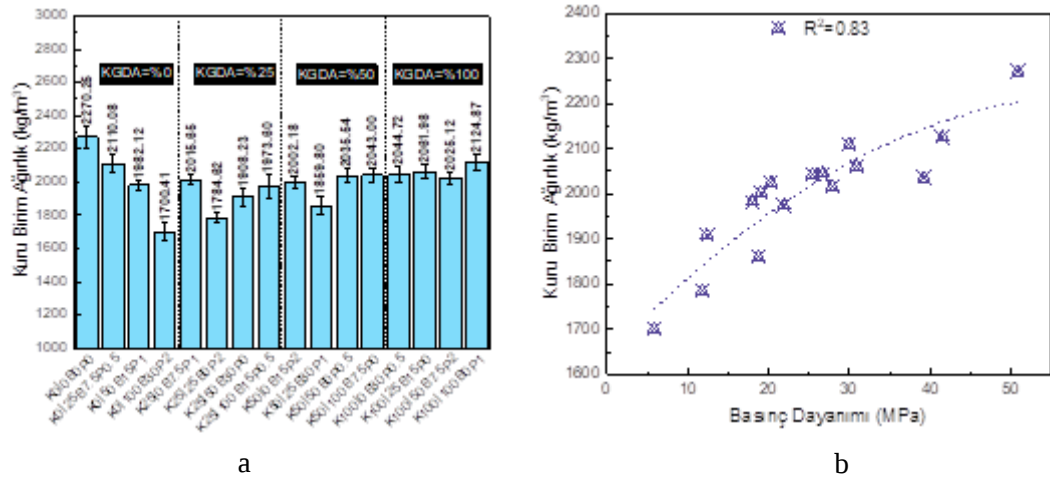
Karahan (2006), UK, PP lif ve çelik liflerin betona etkisini incelemiştir. Yapılan karışımda hacimsel olarak PP lifler %0,05; %0,1 ve %0,2 oranında beton üretmişlerdir. PP lif miktarının artması işlenebilirliği azaltmış olup, UK katkısıyla işlenebilirliğin arttığı gözlemlenmiştir. (Karahan, 2006)

Açıkgenç vd. (2012), yapmış olduğu çalışmada farklı miktarda kullanılan PP lifin betondaki fiziksel, mekanik ve durabilite etkisini araştırmışlardır. A tipi (stable fiber) PP lifi ve B tipi (monofilament) PP lifinin hacimsel olarak %1 ve %2 yer değişimleri ile beton üretimi yapmışlardır. Taze haldeki beton özellikleri incelendiğinde lif oranının artmasıyla çökme değerinin azaldığını gözlemlemişlerdir (Açıkgenç vd., 2012).

Literatür taramalarına göre GDA'nın yüzey pürüzlülüğüne sahip olması nedeniyle GDA içeren karışımlarda işlenebilirliği arttırdığı ve kullanılan karışım suyuna daha fazla ihtiyaç duyduğu belirtilmiştir. Yapılan bu çalışmada kaba ve ince GDA kullanılmıştır. İGDA içeren numunelerde yüzey alanı arttığı için daha fazla su ihtiyacı duyulmaktadır. KGDA ise yüzey pürüzlülüğü düşük değerlerde olduğu için kıvama olumlu etkisi olduğu gözlemlenmiştir. Durmuş vd. (2008) farklı oranlarda kaba GDA kullanarak elde ettikleri taze beton karışımlarının, slump değerlerinin 18-22 cm arasında değişiklik gösterdiğini, beton karışımlarda kullanılan GDA miktarı arttıkça slump değerinin düştüğünü açıklamışlardır (Durmuş vd., 2008).

4.2 Fiziksel Deneyler

Şekil 4.2 a kısmında numunelerin kuru birim ağırlıkları (KBA), b kısmında ise KBA-basınç dayanımı korelasyonu yer almaktadır. KBA en düşük ölçülen (1700,41 kg/m³) K0İ100B30P2 numunesinin basınç dayanımı yaklaşık 6 MPa değerinde ölçülmüştür. Kontrol numunesi olan K0İ0B0P0, yapılan 16 karışımda en yüksek KBA (2270,25 kg/m³) ve basınç dayanımına (yaklaşık 51 MPa) ulaşmıştır. Buna bağlı olarak Şekil 4.2 b kısmı incelendiğinde KBA düşük olan numunelerin basınç dayanımının da düşük olduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 4.2 a) Kuru birim ağırlık ve b) Kuru birim ağırlık ile basınç dayanımı korelasyonu

KGDA kullanılmayan (K0) numuneleri referans alındığında, K25 oranında kullanılan numunelerde KBA oranında %4,72 azalma, K50 oranında kullanılan numunelerde ise %1,52'lik bir azalma gözlemlenmiştir. K100 oranında kullanılan numunelerde ise

%2,40'lık KBA artış meydana gelmiştir. İGDA kullanılmayan (İ0) numuneleri referans alındığında KBA bakımından azaldığı görülmüştür. Bu azalmalar İ25, İ50 ve İ100 serilerinde sırasıyla %6,20; %4,58 ve %5,89'dur.

Batman (2018), yaptığı çalışmada ince ve kaba GDA kullanarak hacimce %15, %30, %45 ve %60 oranında betonlarda çeşitli testler uygulanmıştır. Bu karışıma göre %60 GDA numunesinin en düşük birim hacim ağırlığı elde ettiği görülmüştür. %45 ikame oranına kadar belirgin bir fark görülme de %50 oranını aşan numunelerde referans numunesine göre ciddi farklar ortaya çıkmıştır (Batman, 2018).

Dada (2022), tarafından %25, %50, %75 ve %100 ikameli GDA kullanılarak kendinden yerleşen betonun etkileri araştırılmıştır. Deney sonuçları incelendiğinde tüm serilere göre GDA oranının artması sertleşmiş betonun birim hacim ağırlığında azalma gözlemlenmiştir. Bunun nedeni GDA ağırlığının DA ağırlığına göre daha hafif olmasıyla ilişkilendirmişlerdir. Bunun haricinde DA ile hazırlanan harç daha işlenebilir formda olduğu için, GDA ile üretilen harçlarda yerleştirilirken ve sıkıştırılırken boşluklu bir yapı oluşmasından kaynaklandığını belirtmişlerdir (Dada, 2022).

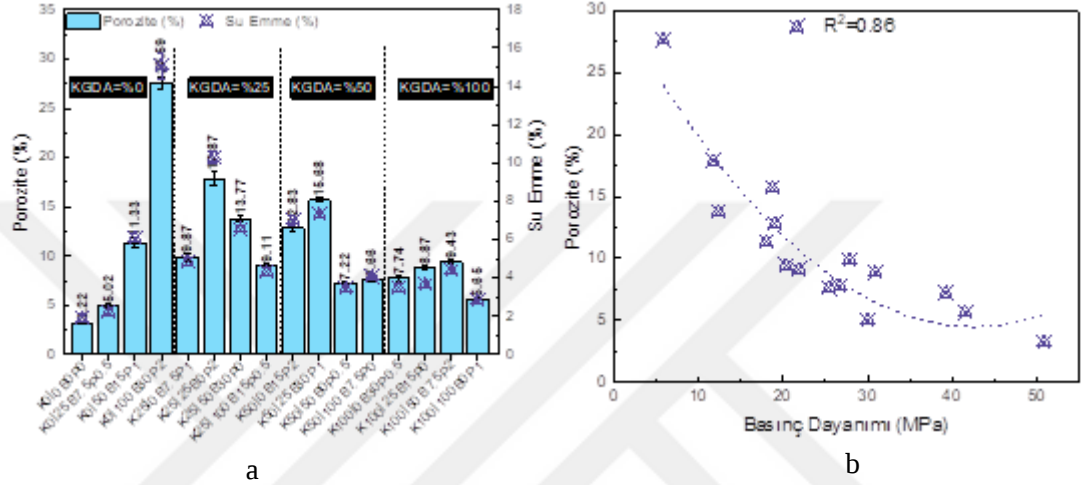
Hazırlanan seriler AK oranlarına göre incelendiğinde AK kullanılmayan (B0) numuneleri referans alındığında, AK oranının artmasıyla KBA'larda düşüş gözlemlenmiştir. B7.5 serisinde %0,26; B15 serisinde %2,38 ve B30 serisinde %8,55 oranında azalmalar elde edilmiştir.

PP lif kullanılmayan (P0) numuneleri referans alındığında, P0,5 oranında kullanılan numunelerde %1,44'lık düşüş. P1 oranında kullanılan numunelerde %3,63'lük düşüş, P2 oranında kullanılan numunelerde %9,31'lik oranında bir kba düşüşü meydana geldiği gözlemlenmiştir.

GDA içeren beton numunelerin içerdikleri PP oranı arttıkça yoğunluğu azalmaktadır. Bunun nedeni PP, taze haldeki betonda aralarındaki statik çekim yüzünden topaklanma eğilimi gösterirler ve su tutma özelliği yüzünden işlenebilirliği azaltırlar. Bu nedenler betonda gözenekliliği artar. Gözenekliliği artan numunelerin yoğunlukları düşmektedir. Karışımın işlenebilirliğinin düşmesi harcın kalıplara yerleştirilmesini de

zorlaştırmaktadır. Kısmi değerlerde de olsa PP içermeyen numunelere göre daha boşluklu bir malzeme oluşturmaktadır. PP miktarının yüksek olduğu numunelerde birim ağırlık değeri daha düşüktür.

Literatürde birçok çalışma polipropilen lifin gözeneklilik oranını artırdığını göstermektedir (Durgun, 2020; Gençolives vd., 2011).



Şekil 4.3 a) Porozite ve su emme, b) Porozite ve basınç dayanımı korelasyonu

%27,59 oranıyla en yüksek porozite- en düşük basınç dayanımı değerine sahip olan numune K0İ100B30P2'dir. En düşük porozite- en yüksek basınç dayanımına sahip numune K0İ0B0P0 olan referans numunesidir.

KGDA oranlarına göre porozite değişimi incelendiğinde K25 serilerinde %0,87'lik artış, K50 ve K100 serilerinde ise sırasıyla %10,94 ve %3,87'lik azalma meydana gelmiştir. İGDA kullanılan İ25, İ50 ve İ100 serilerinde ise sırasıyla %3,44; %2,02; %4,08'lik oranında porozite artışı meydana geldiği gözlemlenmiştir.

AK kullanılmayan (B0) numuneleri referans alındığında, B7,5 oranında kullanılan numunelerde %0,49'luk düşüş, B15 oranında kullanılan numunelerde %2,05'lik bir artış, B30 oranında kullanılan numunelerde %7,71'lik oranında porozite artışı meydana geldiği gözlemlenmiştir.

PP kullanılmayan (P0) numuneleri referans alındığında, P0,5 oranında kullanılan numunelerde %1,11'lik düşüş. P1 oranında kullanılan numunelerde %2,25'lik artış,

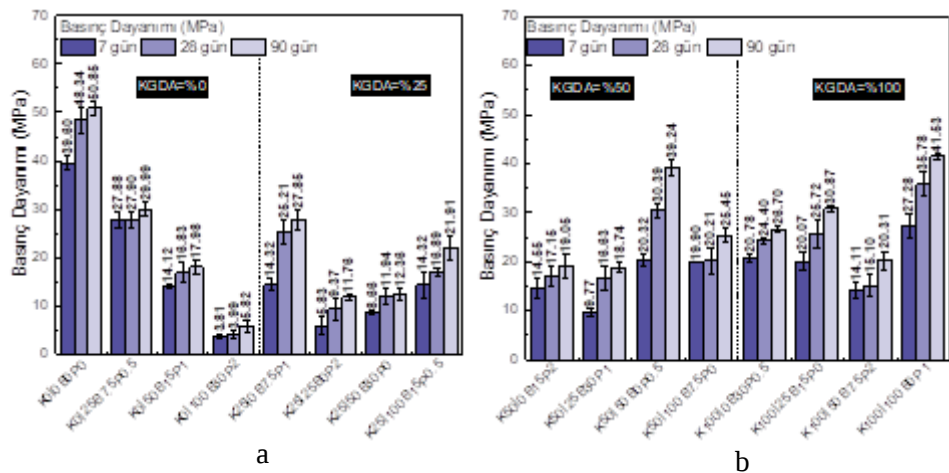
P2 oranında kullanılan numunelerde %8,55'lik oranında porozite artışı meydana geldiği gözlemlenmiştir.

Kunieda vd., (2014), Geri dönüşüm agrega çalışmalarında, karışımdaki lif miktarı arttıkça su emme değerinin azaldığı, sadece hacimce %1 lif katkılı 20 mm boyutlu beton parçacıklarının su emme değerinin arttığı sonucuna varmışlardır. Yalın betonda 20 mm boyutlu beton parçacıklarının su emme değerini %6,68 iken hacimce %1 PP lif katkısında %7,6 hesaplamışlardır. Bu tez çalışmasında, 15-22,4 mm boyutlarındaki lifsiz beton parçacıklarında su emme değeri %4,32 iken lifli geri dönüşüm agregalarının su emme değeri %5,26'dır. Geri dönüşüm agregalarının su emme değeri artmıştır. PP lifli geri dönüşüm agregalarının su emme değeri PP lifsiz geri dönüşüm agregalarından fazladır.

4.3 Basınç Dayanım Testleri

Bu çalışmada kür uygulanan numuneler 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanım testine tabi tutulmuştur. Şekil 4.4'te karışımda yer alan numunelerin 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanım test sonuçları yer almaktadır.

Bu sonuçlar incelendiğinde en yüksek basınç dayanımına sahip olan K0İ0B0P0 karışım serisinin olduğu, en düşük basınç dayanımına sahip olan karışım serisinin ise K0İ100B30P2 olduğu görülmektedir.



Şekil 4.4 a) KGDA içerikleri %0 ve %25 ve b) %50 ve %100 olan SSB numunelerinin basınç dayanımı

KGDA %0 içerikli numunelerin kıyaslanmasında erken ve geç dayanım (39,6-50,85 MPa) veren numune referans (K0İ0B0P0) numunesi olmuştur. Aynı şekilde K0İ100B30P2 içerikli numunenin erken ve geç yaş dayanımları (3,81-5,82 MPa) düşük ölçülmüştür. Bunun nedeni lif ve AK oranının bu karışım dizaynında yüksek olmasıdır. Lif miktarının yüksek olması, üretilen numunede boşlukları arttıracak için dayanımlara olumsuz etkisi vardır. Ayrıca işlenebilirlik düştüğü için yerleştirilme ve sıkıştırma işlemlerinin iyi yapılması gerekmektedir. KGDA %25 içerikli numune grubunda mukavemet değerleri en yüksek değer K25İ0B7.5P1 numunesinde (27,85 MPa) elde edilmiştir. K25İ25B0P2 ve K25İ50B30P0 numunelerinin geç dayanımları birbirlerine çok yakın sonuçlar vermiştir. AK, yapı olarak çimento kadar bağlayıcılık ve puzolanik aktivite gösteremediği için mukavemete çok bir etkisi görülmemiştir. AK'nin, betonda erken yaş dayanımına biraz katkı sağladığı düşünülmektedir. KGDA %50 içerikli numune grubunda ise basınç dayanımı en yüksek olan K50İ50B0P0,5 olan numunedir (39,24 MPa). En düşük dayanıma sahip olan numune ise K50İ25B30P1'dir (18,74 MPa). Referans grubundan sonra en iyi basınç dayanımı elde edilen grup KGDA %100, K100İ100B0P1 numunesi (41,53 MPa) olmuştur. Literatürlerde GDA ile üretilen betonların referans betonlarına göre basınç dayanımlarında %5-10 oranında azalma görülmektedir. Fakat bu oran GDA'nın kalitesi ve boyutuna göre değişiklik gösterebilmektedir. Yapılan çalışmada referans numunesine göre K100İ100B0P1 numunesinin basınç dayanımında %18'lik bir azalma meydana gelmiştir.

KGDA kullanılmayan (K0) numuneleri 90 günlük basınç dayanımları referans alındığında, K25 oranında kullanılan numunelerde %29,40'lik düşüş, K50 oranında kullanılan numunelerde ise %2,06'lik bir düşüş gözlemlenmiştir. K100 oranında kullanılan numunelerde ise %14,11'lük oranında dayanım artışı meydana geldiği gözlemlenmiştir.

İGDA kullanılmayan (İ0) numuneleri 90 günlük basınç dayanımları referans alındığında, İ25 oranında kullanılan numunelerde %26,58'lük düşüş, İ50 oranında kullanılan numunelerde %27,77'lik bir düşüş, İ100 oranında kullanılan numunelerde %23,88'lik oranında dayanım düşüşü meydana geldiği gözlemlenmiştir.

Demirel ve Şimşek (2015), 212 lt. suyun kullanıldığı, su/çimento oranı 0,53 olan beton karışımlarından C 25 beton sınıfı elde edilmeye çalışılan deneylerinde, kaba ve ince GDA'yı ayrı ayrı %10, %20, %30, %40 ve %50 ikame oranların da kullanmanın yanında, karışım hesabındaki ince ve kaba DA, yerine aynı miktarda tamamı ince ve kaba GDA kullanılarak elde edilen beton numuneleri 28 ve 90 günlük basınç dayanımı testine tabi tutmuşlardır. Sonuç olarak bütün ikame oranlarında hedef dayanıma ulaşıldığı görülmüş olup kaba GDA kullanılarak üretilen betonlar ile ince GDA kullanılarak üretilen betonlar kıyaslandığında kaba GDA'nın kullanıldığı betonların dayanımının daha yüksek olduğu belirtilmiştir (Demirel ve Şimşek, 2015).

AK kullanılmayan (B0) numuneleri 90 günlük basınç dayanımları referans alındığında, B7,5 oranında kullanılan numunelerde %27,75'lik düşüş, B15 oranında kullanılan numunelerde %37,38'lik bir düşüş, B30 oranında kullanılan numunelerde %55,62'lik oranında dayanım düşüşü meydana geldiği gözlemlenmiştir.

PP kullanılmayan (P0) numuneleri 90 günlük basınç dayanımları referans alındığında, P0,5 oranında kullanılan numunelerde %1,41'lik düşüş. P1 oranında kullanılan numunelerde %11,21'lik düşüş, P2 oranında kullanılan numunelerde %52,34'lük oranında dayanım düşüşü meydana geldiği gözlemlenmiştir.

Betona uyumlu polipropilen lifler kullanılarak yapılan bir diğer çalışmada karışımlar tanık numuneleri ile kıyaslanmıştır. Beton karışımları içerisine polipropilen lifler %0,2-%1,0 arasında değişen oranlarda ilave edilmiştir. Yapılan eğilme ve basınç deneyleri sonucunda önemli bir dayanım artışı görülmemiştir. Hatta lif miktarı arttıkça basınç dayanımında %7 dolaylarında azalmalar izlenmiştir. Bunun beraberinde numunelerin darbe mukavemetlerinde %200'lere varan artışlar görülmüştür.

4.4 Yarmada-Çekme Dayanımı Testi

Şekil 4.5'te karışımda yer alan numunelerin 7, 28 ve 90 günlük yarmada-çekme dayanım test sonuçları yer almaktadır.

KGDA kullanılmayan (K0) numuneleri 90 günlük yarmada çekme dayanımları referans alındığında, K25 oranında kullanılan numunelerde %7,18'lik düşüş, K50

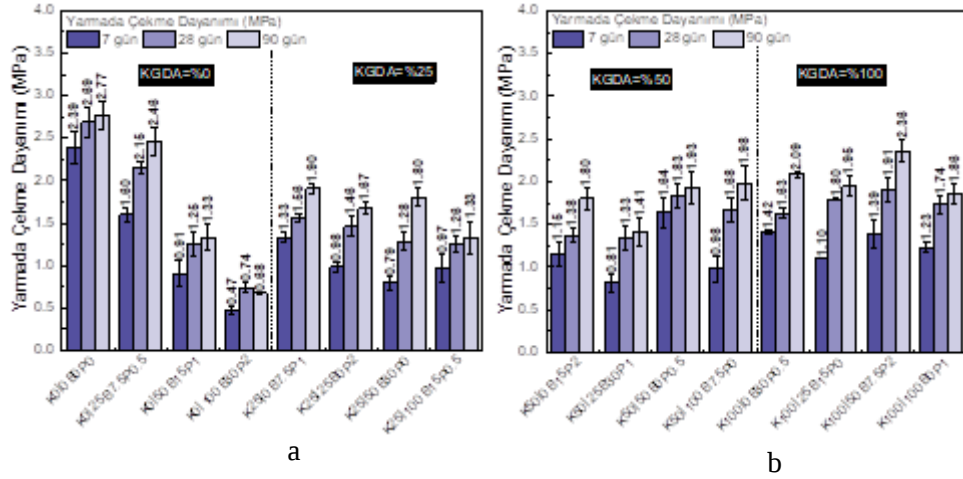
oranında kullanılan numunelerde ise %1,66'lık bir düşüş gözlemlenmiştir. K100 oranında kullanılan numunelerde ise %14,36'lık oranında dayanım artışı meydana geldiği gözlemlenmiştir.

İGDA kullanılmayan (İ0) numuneleri 90 günlük yarmada çekme dayanımları referans alındığında, İ25 oranında kullanılan numunelerde %12,62'lük düşüş, İ50 oranında kullanılan numunelerde %13,08'lik bir düşüş, İ100 oranında kullanılan numunelerde %31,78'lik oranında dayanım düşüşü meydana geldiği gözlemlenmiştir.

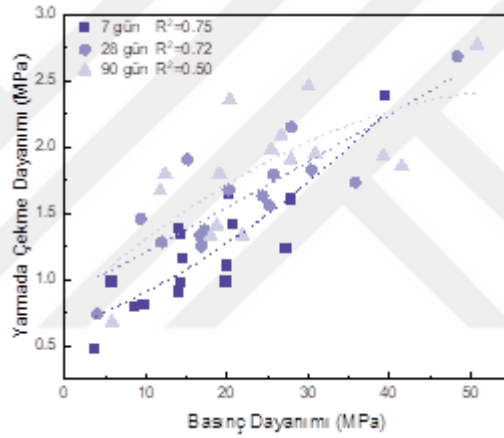
Köken vd. (2010), birinci grupta, kullanılan agreganın tamamen geri dönüşüm agregası (GDA), ikinci grupta kum (0-4 mm) olarak kırma taş agrega ve kaba agrega olarak GDA (4- 16 mm), üçüncü grup karışımında ise agreganın tamamı kırma taş agregadan kullanılarak üç farklı deney grubu oluşturmuştur. 28 günlük beton basınç dayanımlarına göre incelediğinde, %100 GDA ile üretilen 1. karışımın beton basınç dayanımı, %100 kırma taş agrega ile üretilen 3. karışımından %33, GDA'nın %61 oranında kullanıldığı 2. Karışımın beton basınç dayanımı ise %100 kırma taş agrega kullanılarak hazırlanan 3. Karışımından %18 daha az çıktığını ve beton karışım oranında kullanılan GDA miktarı arttıkça 7 ve 28 günlük beton basınç dayanımı ile yarmada çekme dayanımının düştüğünü tespit etmiştir (Köken vd., 2010).

AK kullanılmayan (B0) numuneleri 90 günlük yarmada çekme dayanımları referans alındığında, B7,5 oranında kullanılan numunelerde %5,83'lük artış, B15 oranında kullanılan numunelerde %22,33'lük bir düşüş, B30 oranında kullanılan numunelerde %27,18'lik oranında dayanım düşüşü meydana geldiği gözlemlenmiştir.

PP kullanılmayan (P0) numuneleri 90 günlük yarmada çekme dayanımları referans alındığında, P0,5 oranında kullanılan numunelerde %8,45'lik düşüş. P1 oranında kullanılan numunelerde %23,47'lik düşüş, P2 oranında kullanılan numunelerde %23,47'lik oranında dayanım düşüşü meydana geldiği gözlemlenmiştir.



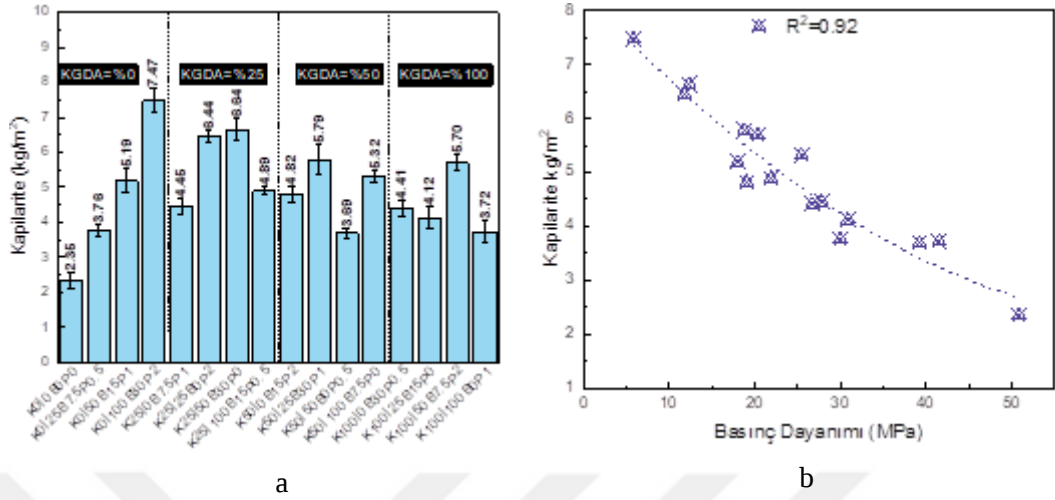
Şekil 4.5 a) KGDA içerikleri %0 ve %25 ve b) %50 ve %100 olan SSB numunelerinin yarmada çekme dayanımları



Şekil 4.6 Basınç dayanımı ve yarmada çekme dayanımı korelasyonu

Şekil 4.6'da basınç dayanımı ve yarmada- çekme dayanımının korelasyonu yer almaktadır. Bu grafiğe göre Referans numunesi (K0İ0B0P0) en yüksek değere sahiptir. Buna bağlı olarak basınç dayanımı ve yarmada-çekme dayanımı arasındaki bağlantı sayesinde basınç dayanımında yüksek değer alan numuneler yarmada-çekme dayanım testinde de yüksek sonuçlara ulaşmaktadır.

4.5 Kapilarite



Şekil 4.7 a) SSB'lere ait kapilarite değerleri, b) Kapilarite ve basınç dayanımı korelasyonu

Şekil 4.7.a'da görüldüğü üzere her grubu kendi arasında değerlendirmeye alındığında genel olarak AK miktarının maksimum seviyede kullanıldığı numunelerde kapilarite en yüksek değerlere ulaşmıştır.



Şekil 4.8 Kapilarite deneyi

KGDA kullanılmayan (K0) numuneleri kapilarite değerleri referans alındığında, K25 oranında kullanılan numunelerde %19,62'lik artış, K50 oranında kullanılan numunelerde ise %4,69'luk bir artış gözlemlenmiştir. K100 oranında kullanılan numunelerde ise %4,26'lık oranında düşüş meydana geldiği gözlemlenmiştir.

İGDA kullanılmayan (İ0) numuneleri kapilarite değerleri referans alındığında, İ25 oranında kullanılan numunelerde %25,44'lük artış, İ50 oranında kullanılan numunelerde %32,42'lik bir artış, İ100 oranında kullanılan numunelerde %33,42'lik oranında artış meydana geldiği gözlemlenmiştir.

Vieira vd. (2011) tarafından yapılan çalışmada, GDA'nın su emme kapasitesi zamanın fonksiyonu olarak belirlenmiş, GDA'nın su emiliminin büyük kısmının ilk daldırma sırasında su emme kapasitesinin %80'inin ilk 5 dakikalık süre içerisinde gerçekleştiği ve bu süreci takip eden 30 dakikalık süre içerisinde su emiliminin çok yavaş bir şekilde devam ettiği belirtilmiştir (Vieira vd., 2011).

Ferreira vd. (2011) tarafından yapılan çalışmada, GDA'nın yüksek su emme özelliğine sahip olması ve bu özelliğin zamanla değişiyor olması sebebiyle GDA'nın önceden ıslatılması gibi çeşitli karışım tasarımları önerilmiştir. Ayrıca, bu çalışmada beton karışım işlemi sırasında, karışıma önce su ve GDA katılmış ve 5 dakika kadar karıştırılmış, ardından diğer maddeler eklenmiştir. Karışıma GDA ile birlikte önceden eklenen bu su, GDA'nın karışım sırasında emeceği su olarak tanımlanmış ve emilecek efektif su olarak isimlendirildiği ifade edilmiştir (Ferreira vd., 2011).

AK kullanılmayan (B0) numuneleri kapilarite değerleri referans alındığında, B7,5 oranında kullanılan numunelerde %18,77'lik artış, B15 oranında kullanılan numunelerde %17,53'lük bir artış, B30 oranında kullanılan numunelerde %50,12'lik oranında artış meydana geldiği gözlemlenmiştir.

PP kullanılmayan (P0) numuneleri kapilarite değerleri referans alındığında, P0,5 oranında kullanılan numunelerde %9,11'lik düşüş. P1 oranında kullanılan numunelerde %3,90'lık artış, P2 oranında kullanılan numunelerde %32,54'lük oranında artış meydana geldiği gözlemlenmiştir.

Polipropilen lif kullanımı betonda içerisinde boşluklu hacim oluşturduğu, bununda hacimce su emme oranını arttırma eğiliminde olduğu görülmüştür.

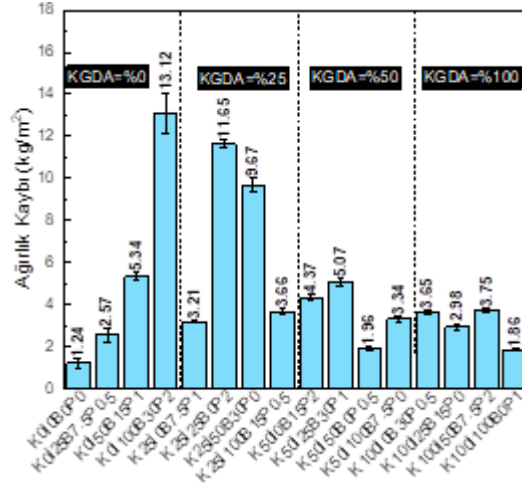
Betonun kılcal su emme miktarı artarsa kapilarite de artar. Bu da numunenin geçirgenliğini göstermektedir. Araştırmaların mikro yapıyı incelemesi sonucunda polipropilen lifin beton matrisi içinde mikro dolgu olarak çalıştığını göstermektedir. Kapilarite deneylerinde en yüksek sonucu K0İ100B30P2 numunesi elde etmiştir.

KGDA %0 grubundaki numuneler incelendiğinde kapilarite değerinin en iyi seri referans numunesi olurken; en yüksek seri İGDA, AK ve PP lif miktarının maksimum

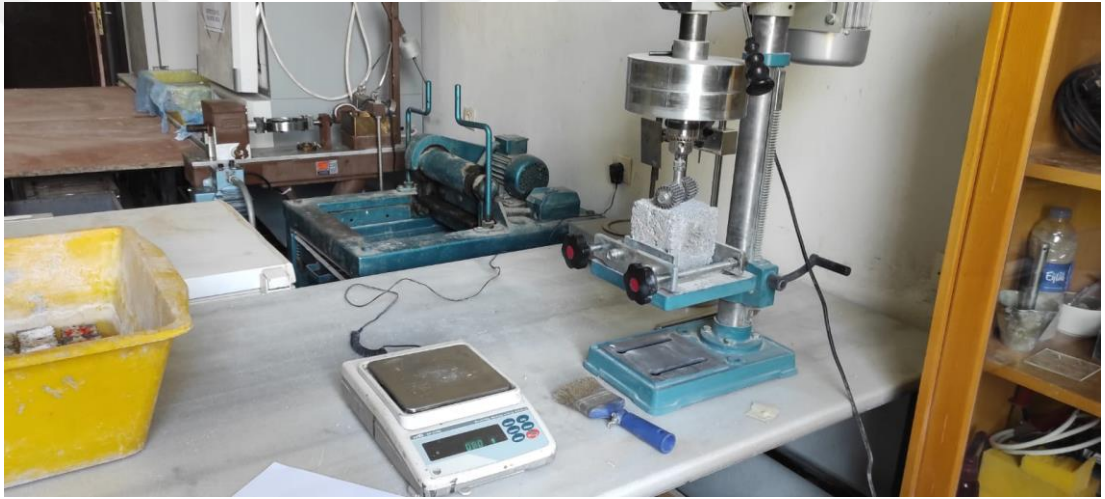
olduğu K0İ100B30P2 numunedir. Kapilaritenin 7,47 kg/m²'ye ulaştığı numunede basınç dayanımında da düşüş yaşandığı gözlemlenmektedir. Bu grup numuneler incelendiğinde AK miktarının artışı kapilarite değerin arttırmasını sağlamaktadır. KGDA %25 grubundaki numunelerde AK ve PP lif miktarının artması kapilarite değerlerini arttırmaktadır. Bunun nedeni bu tür malzemelerin betonda işlenebilirliğini azaltmasıyla ilişkili olduğudur. K25İ25B0P2 ve K25İ50B30P0 numunelerinin kapilarite değerleri 6,4 kg/m² üzerindedir. Basınç dayanımlarında da 12-13 MPa değerlerine ulaşmaktadır. İşlenebilirliğin azalması yeterince sıkıştırma işleminin gerçekleşmemesi dayanımı olumsuz olarak etkilemektedir. Ayrıca GDA oranı da işlenebilirliği etkilemektedir. KGDA %50 grubundaki numunelerde 3,69 kg/m²'ye sahip K50İ50B30P0.5 serisi en düşük kapilarite değerine sahiptir. Yaklaşık 40 MPa dayanıma ulaşmıştır. KGDA içeriğinin artması AK'nin getireceği olumsuz etkileri bir miktar azaltmaktadır. KGDA %100 grubunda genel olarak kapilarite ve basınç dayanımları iyi durumda olsa bile lif miktarının yüksek olması kapilarite değerini yükseltmektedir. K100İ50B7.5P2 serisinde bu durum açıkça gözlemlenmektedir.

4.6 Aşınma Direnci Deneyi

Şekil 4.9'da görüldüğü üzere tüm numuneler değerlendirmeye alındığında genel olarak PP miktarının maksimum seviyede kullanıldığı numunelerde aşınma en yüksek değerlere ulaşmıştır. En fazla aşınmaya uğrayan numune K0İ100B30P2 kodlu numune olup İGDA, AK ve PP'nin en yüksek oranlarda kullanıldığı görülmektedir. En az aşınmaya uğrayan numune ise Referans Numunesi K0İ0B0P0 kodlu numune olup herhangi bir değişken eklenmemiştir.



Şekil 4.9 SSB numunelerinin aşınma testi sonuçları



Şekil 4.10 Aşınma deneyi

Referans numunesini diğer karışımlarla karşılaştırıldığında en az ağırlık kaybı K100I100B0P1 numunesinde elde edilmiştir. Genel olarak incelendiğinde KGDA miktarının artması aşınma direnci deneylerinde ağırlık kaybını minimuma indirdiği gözlemlenmiştir. AK'nin dirence karşı dayanımı düşük olduğu grafikten anlaşılmaktadır. Bunun nedeni özgül ağırlığının düşük olması ve agrega gibi davranamamasından kaynaklanmaktadır. Bütün serilerde en fazla aşınma kaybı K0I100B30P2 numunesindedir.

KGDA kullanılmayan (K0) numuneleri aşınma kaybı değerleri referans alındığında, K25 oranında kullanılan numunelerde %26,57'lik artış, K50 oranında kullanılan numunelerde ise %33,75'lik bir düşüş gözlemlenmiştir. K100 oranında kullanılan numunelerde ise %45,06'lık oranında düşüş meydana geldiği gözlemlenmiştir.

İGDA kullanılmayan (İ0) numuneleri aşınma kaybı değerleri referans alındığında, İ25 oranında kullanılan numunelerde %78,53'lük artış, İ50 oranında kullanılan numunelerde %66,03'lük bir artış, İ100 oranında kullanılan numunelerde %76,28'lik oranında artış meydana geldiği gözlemlenmiştir.

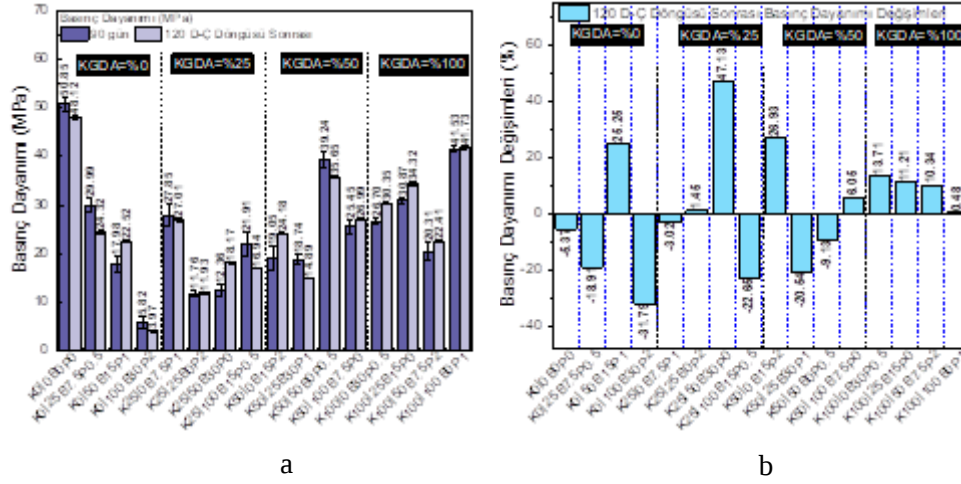
AK kullanılmayan (B0) numuneleri aşınma kaybı değerleri referans alındığında, B7,5 oranında kullanılan numunelerde %27,97'lik düşüş, B15 oranında kullanılan numunelerde %2,15'lik bir düşüş, B30 oranında kullanılan numunelerde %88,52'lik oranında artış meydana geldiği gözlemlenmiştir.

PP kullanılmayan (P0) numuneleri aşınma kaybı değerleri referans alındığında, P0,5 oranında kullanılan numunelerde %31,32'lik düşüş. P1 oranında kullanılan numunelerde %10,21'lik düşüş, P2 oranında kullanılan numunelerde %90,72'lik oranında artış meydana geldiği gözlemlenmiştir.

Tüm karışımlarda PP lif miktarının artmasıyla betonun aşınma direncinin azaldığı Şekil 4.4'den görülebilmektedir. Literatürde PP liflerin betonun işlenebilirliğini azalttığı ve betonda boşluklar oluşturduğu belirtilmiştir (Açıkgenç vd., 2012; Topçu vd., 2017). Bunun doğal bir sonucu olarak PP lif miktarının artması ile betonun aşınma direncinde düşüşler meydana gelir.

4.7 Donma-Çözülme Deneyleri

Donma çözülme döngüleri beton içinde ciddi hasarlara neden olmaktadır. Özellikle bu döngülerin sık görüldüğü konumlarda beton kalitesi ve servis ömrü azalmaktadır. Bu döngülere maruz kalan betonun içindeki boşluklarda bulunan suyun donup çözülmesiyle içsel gerilimi arttırarak çatlak boyutlarını genişletmektedir. Şekil 4.8'in a ve b kısımlarında 90 gününü tamamlamış ve 120 donma çözülme döngüsüne tabii tutulmuş numunelerin basınç dayanım eğrileri gösterilmektedir. Şekil 4.11'de ise döngü sonrası ağırlık kayıpları ve ağırlık kaybı-basınç dayanımı korelasyonu yer almaktadır.



Şekil 4.11 Donma çözülme sonrası a) Basınç dayanımları b) Basınç dayanım değişimleri

KGDA kullanılmayan (K0) numuneleri D-Ç sonrası basınç değişim değerleri referans alındığında, K25 oranında kullanılan numunelerde %13,44'lik artış, K50 oranında kullanılan numunelerde ise %8,54 'lük bir artış gözlemlenmiştir. K100 oranında kullanılan numunelerde ise %16,65'lik oranında artış meydana geldiği gözlemlenmiştir.

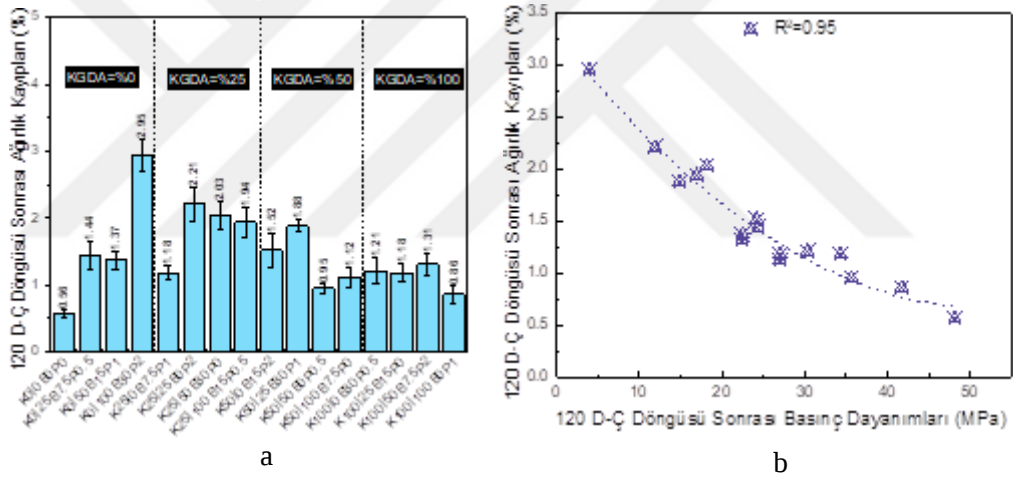
İGDA kullanılmayan (İ0) numuneleri D-Ç sonrası basınç değişim değerleri referans alındığında, İ25 oranında kullanılan numunelerde %14,76'lık düşüş, İ50 oranında kullanılan numunelerde %10,34'lük bir artış, İ100 oranında kullanılan numunelerde %20,04'lük oranında düşüş meydana geldiği gözlemlenmiştir.

AK kullanılmayan (B0) numuneleri D-Ç sonrası basınç değişim değerleri referans alındığında, B7,5 oranında kullanılan numunelerde %1,75'lik artış, B15 oranında kullanılan numunelerde %13,33'lük bir artış, B30 oranında kullanılan numunelerde %5,27'lik oranında artış meydana geldiği gözlemlenmiştir.

PP kullanılmayan (P0) numuneleri D-Ç sonrası basınç değerleri referans alındığında, P0,5 oranında kullanılan numunelerde %24,01'lik düşüş. P1 oranında kullanılan numunelerde %14,22'lik düşüş, P2 oranında kullanılan numunelerde %13,03'lik oranında düşüş meydana geldiği gözlemlenmiştir.

Referans numunesinde %0,56'lık ağırlık kaybı bu da %5,37 basınç dayanımının azalmasına neden olmuştur. Bütün gruplarda en fazla donma çözülme döngüsünden

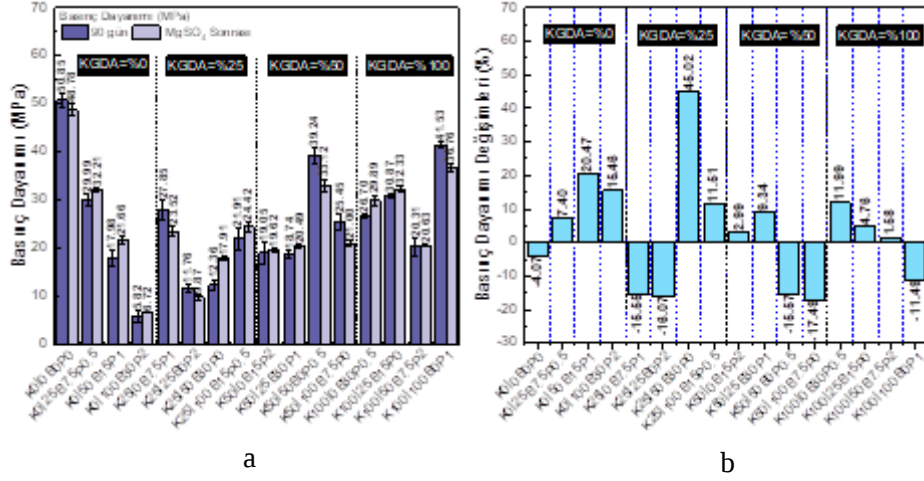
etkilenen numune K0İ100B30P2'dir. Bu numune %2,95 ağırlık kaybı yaşarken %31,79 değerinde basınç dayanımını düşürmüştür. K0İ100B30P2 numunesinin dayanımının düşük olması donma çözülme döngülerinde de en çok etkilenmesine neden olmuştur. Şekil 4.3'te görüldüğü üzere KGDA'nın bu seride olmaması ve İGDA, AK ve PP lifin çok yüksek oranda kullanılması dayanıma katkı sağlamamıştır. Referans numunesinden sonra beton serilerinden en düşük yüzde ağırlık kaybında azalma meydana gelen numuneler K50İ50B0P0.5 ve K100İ100B0P1 olmuştur. Sırasıyla 120 döngü sonrasında yaşanan ağırlık kaybı %0,95 ve %0,96'dır. K50İ50B0P0 numunesinde %9,13'lük dayanım kaybı yaşanmıştır. K100İ100B0P1 numunesinde ise %0,48'lik basınç dayanımında artış ile 41,73 MPa değerine ulaşmıştır. Buna göre K25İ50B30P0 numunesinde 120 döngü sonrası %2,03'lük bir ağırlık kaybı yaşansa da basınç dayanımında %47,13'lük bir artış meydana gelmiştir.



Şekil 4.12 Donma çözülme sonrası a) ağırlık kayıpları, b) ağırlık kaybı ve basınç dayanımı korelasyonu

4.8 Magnezyum Sülfat (MgSO₄) ve Sodyum Sülfat (Na₂SO₄) Dayanıklılık Testi

90 gün boyunca MgSO₄ çözeltisine maruz kalan betonların basınç dayanımı Şekil 4.13'de gösterilmektedir. Şekil 4.15'de ise MgSO₄ etkisinde zamana bağlı ağırlık kaybı ve porozite dağılım grafiği eklenmiştir.



Şekil 4.13 $MgSO_4$ 'e maruz kaldıktan sonra a) Basınç dayanımı ve b) Basınç dayanımı değişimleri



Şekil 4.14 $MgSO_4$, Na_2SO_4 ve $NaCl$ çözeltileri

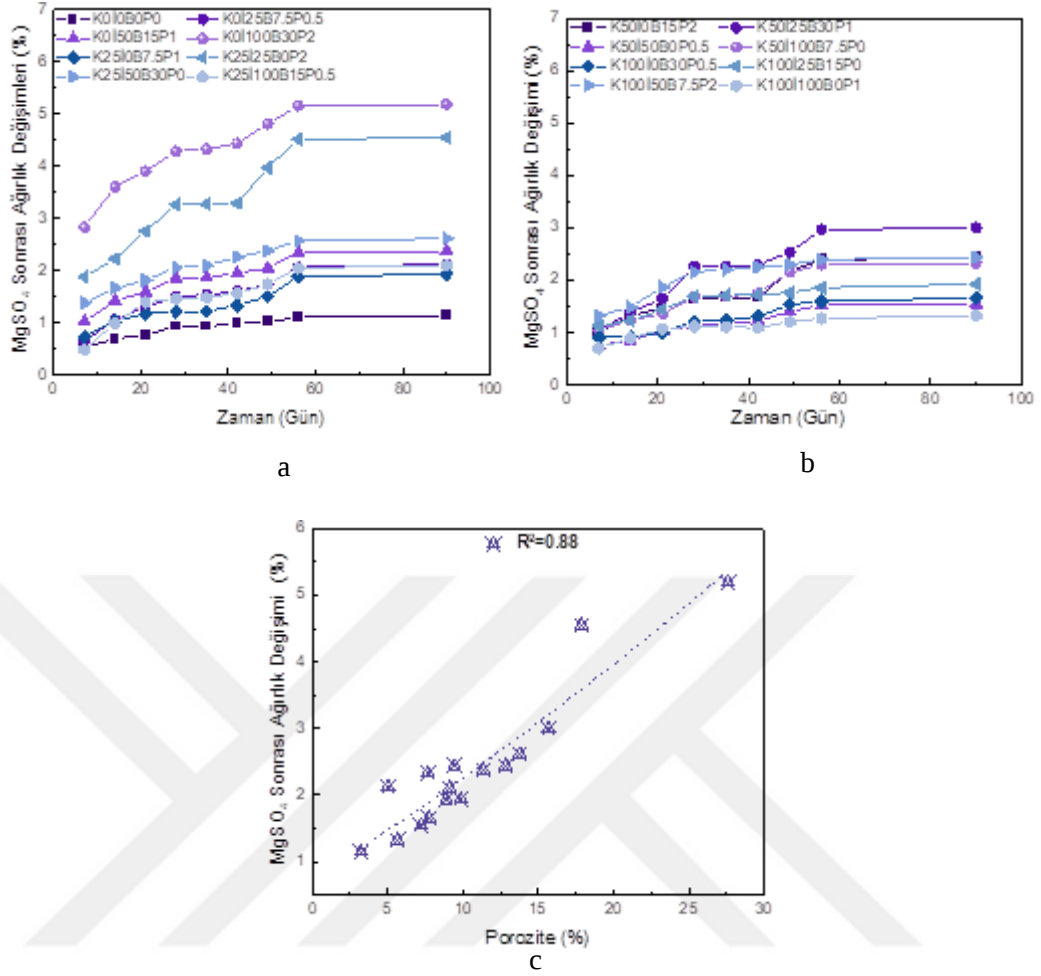
KGDA kullanılmayan (K0) numuneleri $MgSO_4$ sonrası basınç dayanımı değişim değerleri referans alındığında, K25 oranında kullanılan numunelerde %3,59'luk düşüş, K50 oranında kullanılan numunelerde ise %15'lik bir düşüş gözlemlenmiştir. K100 oranında kullanılan numunelerde ise %8,11'lik oranında düşüş meydana geldiği gözlemlenmiştir.

İGDA kullanılmayan (İ0) numuneleri $MgSO_4$ sonrası basınç değişim değerleri referans alındığında, İ25 oranında kullanılan numunelerde %2,52'lik artış, İ50 oranında kullanılan numunelerde %14,04'lük bir artış, İ100 oranında kullanılan numunelerde %0,66'lık oranında artış meydana geldiği gözlemlenmiştir.

AK kullanılmayan (B0) numuneleri $MgSO_4$ sonrası basınç değışim değeri referans alındığında, B7,5 oranında kullanılan numunelerde %5,78'lik artış, B15 oranında kullanılan numunelerde %21,73'lük bir artış, B30 oranında kullanılan numunelerde %32,25'lik oranında artış meydana geldiği gözlemlenmiştir.

PP kullanılmayan (P0) numuneleri $MgSO_4$ sonrası basınç değeri referans alındığında, P0,5 oranında kullanılan numunelerde %3,23'lük düşüş. P1 oranında kullanılan numunelerde %6,37'lik düşüş, P2 oranında kullanılan numunelerde %6,07'lik oranında düşüş meydana geldiği gözlemlenmiştir.

En fazla dayanım artışı %20,47 değeriyle K0İ50B15P1 karışım serisinde olduğu görülmüştür. En düşük dayanım kaybı (%4.07) K0İ0B0P0 karışımında meydana gelmiştir. Porozite oranı en düşük olan referans numunesi (%3) olurken, en yüksek olan numune (%28) K0İ100B30P2 serisidir. KGDA %25 olan grupta dayanım kaybı K25İ0B7.5P1 serisinde %15,5; K25İ25B0P2 serisinde %16,07; K25İ50B30P0 serisinde %45,02 ve K25İ100B15P0.5 serisinde %11,51 dayanım artışı oluşmuştur. K25İ25B30P2 numunesinde %4,5 ağırlık kaybı yaşanırken %18-19 değeri porozite elde edilmiştir. KGDA %50 grubundaki K50İ0B15P2 serisinde %2,99; K25İ25B30P1 serisinde %9,34 oranında basınç dayanım artışı gözlemlenmiş olup, K50İ50B0P0.5 serisinde %15,57; K50İ100B7.5P0 %17,49 oranında dayanım azalması gözlemlenmiştir. KGDA %100 grubunda K100İ0B30P0.5 serisinde %11,99; K100İ25B15P0 serisinde 4,76; K100İ50B7.5P2 serisinde %1,58 basınç dayanım oranı artarken, K100İ100B0P1 serisinde %11,49 oranında basınç dayanım azalışı gözlemlenmiştir.



Şekil 4.15 a) ve b) $MgSO_4$ sonrası ağırlık değişimi, c) $MgSO_4$ sonrası ağırlık değişimi ve porozite korelasyonu

Üretilen numuneler 90 gün boyunca Na_2SO_4 çözeltisi içinde bekletilmiştir. Betonların çözelti sonrası basınç dayanımı Şekil 4.16 'da yer almaktadır. Şekil 4.17'de ise Na_2SO_4 etkisinde zamana bağlı ağırlık kaybı grafiği gösterilmektedir. KGDA %0 olan grupta referans numunesi olan K0İ0B0P0 numunesi ve K0İ100B30P2 numunelerinde bir miktar betonun basınç dayanımının arttığı görülmektedir. Bu grubun en fazla dayanım artışı %8,76 değeriyle K0İ100B30P2 karışım serisinde olduğu görülmüştür. En düşük dayanım kaybı %8,44 değeriyle K0İ25B7.5P0.5 karışımında meydana gelmiştir. Referans numunesi ağırlık kaybı olarak en düşük (yaklaşık %0,5) değere sahip olurken, K0İ100B30P2 numunesi KGA %0 ve %25 gruplarının en yüksek ağırlık değişimine (yaklaşık %1,90) sahip numune olmuştur. KGDA %25 grubunda basınç dayanım kaybı hiçbir numunede gözlemlenmemiştir. Bütün karışımdaki serilere kıyasla %39,35 basınç dayanımı artışıyla K25İ50B0P2 numunesi olmuştur. K25İ25B0P2 serisi grubunun en yüksek ağırlık kaybına (yaklaşık %1,5) uğramıştır.

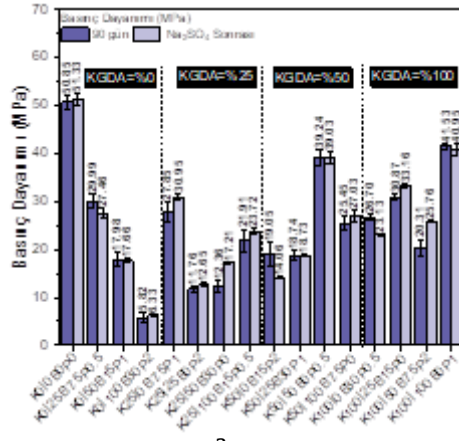
KGDA %50 grubundaki K50İ0B15P2 serisi bütün numunelere kıyasla en çok dayanım kaybeden (%26,19) serisi olmuştur. Bu numunenin ağırlık kaybı %0,9 civarında olmuştur. KGDA %100 grubunda K100İ0B30P0.5 serisinde %13.34, K100İ100B0P1 serisinde %1,40 dayanım kaybı yaşanmıştır. K100İ25B15P0 ve K100İ50B7.5P2 serisinde basınç dayanımında artış meydana gelmiştir.

KGDA kullanılmayan (K0) numuneleri Na₂SO₄ sonrası basınç dayanımı değişim değerleri referans alındığında, K25 oranında kullanılan numunelerde %16,72'lik artış, K50 oranında kullanılan numunelerde ise %5,01'lik bir düşüş gözlemlenmiştir. K100 oranında kullanılan numunelerde ise %5,02'lik oranında artış meydana geldiği gözlemlenmiştir.

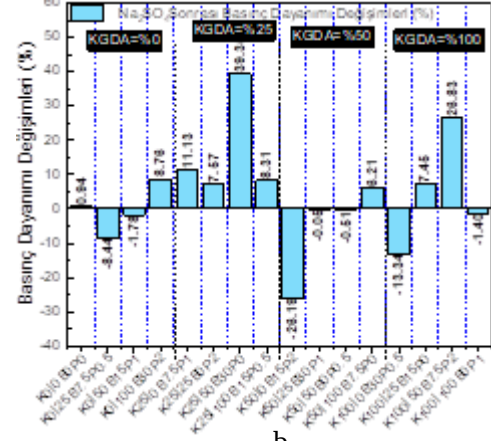
İGDA kullanılmayan (İ0) numuneleri Na₂SO₄ sonrası basınç dayanımı değişimi değerleri referans alındığında, İ25 oranında kullanılan numunelerde %8,50'lik artış, İ50 oranında kullanılan numunelerde %22,84'lük bir artış, İ100 oranında kullanılan numunelerde %12,34'lük oranında artış meydana geldiği gözlemlenmiştir.

AK kullanılmayan (B0) numuneleri Na₂SO₄ sonrası basınç dayanımı değişimi değerleri referans alındığında, B7,5 oranında kullanılan numunelerde %7,28'lik artış, B15 oranında kullanılan numunelerde %4,70'lik bir düşüş, B30 oranında kullanılan numunelerde %7,03 'lük oranında artış meydana geldiği gözlemlenmiştir.

PP kullanılmayan (P0) numuneleri Na₂SO₄ sonrası basınç dayanımı değişimi değerleri referans alındığında, P0,5 oranında kullanılan numunelerde %16,99'lük düşüş. P1 oranında kullanılan numunelerde %11,51'lik düşüş, P2 oranında kullanılan numunelerde %9,25'lik oranında düşüş meydana geldiği gözlemlenmiştir.

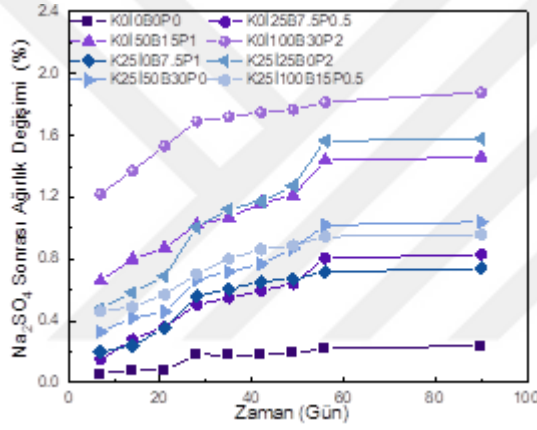


a

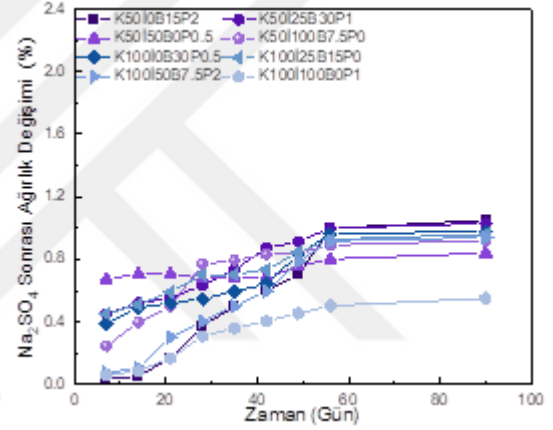


b

Şekil 4.16 Na₂SO₄'e maruz kaldıktan sonra a) Basınç dayanımları, b) Basınç dayanım değişimleri



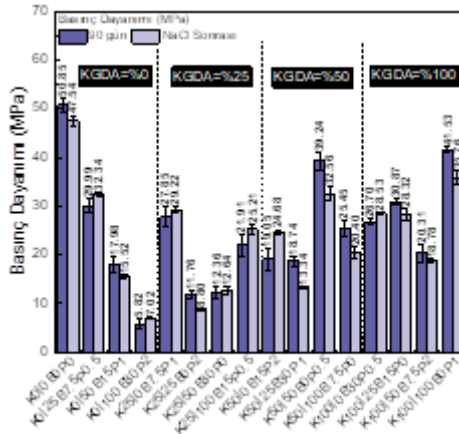
a



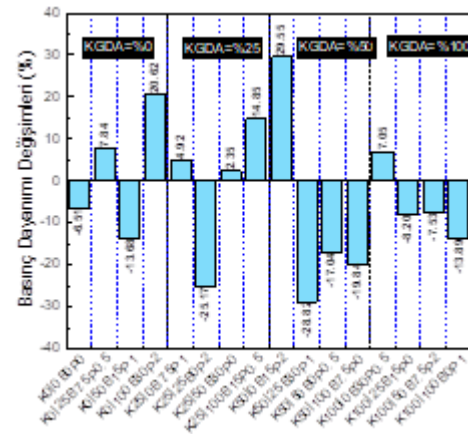
b

Şekil 4.17 Na₂SO₄ sonrası ağırlık değişimleri

4.9 Sodyum Klorür (NaCl) Dayanıklılık Testi



a

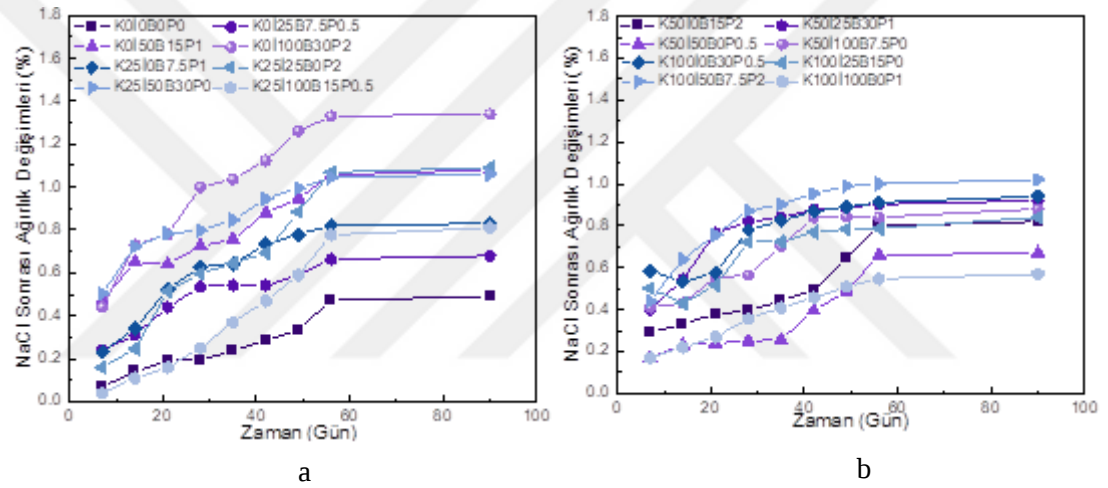


b

Şekil 4.18 NaCl maruziyeti sonrası a) Basınç dayanımları, b) Basınç dayanım değişimleri

90 gün NaCl çözeltisinin içinde bekletilen numunelerin basınç dayanımındaki değişimler ve zamana bağlı ağırlık kayıpları Şekil 4.18 ve Şekil 4.19’da gösterilmektedir.

K0İ0B0P0 kodlu referans numunesinde %6,51’lik dayanım kaybı yaşanırken yaklaşık %0,5 ağırlık kaybı yaşanmıştır. NaCl çözeltisi sonucunda referans numune 47,54 MPa değerine düşmüştür. Bütün numuneler 56 güne kadar belli ağırlık kayıpları yaşasalar da 56 günden sonra ağırlık kayıplarında çok ciddi değişim gözlemlenmemiştir. Bütün numuneler içinde en yüksek dayanım kaybı K50İ25B30P1 numunesinde %28,82 değerinde ölçülmüştür.



Şekil 4.19 NaCl sonrası a) KGDA %0 ve %25 b) %50 ve %100 olan SSB’lerin ağırlık değişimleri

NaCl çözeltisi sonrası yaklaşık %1,3 değerinde ağırlık kaybı yaşayan K0İ100B30P2 numunesidir. Bu numunenin başlangıçtaki dayanımı da düşük olduğu için NaCl çözeltisi karşısında da iyi bir direnç gösterememiştir. Buna göre AK ve PP lifin maksimum oranda kullanımı durabilite değerlerini de olumlu yönde etkilediği sonucuna varılamamaktadır. 90 gün sonunda K100İ100B0P1 serisinde, referans numunesi olan K0İ0B0P0’a göre en az ağırlık kaybına uğradığı (yaklaşık %0,55) yani AK’nin NaCl çözeltisi karşısında direncine yeterince etkisi olmadığı ile açıklanabilmektedir.

KGDA kullanılmayan (K0) numuneleri NaCl sonrası basınç dayanımı değişim değerleri referans alındığında, K25 oranında kullanılan numunelerde %2,83’lük düşüş,

K50 oranında kullanılan numunelerde ise %11,11'lik bir düşüş gözlemlenmiştir. K100 oranında kullanılan numunelerde ise %3,61'lik oranında düşüş meydana geldiği gözlemlenmiştir.

KGDA etkisine göre incelendiğinde K50 oranındaki numunelerde;

İGDA kullanılmayan (İ0) numuneleri NaCl sonrası basınç dayanımı değişimi değerleri referans alındığında, İ25 oranında kullanılan numunelerde %18,24'lük düşüş, İ50 oranında kullanılan numunelerde %17,73'lük bir düşüş, İ100 oranında kullanılan numunelerde %8,31'lik oranında düşüş meydana geldiği gözlemlenmiştir.

AK kullanılmayan (B0) numuneleri NaCl sonrası basınç dayanımı değişimi değerleri referans alındığında, B7,5 oranında kullanılan numunelerde %12'lik artış, B15 oranında kullanılan numunelerde %25,38'lik bir artış, B30 oranında kullanılan numunelerde %15,95'lik oranında artış meydana geldiği gözlemlenmiştir.

PP kullanılmayan (P0) numuneleri NaCl sonrası basınç dayanımı değişimi değerleri referans alındığında, P0,5 oranında kullanılan numunelerde %7,13'lük artış. P1 oranında kullanılan numunelerde %8,92'lik düşüş, P2 oranında kullanılan numunelerde %8,32'lik oranında artış meydana geldiği gözlemlenmiştir.

5. SONUÇ

Çeşitli katı atıkların geri dönüşümü için geri dönüştürülmüş agregalar ve AK, fiber takviyeli yeşil SSB'ye uygulanarak fiziko-mekanik özellikleri, dayanıklılıkları ve mikro yapıları araştırıldı. Elde edilen bulgular sonucunda bu sonuçlara ulaşıldı.

- a. İGDA, AK ve PP lif içeriğinin artmasıyla SSB'nin mekanik özellikleri azalmaktadır. KGDA, İGDA ve PP lif içerikleri sırasıyla %100, %100 ve %1 olduğunda, SSB'nin 90 günlük basınç dayanımı referans numunesi olan orijinal SSB'ye kıyasla yalnızca %18,33 oranında azalmaktadır.
- b. SSB numunesinin kuru birim ağırlığı 2300 kg/m^3 'ün altında olup, referans numunesi olan SSB, en yüksek kuru birim ağırlığı göstermektedir. AK ile karıştırılan SSB nispeten yüksek bir emicilik katsayısı gösterir çünkü AK parçacıkları yüksek gözenekliliğe, açısallığa, düzensiz boyuta ve yüksek kızdırma kaybına sahiptir.
- c. KGDA, İGDA, AK ve PP lifinin eklenmesi, geri dönüştürülmüş agregaların düşük aşınma direnciyle ilişkili olan SSB'nin aşınma direncini azaltır. 120 donma-çözülme döngüsünden sonra bazı SSB'lerin basınç dayanımı artar ve K25İ50B30P0 örneği en yüksek dayanım kazanımını gösterir.
- d. Kimyasal saldırıya karşı dayanıklılık açısından %15 ve %30 AK içeren SSB numunelerinin basınç dayanımı, KGDA, İGDA ve PP lif içeriğine bakılmaksızın MgSO_4 etkisi altında artmaktadır. Bu arada İGDA içeriğinin artmasıyla numunenin Na_2SO_4 erozyonuna karşı direnç yeteneği de artar.
- e. Taguchi yöntemi değerlendirmesinin sonucu, AK'nin PP lifine oranının basınç dayanımı üzerinde daha yüksek derecede etki gösterdiğini göstermektedir. Bu arada, uygun miktarlarda KGDA, İGDA, AK ve PP lifinin birlikte uygulanması, SSB'lerin karbon emisyonlarını etkili bir şekilde azaltabilir.

KAYNAKLAR

- Abdel-Hay, A. (2017). Abdel-Hay, A.S. Properties of recycled concrete aggregate under different curing conditions. *HBRC J.*, 13, 271–276.
- Abdel-Shafy, H., & Mansour, M. (2018). Solid waste issue: Sources, composition, disposal, recycling, and valorization. *Egypt. J. Pet.* 27, 1275–1290.
- Abdulmatin, A., Tangchirapat, W., Jaturapitakkul, C. E., Tangchirapat, W., & Jaturapitakkul, C. (2019). Environmentally friendly interlocking concrete paving block containing new cementing material and recycled concrete aggregate. *Eur. J. Environ. Civ. Eng.*, 23, 1467–1484.
- Abu-Khashaba, M., Adam, I., & El-Ashaal, A. (2014). Investigating the possibility of constructing low cost roller compacted concrete dam. *Alex. Eng. J.* 53(1), 131–142.
- Abut, Y. (2017). *Silindirle Sıkıştırılmış Beton Yol: Kocaeli İlinde Bir Durum Çalışması* . Kocaeli: Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı Doktora Tezi.
- ACI. (2010). *Cement and Concrete Terminology*. Farmington: American Concrete Institute 116R-99, Manual of Concrete Practice, Part 1.
- ACI. (2011). *ACI Committee 207-Report on Roller-Compacted Mass Concrete*. American Concrete Institute, Report 207.5R.
- ACPA. (2014). American Concrete Pavement Association.
- Acun, S. (2000). *Yüksek Dayanımlı Beton Üretiminde Dizayn Parametresi Olarak Lifsel Katkıların İrenenmesi*. İstanbul: İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi.
- Açıkgenç, M., Arazsu, U., & Alyamaç, K. (2012). Açıkgenç, M., Arazsu, U., Alyamaç, K.E., 2012, Farklı karışım oranlarına sahip polipropilen lifli betonların dayanım ve durabilite özellikleri. *SDU International Technologic Science*, 4, 41-54.
- Açıkgenç, M., Arazsu, U., & Alyamaç, K. (2012). Farklı Karışım Oranlarına Sahip Polipropilen lifli Betonların Dayanım ve Durabilite Özellikleri. *SDU International Tecnologic Science vol 4 no.3*, 41-54.
- Adamu, M., Mohammed, B., & Shahir , M. (2018). Mechanical properties and performance of high volume fly ash roller compacted concrete containing crumb rubber and nano silica. *Construction and Building Materials*, 171, 521–538.
- Aghabaglou, A., & Ramyar, K. (2013). Mechanical properties of high-volume fly ash roller compacted concrete designed by maximum density method. *Construction and Building Materials* 38, 356-364.

- Aghabaglou, A., Özen, S., & Altun, M. G. (2018). Durability Performance and Dimensional Stability of Polypropylene Fiber Reinforced Concrete. *Journal Of GreenBuilding*. <http://www.journalofgreenbuilding.com/doi/pdf/10.3992/1943-4618.13.2.20> adresinden alındı
- Ajdukiewicz, A., & Kliszczewicz, A. (2002). Influence of recycled aggregates on mechanical properties of HS/HPC. *Cem. Concr. Compos.* 174, 591–604.
- Ajdukiewicz, A., & Kliszczewicz, A. (2007). Comparative Tests of Beams and Columns Made of Recycled Aggregate Concrete and Natural Aggregate Concrete. . *J. Adv. Concr. Technol.*, 5, 259–273.
- Akhtar, A., & Sarmah, A. (2018). Construction and demolition waste generation and properties of recycled aggregate concrete: A global perspective. *J. Clean. Prod.* 186, 262–281.
- Al Baghdady, S., & Khan, L. (2018). *Designing Roller compacted concrete (RCC) dams*. Sweden: Degree Project In Civil Engineering And Urban Management Stockholm.
- Al-Bayati, H., & Tighe, S. (2019). Effect of Recycled Concrete Aggregate on Rutting and Stiffness Characteristics of Asphalt Mixtures. *J. Mater. Civ. Eng.* 31, 04019219.
- Al-Bayati, H., Tighe, S., & Achebe, J. (2018). influence of recycled concrete aggregate on volumetric properties of hot mix asphalt. *Resour. Conserv. Recycl.*, 130, 200–214.
- Algin , Z., & Gerginci , S. (2020). Freeze-thaw resistance and water permeability properties of roller compacted concrete produced with macro synthetic fibre. *Constr. Build. Mater.* 234, 117382.
- Ali, B., Qureshi, L., Nawaz, M., & Aslam, H. (2019). Combined influence of fly ash and recycled coarse aggregates on strength and economic performance of concrete. *Civil Eng. J.* 5(4), 834-844.
- Aliabdo, A., Elmoaty, A., & Fawzy, A. (2018). Experimental investigation on permeability indices and strength of modified pervious concrete with recycled concrete aggregate. *Constr. Build. Mater.*, 193, 105–127.
- Aljerf, L. (2018). Advanced highly polluted rainwater treatment process. *J. Urban Environ. Eng.* 12(1), 50–58 .
- Almanaratain. (2021, 4 21). *Strength of Concrete”?* Almanaratain: <https://almanaratain.com/what-is-meant-by-the-flexural-strength-of-concrete/> adresinden alındı
- Almeida, A., & Cunha, J. (2017). The implementation of an Activity-Based Costing (ABC) system in a manufacturing company. *Procedia Manuf.* 13, 932–939.

- Andal, J., Shehata, M., & Zacarias, P. (2016). Properties of concrete containing recycled concrete aggregate of preserved quality. *Constr. Build. Mater.*, 125, 842–855.
- Arioğlu, E., Köylüoğlu, Ö., & Arioğlu, N. (1996). Dünyadaki geri kazanılmış agrega üretim ve politikalarının gözden geçirilmesi ve ülkemiz açısından irdelenmesi. *1. Kırmataş Sempozyumu*, (s. 33-52). İstanbul.
- Arredondo-Rea, S., Corral-Higuera, R., Gómez-Soberón, J., Gámez-García, D., Bernal-Camacho, J., & Rosas-Casarez, C. (2019). Ungsson-Nieblas, M.J. Durability parameters of reinforced recycled aggregate concrete: Case study. *Appl. Sci.*, 9, 617.
- Ashrafiyan, A., Gandomi, A., Rezaie-Balf, M., & Emadi, M. (2020). An evolutionary approach to formulate the compressive strength of roller compacted concrete pavement. *Measurement* 152, 107309.
- Aslani, F., Ma, G., Wan, D., & Muselin, G. (2018). Development of high-performance self-compacting concrete using waste recycled concrete aggregates and rubber granules. *J. Clean. Prod.*, 182, 553–566.
- Atış, C., Karahan, O., Bilim, C., Özcan, F., & Sevim, U. (2016). Sodyum Sülfat İle Aktifleştirilen Uçucu Kül Katkılı Harçların Özellikleri. *Niğde Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 5(2), 117-123.
- Aulia, T. (2002). Effects of Polypropylene Fibers on the Properties of High Strength Concretes. *Lacer No.7*, 43-59.
- Auta, S., Shiwua, A., & Tsado, T. (2015). Compressive strength of concrete with millet husk ash (MHA) as a partial replacement for cement. *Magazine of Civil Engineering*, 59(7), 74–79.
- Awal, A., & Mohammadhosseini, H. (2016). Green concrete production incorporating waste carpet fiber and palm oil fuel ash. *J. Clean. Prod.* 137, 157-166.
- Azarsu, U. (2012). *Polipropilen Lifli Betonların Taze ve Sertleşmiş Beton Özellikleri*. Elazığ: Yüksek Lisans Tezi,, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Bahadır, F. (2010). *Polipropilen Lifli Betonların Mekanik Özellikleri*. Eskişehir: Yüksek Lisans Tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat .
- Balkan, O. (2006). *Polipropilen Kompozitlerin Termoplastik Elastomerler ile Modifikasyonlarının Mekanik Özelliklerine Etkisi*. İstanbul: Doktora, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Banthia, N., & Sappakittipakorn, M. (2007). Toughness enhancement in steel fiber reinforced concrete through fiber hybridization. *Cement and Concrete Research* 37(9), 1366–1372.

- Bartolacci, F., Paolini, A., Quaranta, A., & Soverchia, M. (2018). Assessing factors that influence waste management financial sustainability. *Waste Manag.*, 79, 571–579.
- Batman, M. (2018). *Beton Deney Numune Atıklarının Geri Dönüşüm Agregası Olarak Kullanılabilirliğinin İncelenmesi*. Erzurum: Atatürk Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı YL Tezi.
- Bayrak, O. (2018). *Polipropilen lif ve kevlar katkılı yol betonlarının Taguchi yöntemi optimizasyonu (Doctoral dissertation)*. Erzurum: Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Benouadah, A., Beddar, M., & Meddah, A. (2017). Physical and mechanical behaviour of a roller compacted concrete reinforced with polypropylene fiber. *Journal of Fundamental and Applied Sciences* 9(2), -623-635.
- Binici, H., Yücegök, F., Aksoğan, O., & Kaplan, H. (2008). Effect of corncob, wheat straw, and plane leaf ashes as mineral admixtures on concrete durability. *Journal of Materials in Civil Engineering* 20 (7), 478-483.
- Biricik, H., Berktaş, İ., Aköz, F., & Tulgar, A. (1996). Buğday Sapı Külünün Puzolanik Özelliklerinin Araştırılması. 4. Ulusal Beton Kongresi, 369-380. 4. *Ulusal Beton Kongresi*, (s. 369-380).
- Bui, N., Satomi, T., & Takahashi, H. (2017). Improvement of mechanical properties of recycled aggregate concrete basing on a new combination method between recycled aggregate and natural aggregate. *Constr. Build. Mater.*, 148, 376–385.
- Cai, W., Dou, L., & Zhang, M. (2018). A fuzzy comprehensive evaluation methodology for rock burst forecasting using microseismic. *Tunnelling and Underground Space Technology* 80(11), 232–245.
- Caijun, S., Zhijie, C., & Zhaobin, X. (2016). Research progress in the mechanical properties of recycled aggregate concrete. *Mater.Rev.* 30(23), 96–103.
- Carpenter, S., & Wolosick, J. (1980). Modifier Influence in the Characterization of Hot-Mix Recycled Material. *Transp. Res. Rec. J. Transp Res. Board.*, 777, 15–22.
- Ceia, F., Raposo, J., Guerra, M., Júlio, E., & de Brito, J. (2016). Shear strength of recycled aggregate concrete to natural aggregate concrete interfaces. *interfaces. Constr. Build. Mater.* 109, 139–145.
- Chatterjee, A., & Sui, T. (2019). Alternative fuels—Effects on clinker process and properties. *Cem. Concr. Res.*, 123, 105777.
- Cheah, C. B., & Ramli, M. (2011). The implementation of wood waste ash as a partial cement replacement material in the production of structural grade concrete. *Resources, Conservation and Recycling*, 55(7), 669-685.

- Chhorn, C., Hong, S., & Lee, S. (2017). A study on performance of roller-compacted concrete for pavement. *Constr. Build. Mater.*, 153, 535-543.
- Chowdhury, S., Maniar, A., & Suganya, O. (2015). Strength development in concrete with wood ash blended cement and use of soft computing models to predict strength parameters. *J. Adv. Res.* 6 (6), 907–913.
- Coğrafya Harita. (2023). *Türkiye Sanayi Haritaları*. Coğrafya Harita: http://cografyaharita.com/turkiye_sanayi_haritalari.html adresinden alındı
- Corinaldesi, V., Donnini, J., & Nardinocchi, A. (2015). *Journal of Building Engineering* 4(2), 14–20.
- Çelik, B. (2007). *Recycled Aggregate Concrete at Elevated Temperatures*. İstanbul: Doktora Tezi, Boğaziçi Üniversitesi.
- Çetin, O. (2009). *Beton Yollarda Yeni Teknolojiler Silindirle Sıkıştırılan Beton*. İstanbul: İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Y1 Tezi.
- Dada, A. (2022). *Geri Dönüşüm Agregası Kullanılarak Üretilen Kendiliğinden Yerleşen Harçların Mühendislik Özelliklerinin Araştırılması*. Ankara: Gazi Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı Y.L Tezi.
- de Brito, J., Agrela, F., & Silva, R. (2018). *Construction and demolition waste*. Cambridge, UK, 2018: Woodhead Publishing: In New Trends in Eco-Efficient and Recycled Concrete.
- Deakins, D., & Bensemann, J. (2019). Achieving Innovation in a Lean Environment: How Innovative Small Firms Overcome Resource Constraints. *Constraints. Int. J. Innov. Manag.*, 23, 1950037.
- Delatte, N., Amer, N., & Storey, C. (2003). *Improved Management of RCC Pavement Technology*. UTCA-01231: The University of Alabama, Department of Civil and Environmental Engineering.
- Demir, İ., & Elmalı, M. (2020). Organik atıkların yapı malzemesi olarak kullanılmasının araştırılması. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi* 8(4), 1303 – 1311. doi:10.21923/jesd.781554
- Demirel, C. (2012). *Yaşı ve Sınıfı Belli Geri dönüşüm Agregalarının Betonda Kullanılabilirliğinin Araştırılması*. Ankara: Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi.
- Demis, S., Tapali, J., & Papadakis, V. (2014). An investigation of the effectiveness of the utilization of biomass ashes as pozzolanic materials. *Constr. Build. Mater.* 68, 291-300.
- Dhir, R., de Brito, J., Silva, R., & Lye, C. (2019). Recycled Aggregate Concrete: Durability Properties. *Sustain. Constr. Mater.*, 365–418.

- di Maria, A., Eyckmans, J., & van Acker, K. (2018). Downcycling versus recycling of construction and demolition waste: Combining LCA and LCC to support sustainable policy making. *Waste Manag.*, 75, 3–21.
- Dimitriou, G., Savva, P., & Petrou, M. (2018). Enhancing mechanical and durability properties of recycled aggregate concrete. *Constr. Build. Mater.* 158, 228–235.
- Ding, Z., Yi, G., Tam, V., & Huang, T. (2016). A system dynamics-based environmental performance simulation of construction waste reduction management in China. *Waste Manag.* 51, 130–141.
- Domingo-Cabo, A., Lázaro, C., López-Gayarre, F., Serrano-López, M., Serna, P., & Castaño-Tabares, J. (2009). Creep and shrinkage of recycled aggregate concrete. *Constr. Build. Mater.*, 23, 2545–2553.
- DSİ. (2014). *Silindirle Sıkıştırılmış Beton (SSB) İnşaat Teknik Şartnamesi_R00_20061110*. Ankara: Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü.
- Duan, J., Asteris, P., Nguyen, H., Bui, X., & Moayedi, H. (2020). A novel artificial intelligence technique to predict compressive strength of recycled aggregate concrete using ICA-XGBoost model. *Eng. Comput.*, 1–18.
- Duan, Z., Kou, S., & Poon, C. (2013). Prediction of compressive strength of recycled aggregate concrete using artificial neural networks. *Constr. Build. Mater.*, 40, 1200–1206.
- Dunee. (2011, 12 11). *Polietilen ve Polipropilen Arasındaki Fark*. lafayettefirefighters: <https://lafayettefirefighters.com/tr/difference-between-polyethylene-and-vs-polypropylene> adresinden alındı
- Durdyev, S., Omarov, M., & Ismail, S. (2017). Causes of delay in residential construction projects in Cambodia. *Cogent Eng.* 4, 1291117.
- Eddine, B., & Salah, M. (2012). Solid waste as renewable source of energy: Current and future possibility in Algeria. *Int. J. Energy Environ. Eng.*, 3, 1–12.
- Elhakam, A., Mohamed, A., & Awad, E. (2012). Influence of self-healing, mixing method and adding silica fume on mechanical properties of recycled aggregates concrete. *Constr. Build. Mater.*, 35, 421–427.
- Engin, Y. (2023, Ocak 16). *Sürdürülebilir Hazır Beton Üretimi*. Şantiye: <https://www.santiye.com.tr/surdurulebilir-hazir-beton-uretimi-3893.html> adresinden alındı
- Erbaş, M. (2003). *Polipropilen Lifler ve Betonun Durabilitesine Etkisi*. İstanbul, Türkiye: 5. Ulusal Beton Kongresi, Betonun Dayanıklılığı.
- Erol, İ., & Özmen, A. (2018). Çevresel düzeyde sürdürülebilirlik performansının ölçülmesi: Perekende sektöründe bir uygulama. *İktisat İşletme ve Finans*, 23(266), 70-94.

- Eshtewi, S. (2021). *Geridönüşüm Agregası Kullanılarak Polipropilen Lif Takviyeli Beton Yolların Özellikleri*. Kastamonu: Kastamonu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Etxeberria, M., Marí, A., & Vázquez, E. (2007). Recycled aggregate concrete as structural material. *Mater. Struct. Constr.*, 40, 529–541.
- Etxeberria, M., Vázquez, E., Marí, A., & Barra, M. (2007). Influence of amount of recycled coarse aggregates and production process on properties of recycled aggregate concrete. *Cem. Concr. Res.*, 11, 10094–10101.
- Evangelista, L., & de Brito, J. (2007). Mechanical behaviour of concrete made with fine recycled concrete aggregates. *Cem. Concr. Compos.* 29, 397–401.
- Fediuk, R., Lesovik, V., Svintsov, A., Mochalov, A., Kulichkov, S., Stoyushko, N., . . . Timokhin, R. (2018). Self-compacting concrete using pretreated rice husk ash. *Mag. Civ. Eng.* 2018, 66–76.
- Fediuk, R., Pak, A., & Kuzmin, D. (2017). Fine-Grained Concrete of Composite Binder. *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, 262, 012025.
- Ghahari, S., Mohammadi, A., & Ramezani-pour, A. (2017). Performance assessment of natural pozzolan roller compacted concrete pavements. *Case Studies in Construction Materials*, 2017 (7), 82-90.
- Gladden, M. (2021). Benefits, Limitations and Uses of Roller Compacted Concrete. <http://EzineArticles.com/6118913> adresinden alındı
- Gómez-Soberón, J. (2002). Porosity of recycled concrete with substitution of recycled concrete aggregate: An experimental study. *Cem. Concr. Res.* 32, 1301–1311.
- Gök, S., Kılıç, İ., & Şengül, O. (2021). Properties of Alkali-Activated Roller Compacted Concretes Produced from Waste Aggregates. *Cement Wapno Beton* 26(4), 352-363. doi:10.32047/CWB.2021.26.4.7
- Guo, H., Shi, C., Guan, X., Zhu, J., Ding, Y., Ling, T., . . . Wang, Y. (2018). Durability of recycled aggregate concrete—A review. *Cem. Concr. Compos.* 89, 251–259.
- Gürel, B. (2020). Türkiye’deki güncel biyokütle potansiyelinin belirlenmesi ve yakılmasıyla enerji üretimi iyi bir alternatif olan biyokütle atıklar için sektörel açıdan ve toplam yanma enerji değerlerinin hesaplanması. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi* 8(2), 407 – 416.
- Hamad, B., & Dawi, A. (2017). Sustainable normal and high strength recycled aggregate concretes using crushed tested cylinders as coarse aggregates. *Case Stud. Constr. Mater.*, 7, 228–239.
- Hamad, B., & Dawi, A. (2017). Sustainable normal and high strength recycled aggregate concretes using crushed tested cylinders as coarse aggregates. *Case Stud. Constr. Mater.* 7, 228–239.

- Harrington , D., Abdo, F., Adaska, W., & Hazaree, C. (2010). Guide for Roller Compacted Concrete Pavements. *National Concrete Pavement Technology Center, Institute for Transportation, Iowa State University, 1700.7(8-72),*, 3-81.
- Hiete, M., Stengel, J., Ludwig, J., & Schultmann, F. (2011). Matching construction and demolition waste supply to recycling demand: A regional management chain model. *Build. Res. Inf.*, 39, 333–351.
- Jacintho, Avila, A. E., Cavaliere, I. S., Pimentel, L. L., & Forti, N. C. (2020). Modulus and Strength of Concretes with Alternative Materials. *Materials* 13, 4378.
- Jain, J., Olek, J., Verian, K., & Whiting, N. (2012). Chloride penetration resistance of concrete mixtures with recycled concrete aggregates. In *Brittle Matrix Composites 10* (s. 377–386). Cambridge, UK: Woodhead Publishing.
- James. (2011). Use of Recycled Aggregate and Fly Ash in Concrete Pavement. *Am. J. Eng. Appl. Sci.*, 4, 201–208.
- Jin, R., Li, B., Zhou, T., Wanatowski, D., & Piroozfar, P. (2017). An empirical study of perceptions towards construction and demolition waste recycling and reuse in China. *Resour. Conserv. Recycl.*, 126, 86–98.
- Jittbodee, K., & Somnuk, T. (2003). Vibration Consistency Prediction Model for Roller Compacted Concrete. *ACI Mater.* 100(1), 3-13.
- Júnior, N., Silva, G., Dias, C., & Ribeiro, D. (2019). Concrete containing recycled aggregates: Estimated lifetime using chloride migration test. *Constr. Build. Mater.*, 222, 108–118.
- Kameshwar, P., Athira, G., Bahurudeen, A., & P. Nanthagopalan. (2020). Suitable pretreatment process for rice husk ash towards dosage optimization and its effect on properties of cementitious mortar. *Struct. Concr.* doi:<https://doi.org/10.1002/suco.202000227>
- Karadelis , J., & Lin , Y. (2015). Flexural strengths and fibre efficiency of steel-fibre-reinforced, roller-compacted, polymer modified concrete. *Construction and Building Materials*, 93, 498–505.
- Karahan, O. (2006). *Liflerle Güçlendirilmiş Uçucu Küllü Betonların Özellikleri*. Adana: Doktora Tezi, Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı.
- Karahan, O. (2006). *Liflerle Güçlendirilmiş Uçucu Küllü Betonların Özellikleri*. Çukurova Üniversitesi Doktora Tezi.
- Katz, A. (2003). Properties of concrete made with recycled aggregate from partially hydrated old concrete. *Cement and Concrete Research*, 33(2): 703-711.
- Katz, A. (2004). Treatments for the improvement of recycled aggregate. *J. Mater. Civ. Eng.*, 16, 597–603.

- Kenai, S. (2018). *Recycled aggregates*. UK, : In Waste and Supplementary Cementitious Materials in Concrete; Woodhead Publishing: Cambridge.
- KGM. (2016, 12). *Beton Yol Kaplamaları Teknik Şartnamesi*. (A. v. Başkanlığı, Düzenleyen) Karayolları Genel Müdürlüğü: <https://www.betonyol.org.tr/uploads/otherpublications/kgm-beton-yol-kaplamalari-teknik-sartnamesi.pdf> adresinden alındı
- KGM. (2022). *Yol Ağı Bilgileri*. Ankara: Karayolları Genel Müdürlüğü. <https://www.kgm.gov.tr/Sayfalar/KGM/SiteTr/Root/default.aspx> adresinden alındı
- Khatib, J. (2005). Properties of concrete incorporating fine recycled aggregate. *Cem. Concr. Res.*, 35, 763–769.
- Kılıç, İ., & Gök, S. (2021). *Silindirle Sıkıştırılmış Atık Beton Agregasının Silindirle Sıkıştırılmış Beton Üretiminde Yeniden Değerlendirilmesi*. Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, 10 (3). doi:10.17798/bitlisfen.877421
- Kim, K., Ahn, J., Lee, D., & Cho, H. (2008). Development of recycled aggregate producing process from waste concrete using autogenous mill and density separation. *In Proceedings of the REWAS 2008: Global Symposium on Recycling, Waste Treatment and Clean Technology*. Cancun, Mexico.
- Kiron, M. (2013, 01 13). *Polypropylene Fiber: Properties, Manufacturing Process and Applications*. textilelearner: <https://textilelearner.net/polypropylene-fiber-properties-applications/> adresinden alındı
- Kisku, N., Joshi, H., Ansari, M., Panda, S., Nayak, S., & Dutta, S. (2017). A critical review and assessment for usage of recycled aggregate as sustainable construction material. *Constr. Build. Mater.*, 131, 721–740.
- Kiyanets, A. (2018). Concrete with recycled polyethylene terephthalate fiber. *Magazine of Civil Engineering*, 8(84), 09–118.
- Kleijer, A., Lasvaux, S., Citherlet, S., & Viviani, M. (2017). Product-specific Life Cycle Assessment of ready mix concrete: Comparison between a recycled and an ordinary concrete. *Resour. Conserv. Recycl.* 122, 210–218.
- Klyuev, S., Klyuev, A., Khezhev, T., & Pukhareenko, Y. (2018). High-strength fine-grained fiber concrete with combined reinforcement by fiber. *J. Eng. Appl. Sci.* 13, 6407–6412.
- Kou, S., Poon, C., & Chan, D. (2008). Influence of fly ash as a cement addition on the hardened properties of recycled aggregate concrete. *Mater. Struct. Constr.*, 41, 1191–1201.
- Küçük, M., & Güneş, G. (2013). Sivil toplum kuruluşları ve çevresel sürdürülebilirlik. *Sosyal ve Beşeri Bilimler Dergisi*, 5(2), 298-311.

- Lesovik, V., Glagolev, E., Popov, D., Lesovik, G., & Ageeva, M. (2018). Textile-reinforced concrete using composite binder based on new types of mineral raw materials. *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.* 327, 032033.
- Levy, S., & Helene, P. (2004). Durability of recycled aggregates concrete: A safe way to sustainable development. *Cem. Concr. Res.* 34, 1975–1980.
- Li, W., Xiao, J., Sun, Z., Kawashima, S., & Shah, S. (2012). Interfacial transition zones in recycled aggregate concrete with different mixing approaches. *Constr. Build. Mater.*, 35, 1045–1055.
- Li, X., & Chen, Y. (2019). Research into the mechanical properties of wet-sprayed polypropylene fibre-reinforced concrete. *Magazine of Concrete Research*. doi:10.1680/jmacr.18.00025
- Limbachiya, M., Leelawat, T., & Dhir, R. (2000). Use of recycled concrete aggregate in high-strength concrete. *Mater. Struct. Constr.* 33, 574–580.
- Liu, X., Wang, X., & Wang, E. (2017). Effects of gas pressure on bursting liability of coal under uniaxial conditions. *Journal of Natural Gas Science and Engineering* 39(3), 90–100.
- Lopez-Uceda, A., Agrela, F., Cabrera, M., Ayuso, J., & López, M. (2018). Mechanical performance of roller compacted. *Road Materials and Pavement Design* 19:1 ISSN: 1468-0629 (Print) 2164-7402, 36-55. doi:10.1080/14680629.2016.1232659
- Luhr, D. (2008). *RCC Applications for Pavements*. Portland Cement Association.
- Lye, C., Dhir, R., & Ghataora, G. (2016). Ghataora, G.S. Shrinkage of recycled aggregate concrete. *Proc. Inst. Civ. Eng. Struct. Build.*, 169, 867–891.
- Lye, C., Dhir, R., Ghataora, G., & Li, H. (2016). Creep strain of recycled aggregate concrete. *Constr. Build. Mater.*, 102, 244–259.
- Madhkhan, M., Azizkhani, R., & Torki Harchegani, M. (2012). Effects of pozzolans together with steel and polypropylene fibers on mechanical properties of RCC pavements. *Construction and Building Materials*, 26(1), 102–112.
- Makul, N., Fediuk, R., Amran, M., Zeyad, A. M., Murali, G., Vatin, N., . . . Vasilev, Y. (2021). Use of Recycled Concrete Aggregates in Production of Green Cement-Based Concrete Composites: A Review. *Crystals* 11, 232.
- Malešev, M., Radonjanin, V., & Marinković, S. (2010). Recycled concrete as aggregate for structural concrete production. *Sustainability* 2, 1204–1225.
- Mália, M., de Brito, J., Pinheiro, M., & Bravo, M. (2013). Construction and demolition waste indicators. *Waste Manag. Res.* 31, 241–255.
- Mardani, A., Bayqra, S., Özen, S., & Faqiri, Z. (2020). Silindirle Sıkıştırılmış Beton Karışımlarında Kullanılan Malzemelerin Özellikleri. *International Journal of*

- Mardani-Aghabeglou, A., Andiç-Çakır, Ö., & Ramyar, K. (2013). Freeze–Thaw Resistance and Transport Properties of High-Volume Fly Ash Roller Compacted Concrete Designed by Maximum Density Method. *Cement & Concrete Composites*, 37, 259–266.
- Marinković, S., Radonjanin, V., Malešev, M., & Ignjatović, I. (2010). Comparative environmental assessment of natural and recycled aggregate concrete. *Waste Manag.*, 30, 2255–2264.
- Martín-Morales, M., Zamorano, M., Ruiz-Moyano, A., & Valverde-Espinosa, I. (2011). Characterization of recycled aggregates construction and demolition waste for concrete production following the Spanish Structural Concrete Code EHE-08. *Constr. Build. Mater.* 25, 742–748.
- Mas, B., Cladera, A., del Olmo, T., & Pitarch, F. (2012). Influence of the amount of mixed recycled aggregates on the properties of concrete for non-structural use. *Constr. Build. Mater.* 27, 612–622.
- McNeil, K., & Kang, T. (2013). Recycled Concrete Aggregates: A Review. *Int. J. Concr. Struct. Mater.*, 7, 61–69.
- Mehta, P., & Monteiro, P. (2006). *Concrete: Microstructure, Properties, and Materials*,. New York: 3rd ed., McGraw-Hill.
- Mehta. (2002). Greening of the Concrete Industry for Sustainable Development. *Concrete International* (s. 24:28). Concrete International.
- Meneses, E., Gaussens, M., Jakobsen, C., Mikkelsen, P., Grum, M., & Vezzaro, L. (2018). Coordinating rule-based and system-wide model predictive control strategies to reduce storage expansion of combined urban drainage systems: The case study of Lundtofte,Denmark. *Water*, 10, (s. 76). Lundtofte,Denmark.
- Mohammadhosseini, H., & Yatim, J. (2017). Microstructure and residual properties of green concrete composites incorporating waste carpet fibers and palm oil fuel ash at elevated temperatures. *J. Clean. Prod.* 144, 8-21.
- Mohammadhosseini, H., Alyousef, R., Lim, N., Tahir, M., Alabduljabbar, H., Mohamed, A., & Samadi, M. (2020). Waste metalized film food packaging as low cost and ecofriendly fibrous materials in the production of sustainable and green concrete composites. *J. Clean. Prod.* 258, 120726.
- Mohammadhosseini, H., Yatim, J., Sam, A., & Awal, A. (2017). Durability performance of green concrete composites containing waste carpet fibers and palm oil fuel ash. *J. Clean.Prod.* 144, 448-458.
- Mohammed, S., & Najim, K. (2020). Mechanical strength, flexural behavior and fracture energy of Recycled Concrete Aggregate self-compacting concrete. *Structures*, 23, 34–43.

- Mohseni, E., Saadati, R., Kordbacheh, N., Parpinchi, Z., & Tang, W. (2017). Engineering and microstructural assessment of fibre-reinforced self-compacting concrete containing recycled coarse aggregate. *J. Clean. Prod.*, 168, 605–613.
- Murugesan, T., Vidjeapriya, R., & Bahurudeen, A. (2020). Sugarcane bagasse ash-blended concrete for effective resource utilization between sugar and construction industries. *Sugar Tech.* 22 , 858–869.
- MY., D. (2020). *Effect of wetting-drying cycles on gypsum plasters containing ground basaltic pumice and polypropylene fibers*. Journal of Building Engineering,.
- Nagrockiene, D., & Daugela, A. (2018). Investigation into the properties of concrete modified with biomass. *Construction and Building Materials* 174, 369–375.
- Neville, A. (2000). *Properties of Concrete (Third Edition)*. New York: Longman Scientific and Technical.
- O'Donnell, B., Ives, C., Mohiuddin, O., & Bunnell, B. (2019). Beyond the Present Constraints That Prevent a Wide Spread of Tissue Engineering and Regenerative Medicine Approaches. *Front. Bioeng. Biotechnol.* 7, 95.
- Oikonomou, N. (2005). Recycled Concrete Aggregates. *Cement & Concrete Composites*, 27, 315–318.
- Otsuki, N., Miyazato, S., & Yodsudjai, W. (2003). Influence of recycled aggregate on interfacial transition zone, strength, chloride penetration and carbonation of concrete. *J. Mater. Civ. Eng.*, 15, 443–451.
- Pacheco-Torgal, F., Tam, V., Labrincha, J., Ding, Y., & de Brito, J. (2013). *Handbook of Recycled Concrete and Demolition Waste* . Cambridge, UK: Woodhead Publishing.
- Pandey, A., & Kumar, B. (2020). A comprehensive investigation on application of microsilica and rice straw ash in rigid pavement. *Constr. Build. Mater.* 252, 119053.
- Pavlu, T., Kocí, V., & Hájek, P. (2019). Environmental assessment of two use cycles of recycled aggregate concrete. *Sustainability* 2019-11, 6185.
- PCA. (2005). *Roller-Compacted Concrete Pavements for Highways and Streets*. Portland Cement Association.
- PCA. (2021). *Guide Specification for Construction of Roller Compacted Concrete Pavements*. Portland Cement Association (PCA). <https://www.chaneyenterprises.com/files/productdocs/Guidetorcc.PDF> adresinden alındı
- PCA. (2021, 10 26). *Roller-Compacted Concrete (RCC)*. Portland Cement Association : https://www.cement.org/docs/default-source/cementconcreteapplications/sn2975.pdf?sfvrsn=414bfdbf_2 adresinden alındı

- Pehlivan, E., Yazıcı, M., & Güner, G. (2014). Endüstriyel Katı Atıklar ve Geri Kazanım. 2. *International Symposium on Innovative Technologies in Engineering and Science (ISITES2014)*. Karabük.
- Pei-wei , G., Sheng-xing , W., Ping-hua , L., & Zhong-ru , W. (2006). The Characteristics of Air Void and Frost Resistance of RCC with Fly Ash and Expansive Agent. *Constr Build Mater.* 20(8), 586–90.
- Pimplikar, S., & Sonawane, T. (2013). Use of Recycled Aggregate Concrete. *Journal of Mechanical and Civil Engineering*, 2278-1684, pp: 52-59.
- Poon, C., & Lam, C. (2008). The effect of aggregate-to-cement ratio and types of aggregates on the properties of pre-cast concrete blocks. *Cem. Concr. Compos.* 30, 283–289.
- Poon, C., Kou, S., & Lam, L. (2002). Use of recycled aggregates in molded concrete bricks and blocks. *Constr. Build. Mater.*, 16,, 281–289.
- Poon, C., Shui, Z., & Lam, L. (2004). Effect of microstructure of ITZ on compressive strength of concrete prepared with recycled aggregates. *Constr. Build. Mater.*, 18, 461–468.
- Radonjanin, V., Malešev, M., Marinković, S., & al Maltý, A. (2013). Green recycled aggregate concrete. *Constr. Build. Mater.*, 47,, 1503–1511.
- Rao, S., Sravana, P., & Rao , T. (2016). Abrasion resistance and mechanical properties of Roller Compacted Concrete with GGBS. *Construction and Building Materials*, 114, 925–933.
- Ratnayake, R., & Samarakoon, S. (2016). *Structural integrity assessment and control of ageing onshore and offshore structures*. Pennsylvania, PA, USA: In Modeling and Simulation Techniques in Structural Engineering; Samui, P., Chakraborty, S., Kim, D., Eds.; IGI Global:.
- Rishav, G., & Rajini, G. (2020). Performance evaluation of polypropylene fiber waste reinforced concrete in presence of silica fume. *reinforced concrete in presence of silica fume, Materials Today: Proceedings*, 06, 482.
- Rizvi, R., Tighe, S., Henderson, V., & Norris, J. (2009). *Incorporating recycled concrete aggregate in pervious concrete pavements*. Vancouver, BC, Canada: In Proceedings of the 2009 Annual Conference and Exhibition of the Transportation Association of Canada-Transportation in a Climate of Change.
- Rodríguez, C., Sánchez, I., Miñano, I., Benito, F., Cabeza, M., & Parra, C. (2019). On the possibility of using recycled mixed aggregates and GICC thermal plant wastes in non-structural concrete elements. *Sustainability*, 11, 633.
- Rukzon, S., & Chindaprasirt, P. (2012). Utilization of bagasse ash in high-strength concrete. *Materials and Design* 34, 45–50.

- Sagoe-Crentsil, K., Brown, T., & Taylor, A. (2001). Performance of concrete made with commercially produced coarse recycled concrete aggregate. *Cem. Concr. Res.*, 31, 707–712.
- Sağlam, B. (2022). *Silindirle Sıkıştırılmış Betonlarda Agregat Granülometrisinin Mekanik Özelliklere Etkisi*. Kırklareli: Kırklareli Üniversitesi Fen Bilimleri Endüstrisi YL Tezi.
- Sargın, S., Saltan, M., Morova, N., Serin, S., & Terzi, S. (2013). Evaluation of rice husk ash as filler in hot mix asphalt concrete. *Constr. Build. Mater.* 48, 390-397.
- Shabani, R., Şengün, E., Öztürk, H., & Yaman, Ö. (2021). Silindirle Sıkıştırılmış Beton (SSB) Kaplamaların Yüzey Özelliklerine Karışım Parametrelerinin Etkisi. *Teknik Dergi, Yazı 629*, 11153-11174. <https://dergipark.org.tr/en/download/article-file/1103275> adresinden alındı
- Shaikh, F., Nath, P., Hosan, A., John, M., & Biswas, W. (2019). Sustainability assessment of recycled aggregates concrete mixes containing industrial by-products. *Mater. Today Sustain.* 5, 100013.
- Shamsaei, M., Aghayan, I., & Kazemi, K. (2017). Experimental investigation of using cross-linked polyethylene waste as aggregate in roller compacted concrete pavement. *Journal of Cleaner Production*, 165, 290-297.
- Shi, C., Li, Y., Zhang, J., Li, W., Chong, L., & Xie, Z. (2016). Performance enhancement of recycled concrete aggregate—A review. *J. Clean. Prod.*, 112, 466–472.
- Shin, M., Kim, K., Gwon, S., & Cha, S. (2014). Durability of sustainable sulfur concrete with fly ash and recycled aggregate against chemical and weathering environments. *Constr. Build. Mater.*, 69, 167–176.
- Silva, R., de Brito, J., & Dhir, R. (2014). Properties and composition of recycled aggregates from construction and demolition waste suitable for concrete production. *Constr. Build. Mater.* 65, 201–217.
- Silva, R., Neves, R., de Brito, J., & Dhir, R. (2015). Carbonation behaviour of recycled aggregate concrete. *Cem. Concr. Compos.* 62, 22-32.
- Sim, J., & Park, C. (2011). Compressive strength and resistance to chloride ion penetration and carbonation of recycled aggregate concrete with varying amount of fly ash and fine recycled aggregate. *Waste Manag.* 31, 2352–2360.
- Singh, N., & Singh, S. (2016). Carbonation and electrical resistance of self compacting concrete made with recycled concrete aggregates and metakaolin. *Constr. Build. Mater.* 121, 400–409.
- Singh, S., & Kaushik, S. (2003). Strength of Steel Fibre Reinforced Concrete in Flexure. *Cement and Concrete Composites*, 25.

- Song, P., Hwang, S., & Sheu, B. (2005). Strength Properties of Nylon- and Polypropylene Fiber-Reinforced Concretes. *Cement and Concrete Research*, 35, 1546-1550.
- Sravana, P., Rao, T., & Rao, S. (2016). Investigating the effect of M-sand on abrasion resistance of Roller Compacted Concrete containing GGBS. *Construction and Building Materials*, 122, 191-201.
- Sukontasukkul, P., Ghaisakulkiet, U., & Jamsawang, P. (2019). Case investigation on application of steel fibers in roller compacted concrete pavement in Thailand. *Case Studies in Construction Materials*, 11, 271-282.
- T.C Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı. (2023, 02 17). *Bakan Kurum: "84 Bin 726 Bina Yıkık, Acil Yıkılacak Ve Ağır Hasarlı Olarak Tespit Edilmiştir"*. T.C Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı: <https://www.csb.gov.tr/bakan-kurum-84-bin-726-bina-yikik-acil-yikilacak-ve-agir-hasarli-olarak-tespit-edilmistir-bakanlik-faaliyetleri-38433> adresinden alındı
- T.C. Tarım ve Orman Bakanlığı. (2023). *Türkiye Şeker Sektörüne İlişkin Sorular*. T.C. Tarım Ve Orman Bakanlığı Şeker Dairesi Başkanlığı: <https://www.tarimorman.gov.tr/SDB/Menu/96/Turkiye-Seker-Sektorune-Iliskin-Sorular#:~:text=T%C3%BCrkiye'de%20pancar%20%C5%9Fekeri%20kurulu,2%20milyon%20520%20bin%20tondur.> adresinden alındı
- Tabsh, S., & Abdelfatah, A. (2009). Influence of recycled concrete aggregates on strength properties of concrete. *Constr. Build. Mater.* 81, 179-186.
- Tahami, S., Arabani, M., & Mirhosseini, A. (2018). Usage of two biomass ashes as filler in hot mix asphalt. *Constr. Build. Mater.* 170, 547-556.
- Tam, V. (2008). Economic comparison of concrete recycling: A case study approach. *Resour. Conserv. Recycl.*, 52, 821-828.
- Tam, V., Gao, X., & Tam, C. (2005). Microstructural analysis of recycled aggregate concrete produced from two-stage mixing approach. *Cem. Concr. Res.* 35, 1195-1203.
- Tam, V., Soomro, M., & Evangelista, A. (2018). A review of recycled aggregate in concrete applications. *Constr. Build Mater.*, 172, 272-292.
- TÇMB. (2018). *Silindirle Sıkıştırılmış Betonların Teknik Şartnamesi*. Türkiye Çimentosu Müstahsililer Birliği. [https://cdniys.tarimorman.gov.tr/api/File/GetFile/425/KonuIcerik/740/1088/DosyaGaleri/silindirle-s%C4%B1k%C4%B1%C5%9F%C4%B1r%C4%B1lm%C4%B1%C5%9F-beton-\(ssb\)-in%C5%9Faat-teknik-%C5%9Fartnamesi_r00_20061110.pdf](https://cdniys.tarimorman.gov.tr/api/File/GetFile/425/KonuIcerik/740/1088/DosyaGaleri/silindirle-s%C4%B1k%C4%B1%C5%9F%C4%B1r%C4%B1lm%C4%B1%C5%9F-beton-(ssb)-in%C5%9Faat-teknik-%C5%9Fartnamesi_r00_20061110.pdf) adresinden alındı
- TÇMB. (2020). *Silindirle sıkıştırılmış beton: Beton kaplamaları ulaştırma sektörünün kullanımına sunan bir yöntem*. Türkiye Çimento Müstahsililer Birliği & EUPAVE .

- TechnicalNews. (2019, 01). *The Freeze-Thaw Cycle in Concrete and Brick Assemblies*. Technical News Bulletin Issue 84: https://orf.od.nih.gov/TechnicalResources/Documents/Technical%20Bulletins/19TB/The%20Freeze-Thaw%20Cycle%20in%20Concrete%20and%20Brick%20Assemblies%20January%202019-Technical%20Bulletin_508.pdf adresinden alındı
- Teh, S., Wiedmann, T., & Moore, S. (2018). Mixed-unit hybrid life cycle assessment applied to the recycling of construction materials. *J. Econ. Struct.*, 7, 1–25.
- Topçu, İ., Demirel, O. E., & Uygunoğlu, T. (2016). *Polipropilen Lif Katkılı Harçların Fiziksel ve Mekanik Özellikleri*. Eskişehir, Afyonkarahisar: Yüksek Lisans Tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü.
- Topličić-Ćurčić, G., Grdić, D., Ristić, N., & Grdić, Z. (2015). *Properties, materials and durability of rolled compacted concrete for pavements*. Nis, Serbia: University of Nis, Faculty of Civil Engineering and Architecture. doi:10.5937/ZasMat1503345T
- Tošić, N., Marinković, S., Dašić, T., & Stanić, M. (2015). Multicriteria optimization of natural and recycled aggregate concrete for structural use. *J. Clean. Prod.*, 87, 766–776.
- Tuqa, W. (2020). Properties of high strength polypropylene fiber concrete containing recycled aggregate. *Construction and Building Materials*, 241, 118010.
- Turanlı, L. (1998). Atık betonların yeni betonda kaba agrega olarak kullanılması. *Hazır Beton*, 61-66.
- Uçar, G. (2022). *İki Farklı Polipropilen Lifin Rijit Kaplamalarda Hibrit Olarak Kullanılabilirliğinin Araştırılması*. Erzurum, Türkiye: ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı Yüksek Lisans Tezi.
- URL-1. (2018). *Which Is The Best Order To Load The Components ?* <https://www.fiorigroup.com/it/faq/which-is-the-best-order-to-load-the-components/> adresinden alındı
- URL-2. (2017). *Polipropilen lifi*. Tekstilbilgi: <https://tekstilbilgi.net/po-poliolefin-lifi.html> adresinden alındı
- URL-3. (2023). *Yüksek Mukavemetli Yüksek Mukavemetli Polipropilen lifler (PP fiber)*. Made in China: https://www.google.com/search?sca_esv=8af57988f867e396&sxsrf=ADLYWII0KNDv7WFkeAvjdu1M2k5ZjYTTThA:1718317497604&q=polipropilen+lif&udm=2&fbs=AEQNm0BKpCiw9W1hnB1w_0SNMkAbU9iUfwVZRGvnAzM5bhRsslJlplbBhF1RveHjSSP2jQZvphBb8iuYF2mCxFd1vZK5Xw7JtwpZbTPQKgI0P1t547 adresinden alındı

- Vassilev, S., Baxter, D., Andersen, L., & Vassileva, C. (2013). An overview of the composition and application of biomass ash: part 2. Potential utilisation, technological and ecological advantages and challenges. *Fuel* 105, 19-39.
- Verian, K., Ashraf, W., & Cao, Y. (2018). Properties of recycled concrete aggregate and their influence in new concrete production. *Resour. Conserv. Recycl.* 133, 30–49.
- Wagih, A., El-Karmoty, H., Ebid, M., & Okba, S. (2013). Recycled construction and demolition concrete waste as aggregate for structural concrete. *HBRC J.*, 9, 193–200.
- Wang, H., Sun, X., Wang, J., & Monteiro, P. (2016). Permeability of concrete with recycled concrete aggregate and pozzolanic materials under stress. *Materials* 9, 252. *Materials* 9, 252.
- Wang, X., Li, K., Zhong, Y., & Xu, Q. (2018). Investigation of thermal reflective cracking in asphalt pavement using XFEM coupled with DFLUX subroutine and FILM subroutine. *Arab. J. Sci. Eng.*, 1–11.
- Wijayasundara, M., Mendis, P., & Crawford, R. (2017). Methodology for the integrated assessment on the use of recycled concrete aggregate replacing natural aggregate in structural concrete. *J. Clean. Prod.*, 166, 321–334.
- Wijayasundara, M., Mendis, P., & Crawford, R. (2018). Integrated assessment of the use of recycled concrete aggregate replacing natural aggregate in structural concrete. *J. Clean. Prod.*
- Wijayasundara, M., Mendis, P., & Crawford, R. (2018). Net incremental indirect external benefit of manufacturing recycled aggregate concrete. *concrete. Waste Manag.*, 78, 279–291.
- Wikipedia. (2021, 02 21). *Polipropilen*. wikipedia: <https://tr.wikipedia.org/wiki/Polipropilen> adresinden alındı
- Wu, Z., Yu, A., Shen, L., & Liu, G. (2014). Quantifying construction and demolition waste: An analytical review. *An analytical review. Waste Manag.* 34,, 1683–1692.
- Xue, Y., Wu, S., Cai, J., Zhou, M., & Zha, J. (2014). Effects of two biomass ashes on asphalt utilization of biomass ashes as pozzolanic materials. *Constr. Build. Mater.* 68, 291-300.
- Yaman , İ., & Ceylan, H. (2013). Silindirle Sıkıştırılmış Beton Yollar. İstanbul: Hazır Beton Kongresi ve Beton, Agrega, İnşaat Teknolojileri ve Ekipmanları Fuarı.
- Yaman, İ. (2014). *Silindirle Sıkıştırılmış Beton Yollar*. Beton Ankara: <https://betonyol.org.tr/uploads/otherpublications/ssb-yollar-sunum-i-ozgur-yaman.pdf> adresinden alındı

- Yetim, E., & Yılmaz, D. (2020). Beton Yollar ve Silindirle Sıkıştırılmış Betonun Türkiye’deki Yeni Uygulama Alanı. *Çimento ve Beton Dünyası* 148, 94-105.
- Zainudin, M., Khairuddi, F., Ng, C., Osmi, C., Khadijah, S., Misnon, N., & Murniati, S. (2016). Effect of sugarcane bagasse ash as filler in hot mix asphalt, *Mater. Sci. Forum. Mater. Sci. Forum* 846 , 683-689.
- Zega, C., & di Maio, Á. (2011). Zega, C.J.; di Maio, Á.A. Use of recycled fine aggregate in concretes with durable requirements. *Waste Manag.*, 31, 2336–2340.
- Zega, C., Villagrán-Zaccardi, Y., & di Maio, A. (2010). Effect of natural coarse aggregate type on the physical and mechanical properties of recycled coarse aggregates. *Mater. Struct. Constr.*, 43, 195–202.
- Zulkati, A., Wong, Y., & Sun, D. (2013). Mechanistic performance of asphalt-concrete mixture incorporating coarse recycled concrete aggregate. *J. Mater. Civ. Eng.*, 25, 1299–1305.