



T.C.

**HARRAN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**GÜÇLENDİRİLMİŞ GERİ DÖNÜŞÜM ASFALT AGREGASI İLE
ÜRETİLEN BETON YOL KAPLAMALARININ MEKANİK ÖZELLİKLERİ**

İZZETTİN ŞENBAYRAM

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

Şanlıurfa

2025



T.C.

**HARRAN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**GÜÇLENDİRİLMİŞ GERİ DÖNÜŞÜM ASFALT AGREGASI İLE
ÜRETİLEN BETON YOL KAPLAMALARININ MEKANİK ÖZELLİKLERİ**

İZZETTİN ŞENBAYRAM

Danışmanı: Doç. Dr. Zeynep ALĞIN

Şanlıurfa

2025

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans öğrenimim süresince kıymetli bilgi ve tecrübelerinden daima yararlandığım, tezimin her aşamasında akademik rehberliğini ve desteğini esirgemeyen danışmanım Sayın Doç. Dr. Zeynep Alğın'a en içten şükranlarımı sunarım.

Yüksek lisans çalışmalarımı gerçekleştirmemde verdikleri değerli katkılardan ötürü Sayın Prof. Dr. Halil Murat Alğın'a ve Sayın Doç. Dr. M. Fethi Güllü 'ye teşekkürlerimi sunuyorum. Laboratuvar çalışmalarım süresince sağladığı teknik destek ve iş birliği için dostum Ramazan Aktar'a minnetlerimi sunarım.

Eğitim hayatımın başlangıcından itibaren yalnızca akademik gelişimime değil, aynı zamanda dürüst, ilkeli ve çağdaş bir birey olarak yetişmeme büyük emek harcayan başta kıymetli babam Ecz. Zeynel Abidin Şenbayram'a, değerli annem Münevver Şenbayram'a ve tüm Şenbayram ailesine sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

ÖZET	i
ABSTRACT	ii
KISALTMALAR	iii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	iv
ÇİZELGELER DİZİNİ	v
1. GİRİŞ	1
2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR	7
2.1 GKA Agregalarının Tanımı ve Özellikleri	7
2.1.1 GKA Agregalarının Oluşum Süreci	7
2.1.2 Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri	10
2.1.3 Doğal Agregalara Kıyasla Farklılıkları	12
2.2. Sürdürülebilir Malzeme Olarak GKA Agregası	13
2.2.1. Doğal Kaynak Tüketiminin Azaltılması	14
2.2.2. Karbon Ayak İzi ve Çevresel Etkiler.....	14
2.2.3. Döngüsel Ekonomi Kapsamında Değerlendirilmesi.....	16
2.3. GKA Agregalarının İnşaat Uygulamalarındaki Kullanım Alanları	17
2.3.1. Yol Üstyapılarında Kullanımı	17
2.3.2. Dolgu ve Altyapı Uygulamaları.....	19
2.3.3. Beton ve Harç Üretiminde Kullanımı	20
2.4. Beton Uygulamalarında GKA Agregalarının Mekanik Özelliklere Etkisi.....	21
2.4.1. Basınç Dayanımı	21
2.4.2. Eğilme Dayanımı	22
2.4.3. Çekme Dayanımı	22
2.4.4. Elastisite Modülü.....	22
2.4.5. Dayanıklılık Özellikleri.....	23
3. GEREÇ VE YÖNTEM	24
3.1. Malzemeler	24
3.1.1. Çimento	24
3.1.2. Agregası	24
3.1.2.1. GKA Agregalarının Kaplanması ve Kürlenmesi.....	25
3.1.3. Su	29
3.1.4. Süper Akışkanlaştırıcı	29
3.2. Beton Karışım Tasarımı	29
3.3. Numunelerin Hazırlanması	32

3.4. Yöntem	33
3.4.1. Basınç Dayanımı Deneyi	33
3.4.2. Eğilme Dayanımı Deneyi	34
3.4.3. Yarmada Çekme Deneyi	35
3.4.4. Su Emme Deneyi	36
4. BULGULAR	38
4.1. Basınç Dayanımı	38
4.2. Eğilme Dayanımı	41
4.3. Yarmada Çekme Dayanımı	44
4.4. Su Emme	47
4.5. X- Işını Difraksiyonu (XRD) Analizi	49
4.6. SEM Analizi	52
5. TARTIŞMA	55
6. SONUÇLAR	57
KAYNAKLAR	60
ÖZGEÇMİŞ	64

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

GÜÇLENDİRİLMİŞ GERİ DÖNÜŞÜM ASFALT AGREGASI İLE ÜRETİLEN BETON YOL KAPLAMALARININ MEKANİK ÖZELLİKLERİ

İzzettin ŞENBAYRAM

Harran Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Zeynep ALĞIN
Yıl: 2025, Sayfa : 64

Günümüzde inşaat sektöründe sürdürülebilir malzeme kullanımı ve geri dönüşüm uygulamaları giderek daha fazla önem kazanmaktadır. Özellikle asfalt kaplama atıklarının geri dönüştürülerek yapı malzemesi olarak yeniden değerlendirilmesi hem çevresel hem de ekonomik açıdan avantajlar sunmaktadır. Bu kapsamda, geri kazanılmış asfalt (GKA) agregalarının beton üretiminde kullanımı, doğal agrega tüketimini azaltmak ve atık yönetimine katkı sağlamak adına dikkate değer bir çözüm olarak değerlendirilmektedir. Ancak, GKA agregalarının yüzeyinde bulunan bitüm tabakası, çimento hamuruyla yeterli aderans sağlayamamakta ve bu durum, agregası-çimento ara yüzünde zayıf geçiş bölgelerinin (ITZ) oluşmasına neden olarak betonun mekanik performansını olumsuz yönde etkilemektedir. Bu durum beton üretiminde GKA agregasının kullanımını önemli ölçüde sınırlamaktadır. Bu tez çalışmasında, bu sorunun üstesinden gelmek amacıyla, soğuk bağlama tekniği kullanılarak GKA agregalarının yüzeyi çok katmanlı olarak çimento şerbeti ile kaplanmıştır. Deneysel çalışmada, su/çimento oranı 0,45 ve çimento dozajı 350, 425 ve 500 kg/m³ olan üç farklı beton karışımı tasarlanmış olup kaplanmamış GKA agregası ile birlikte üç farklı kaplama kalınlığına sahip GKA agregası, beton karışımlarında %100 oranında kullanılmıştır. Beton karışımların hedef slump (çökme) aralığı 20–40 mm olup, bu kıvam değerini sağlamak amacıyla karışımlara değişen oranlarda süperakışkanlaştırıcı katkı ilave edilmiştir. Ham GKA ve kaplanmış GKA agregalarını içeren beton numunelerin mekanik özelliklerini belirlemek için basınç dayanımı, eğilme dayanımı ve yarmada çekme dayanımı deneyleri yapılmıştır. Ayrıca, beton numunelerinin mikroyapısal özelliklerini belirlemek amacıyla XRD (X-ışını difraksiyonu) ve SEM (taramalı elektron mikroskobu) analizleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen bulgular, kaplanmış GKA agregalarının kullanımının betonun basınç, eğilme ve yarmada çekme dayanımlarını sırasıyla yaklaşık %42, %29 ve %25 oranında artırdığını göstermiştir. Ayrıca XRD ve SEM analizleri, kaplanmış GKA agregalarının betonun mikroyapısal özelliklerini iyileştirerek kristalin faz oranını artırdığını, yoğun ve bütünlüklü bir ITZ oluşturduğunu ve çatlak oluşumunu azalttığını ortaya koymuştur.

ANAHTAR KELİMELELER: Geri Kazanılmış Asfalt (GKA), Yüzey Modifikasyonu, Güçlendirilmiş Agregası, Sürdürülebilir Beton, Mekanik Özellikler

ABSTRACT

MASTER THESIS

MECHANICAL PROPERTIES OF CONCRETE PAVEMENTS PRODUCED WITH MODIFIED RECYCLED ASPHALT AGGREGATE

İzzettin ŞENBAYRAM

**Harran University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Civil Engineering**

**Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Zeynep ALĞIN
Year: 2025, Page: 64**

In today's construction industry, the use of sustainable materials and recycling practices is becoming increasingly important. In particular, recycling asphalt pavement waste and using it again as a construction material offers environmental and economic advantages. In this context, using recycled asphalt pavement (RAP) aggregates in concrete production is a notable solution for reducing the consumption of natural aggregates and contributing to waste management. However, the bitumen layer on the surface of RAP aggregates prevents sufficient adhesion with the cement paste. This leads to the formation of weak interfacial transition zone (ITZ) at the aggregate-cement interface, which negatively affects the concrete's mechanical performance. This significantly limits the use of RAP aggregates in concrete production. This thesis study aimed to overcome this problem by coating the surface of RAP aggregates with cement paste in multiple layers using the cold bonding technique. Three different concrete mixes were designed for the experimental study, with a water/cement ratio of 0.45 and cement dosages of 350, 425 and 500 kg/m³. Both uncoated RAP aggregates and RAP aggregates with three different coating thicknesses were used at a ratio of 100% in the concrete mixes. The target slump range for the concrete mixtures was 20–40 mm, and superplasticiser admixtures were added to the mixtures in varying proportions to achieve this consistency. The mechanical properties of concrete specimens containing raw and coated RAP aggregates were determined by performing compressive, flexural and splitting tensile strength tests. Additionally, XRD (X-ray diffraction) and SEM (scanning electron microscopy) analyses were conducted to evaluate the microstructural properties of the concrete specimens. The results showed that using coated RAP aggregates increased the compressive, flexural and splitting tensile strengths of the concrete by around 42%, 29% and 25% respectively. Furthermore, XRD and SEM analyses revealed that coated RAP aggregates improved the microstructural properties of concrete by increasing the crystalline phase ratio, forming a dense and cohesive ITZ, and reducing crack formation.

KEY WORDS: Recycled Asphalt Pavement (RAP), Surface Modification, Strengthened Aggregate, Sustainable Concrete, Mechanical Properties

KISALTMALAR

ARRA	Asphalt Recycling and Reclaiming Association (Asfalt Geri Dönüşüm Birliği)
BSK	Bitümlü Sıcak Karışım
C350-GKA0	Çimento Dozajı 350 kg/m ³ olan Kaplanmamış GKA Kullanılmış Beton Numunesi
C350-GKA3	Çimento Dozajı 350 kg/m ³ olan 3 Kat Kaplanmış GKA Kullanılmış Beton Numunesi
C350-GKA5	Çimento Dozajı 350 kg/m ³ olan 5 Kat Kaplanmış GKA Kullanılmış Beton Numunesi
C350-GKA7	Çimento Dozajı 350 kg/m ³ olan 7 Kat Kaplanmış GKA Kullanılmış Beton Numunesi
C425-GKA0	Çimento Dozajı 425 kg/m ³ olan Kaplanmamış GKA Kullanılmış Beton Numunesi
C425-GKA3	Çimento Dozajı 425 kg/m ³ olan 3 Kat Kaplanmış GKA Kullanılmış Beton Numunesi
C425-GKA5	Çimento Dozajı 425 kg/m ³ olan 5 Kat Kaplanmış GKA Kullanılmış Beton Numunesi
C425-GKA7	Çimento Dozajı 425 kg/m ³ olan 7 Kat Kaplanmış GKA Kullanılmış Beton Numunesi
C500-GKA0	Çimento Dozajı 500 kg/m ³ olan Kaplanmamış GKA Kullanılmış Beton Numunesi
C500-GKA3	Çimento Dozajı 500 kg/m ³ olan 3 Kat Kaplanmış Kullanılmış Beton Numunesi
C500-GKA5	Çimento Dozajı 500 kg/m ³ olan 5 Kat Kaplanmış Kullanılmış Beton Numunesi
C500-GKA7	Çimento Dozajı 500 kg/m ³ olan 7 Kat Kaplanmış Kullanılmış Beton Numunesi
CIR	Soğuk Yerde Geri Dönüşüm (Cold In Place Recycling)
CP	Soğuk Düzeltme(Cold Planing)
FDR	Tam Derinlikte Geri Kazanım (Full Depth Reclamation)
GKA	Geri Kazanılmış Asfalt
GKAA	Geri Kazanılmış Asfalt Agregası
ITZ	Interfacial Transition Zone (Ara Yüzey Geçiş Bölgesi)
HIR	Yerde Sıcak Geri Dönüşüm (Hot In Place Recycling)
HR	Sıcak Geri Dönüşüm (Hot Recycling)
KGM	Karayolları Genel Müdürlüğü
RAP	Geri Kazanılmış Asfalt (Reclaimed Asphalt Pavement)
s/ç	Su/Çimento Oranı
GKA-0	Kaplanmamış Geri Kazanılmış Asfalt Agregası
GKA-3	3 Kat Kaplanmış Geri Kazanılmış Asfalt Agregası
GKA-5	5 Kat Kaplanmış Geri Kazanılmış Asfalt Agregası
GKA-7	7 Kat Kaplanmış Geri Kazanılmış Asfalt Agregası
SEM	Taramalı Elektron Mikroskobu (Scanning Electron Microscope)
XRD	X-Işınları Difraktometresi (X-Ray Diffraction)

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. Yol kesiti.....	9
Şekil 1.2. GKA agregası.....	10
Şekil 3. 1. Deneysel çalışmalarda kullanılan GKA agregaları	25
Şekil 3. 2. GKA agregasının boyutlandırılmasında kullanılan laboratuvar tipi kırıcı	25
Şekil 3. 3. GKA agregalarının kaplanmasıda kullanılan peletleme cihazı	26
Şekil 3. 4. Yüzeyi kaplanan GKA agregalarının üretim süreci	27
Şekil 3.5. Farklı fraksiyonlarda ve farklı kaplama kalınlıklarına sahip GKA agregaları	27
Şekil 3. 6. GKA agregalarının gradasyon eğrileri ve sınır değerler	29
Şekil 3. 7. Taze beton karışımı üzerinde yapılan çökme deneyi	30
Şekil 3.8. Taze beton numunelerinin kalıplanması işlemi	32
Şekil 3.9. Beton numunelerin kür havuzunda bekletilmesi	33
Şekil 3.10. Basınç dayanımı deneyi	34
Şekil 3. 11. Eğilme dayanımı deneyi.....	35
Şekil 3. 12. Yarmada çekme dayanımı deneyi	36
Şekil 3. 13. Su emme deneyi.....	37
Şekil 4. 1. Farklı çimento dozajlarında GKA agrega kaplama sayısının beton numunelerinin basınç dayanımı üzerindeki etkisi: (a) 350 kg/m ³ , (b) 425 kg/m ³ ve (c) 500 kg/m ³	39
Şekil 4. 2. Basınç deneyi sonrası beton numunesinin görünümü	41
Şekil 4.3. Farklı çimento dozajlarına sahip beton numunelerde GKA agregasının kaplama sayılarının eğilme dayanımına etkisi: (a) 350 kg/m ³ , (b) 425 kg/m ³ , (c) 500 kg/m ³	42
Şekil 4. 4. Eğilme dayanımı deneyi sonrası beton numunesinin görünümü	44
Şekil 4. 5. Farklı çimento dozajlarına sahip beton numunelerde GKA agregasının kaplama sayılarının yarmada çekme dayanımına etkisi: (a) 350 kg/m ³ , (b) 425 kg/m ³ , (c) 500 kg/m ³	45
Şekil 4. 6. Yarmada çekme deneyi sonrası beton numunesinin görünümü	47
Şekil 4. 7. Farklı çimento dozajlarına sahip beton numunelerde GKA agregasının kaplama sayılarının su emme değerine etkisi: (a) 350 kg/m ³ , (b) 425 kg/m ³ , (c) 500 kg/m ³	48
Şekil 4.8. Kaplamasız numuneye ait XRD grafiği	50
Şekil 4.9 Kaplamalı numuneye ait XRD grafiği	50
Şekil 4. 10. Kaplamasız GKA agregası kullanılan beton numunesine ait SEM görüntüleri; (a) 100x büyütmede genel mikroyapı görünümü, (b) 500x büyütmede agrega–çimento pastası geçiş zonu (ITZ) detayları, (c) 2000x büyütmede ITZ bölgesinde gözlenen yaklaşık 20–30 µm genişliğindeki çatlakların büyütülmüş görünümü.	53
Şekil 4. 11. Kaplamalı GKA agregası kullanılmış beton numunesine ait SEM görüntüleri; (a) 100x büyütmede daha homojen çimento matrisi yapısı, (b) 500x büyütmede agrega–matris geçiş bölgesinin kompakt yapısı, (c) 2000x büyütmede ITZ içerisinde yer alan yaklaşık 7–9 µm aralığındaki mikro çatlakların detaylı görünümü.	54

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1. GKA agregalarının özelliklerinin doğal agregalarla kıyaslanması.....	12
Çizelge 2.2. GKA kullanım oranlarına çevresel etki değerlendirmesi	16
Çizelge 2. 3. GKA agregalarının döngüsel ekonomi kapsamında değerlendirilmesi	17
Çizelge 2.4. GKA uygulama alanlarındaki avantajları ve sınırlılıkları	20
Çizelge 2. 5. GKA agregasının deney sonuçları ve genel eğilimleri	23
Çizelge 3. 1. Çimentonun kimyasal analiz sonuçları.....	24
Çizelge 3. 2. Çalışmada kullanılan agregaların özgül ağırlık ve su emme değerleri	28
Çizelge 3. 3. 1 m ³ beton için karışım oranları ve elde edilen çökme değerleri.....	31
Çizelge 4. 1. Basınç dayanımı sonuçları	38
Çizelge 4. 2. Eğilme dayanımı sonuçları.....	41
Çizelge 4.3. Yarmada çekme dayanımı deneyi sonuçları.....	44
Çizelge 4.4. Su emme deneyi sonuçları	47

1. GİRİŞ

Son yıllarda, yenilenemeyen kaynakların tüketimini azaltmaya odaklanan sürdürülebilirlik önlemlerinin karayolu sektöründe uygulanmasına olan ilgi artmıştır (Chan ve ark., 2011). Yol kaplamalarının sürdürülebilirliği, yol kaplama yapımında malzemelerin birleşik kullanımının optimize edilmesi ve daha az işlenmemiş malzeme kullanımı gerektiren yeni çözümlerin geliştirilmesi ile önemli ölçüde artırılabilir (Chan ve ark., 2011; Mohammed ve ark., 2021; Nodehi ve Mohamad Taghvaei, 2022; Selvam ve ark., 2022; Sobhan ve Mashnad, 2001). En yaygın yol kaplama sürdürülebilirliği yöntemi, işlenmemiş agregaların alternatif malzemelerle değiştirilmesidir. Geri Kazanılmış Asfalt (GKA) agregasının beton agregası olarak yeniden kullanılması, özellikle büyük metropollerde, inşaat sektörünün doğal agregalara olan bağımlılığını azalttığı için çok önemli bir konudur. Asfalt ve betonun birlikte kullanılması, kapalı döngü geri dönüşümün kolaylaştırılması için çok önemli bir yaklaşım olarak kabul edilmektedir. Bu yaklaşımın benimsenmesi, doğal kaynakların korunmasını sağlar ve böylece enerji tüketiminin ve karbon emisyonlarının azaltılması da dahil olmak üzere çevresel bozulmanın sonuçlarını hafifletir.

GKA agregası, rehabilitasyon ve bakım çalışmaları sırasında asfalt kaplamanın öğütülmesi veya bertaraf edilmesi ile elde edilir. Bu çalışmalar, kusurlu veya bozulmuş asfalt kaplamanın kaldırılması, mevcut kaplamaya yeni asfalt katmanlarının eklenmesi ve mevcut asfalt kaplamanın yeniden kaplanması gibi işlemleri içerir (Kumari ve ark., 2018; Monu ve ark., 2020; Singh ve ark., 2019; Singh ve R.N., 2020). EAPA (2022) tarafından yayınlanan verilere göre, Avrupa'da geri kazanılan asfalt miktarı yaklaşık 50 Mt'dir (EAPA, 2022). Bu miktarın yaklaşık %65-75'inin asfalt endüstrisi tarafından yeni asfalt karışımlarının üretiminde yeniden kullanıldığı ve %25-35'inin inşaat mühendisliği uygulamalarında granül malzeme olarak kullanıldığı belirlenmiştir. Buna karşılık, atıkların sadece %5'i düzenli depolama alanlarına gönderilmektedir (EAPA, 2022). Türkiye'de ise geri kazanılan asfaltın %19'u yeni asfalt karışımlarının üretiminde kullanılırken, %81'i çeşitli uygulamalar için geri dönüştürülmektedir (EAPA, 2022). Özellikle büyük ölçekte bu

kadar önemli miktarda atık üretilmesi, şüphesiz depolama alanlarını etkilemekte ve GKA stoklarını artırmaktadır (Shi ve ark., 2019a; Shi ve ark., 2019b). Bu atıklar doğru şekilde yönetilmez ve yeniden kullanılmazsa, atık üretiminde artışa neden olacak ve çok sayıda çevresel sorunun ortaya çıkmasına sebep olacaktır.

Debbarma ve ark. (2020) tarafından yapılan çalışmada, GKA agregalarının doğal agregalardan daha düşük kalitede olduğu, ancak taze haldeki özellikleri açısından bunun büyük bir sorun teşkil etmediği ortaya koyulmuştur. GKA agregasında bulunan asfalt filmi ve aglomera parçacıklarının, genel mukavemet özelliklerindeki azalmanın başlıca nedenleri olduğu belirtilmiştir; ancak, minimum mukavemet kriterleri karşılanabildiğinden, %50'ye kadar iri veya ince GKA agreganın kullanılabildiği belirtilmiştir. Dayanıklılık açısından, %50'ye kadar iri GKA, yeterli klorür iyonu penetrasyon direnci ve donma-çözülme dayanıklılığı sağlayabilmektedir. GKA agregasının karışıma eklenmesiyle, gelişmiş tokluk ve işlenebilirlik gibi faydalar olumlu olarak tespit edilmiştir, ancak gözenekli mikro yapının oluşabildiği ve bu da yakın çevreden gelen agresif iyonların geçmesine yol açarak betonun önemli ölçüde bozulmasına neden olabileceği ifade edilmiştir.

GKA agregaları doğal agregalarla karşılaştırılabilir olsa da, genellikle daha düşük kalitededir. Asfalt kaplamaların düşük yoğunluğu nedeniyle GKA agregasının özgül ağırlığı tipik olarak 2,26 ile 2,63 arasında değişmektedir (Boussetta ve ark., 2020; Courard ve ark., 2010; Debbarma ve ark., 2019a; Debbarma ve ark., 2019b; Fakhri ve Amosoltani, 2017). Ayrıca, hidrofobik özellikleri nedeniyle, asfalt malzemesi doğal agregalara kıyasla daha düşük su emilimi sergiler (Boussetta ve ark., 2020; Courard ve ark., 2010; Debbarma ve ark., 2019b; Fakhri ve Amosoltani, 2017; Modarres ve Hosseini, 2014). Bununla birlikte, bazı çalışmalar, GKA agregasının doğal agregalara göre daha yüksek su emme oranına sahip olduğunu göstermiştir (Debbarma ve ark., 2019a; Settari ve ark., 2015), bu da agregaların morfolojik ve mekanik özelliklerinin, ana malzeme kaynaklarının özelliklerine ve öğütme tekniklerine bağlı olarak değişkenlik gösterebileceğini ortaya koymaktadır (Selvam ve ark., 2022). GKA agregasının etkili kullanımında bazı kısıtlamalar bulunmaktadır. GKA agregaları ile çimento hamuru arasındaki arayüzey bağlanma enerjisinin önemli ölçüde daha düşük olduğu ve bunun da belirgin mukavemet düşüşlerine yol açtığı gösterilmiştir (Brand ve Roesler, 2017a, 2017b; B. Huang et

al., 2005). Bazı araştırmacılar (Abraham ve Ransinchung, 2018a, 2018b; Al-Oraimi ve ark., 2009; Brand ve ark., 2014; Brand ve Roesler, 2015; Delwar, M. ve ark., 1997; El Euch Ben Said ve ark., 2018; Erdem ve Blankson, 2014; Hassan ve ark., 2000; Hossiney, N. ve diğerleri, 2010; Huang ve diğerleri, 2006; Okafor, 2010; Singh ve diğerleri, 2018; Thomas ve diğerleri, 2018) farklı türde GKA agregası kullanılan çalışmalarda beton mukavemetinde yaklaşık %10 ila %81 oranında bir azalma olduğunu belgelemiştir. GKA agregasının düşük özgül ağırlığı ve çimento matrisi ile GKA agregası arasındaki zayıf bağlanma, beton mukavemetindeki düşüşün başlıca nedenleri olarak bildirilmiştir (Ben Saïd ve ark., 2017; Mukhopadhyay ve Shi, 2019).

GKA ile ilgili çalışmalar, agregaların etrafındaki asfalt filminin, beton karışımlarında sürdürülebilir kullanımının önündeki en büyük engel olduğunu ortaya koymuştur. Bu film, agregalar ile çimento matrisinin doğrudan temasını engeller ve asfalt ile harç arasında oluşan bağ genellikle daha zayıftır, yani daha büyük ve gözenekli ITZ (Shi ve ark., 2020) oluşur ve bu da betonun kalitesini düşürmektedir. Geleneksel beton karışımlarında olduğu gibi, silis dumanı, uçucu kül vb. gibi farklı çimento katkı maddeleri kullanılarak GKA agregası kullanılan betonun mukavemet özelliklerini iyileştirmeye yönelik bazı çalışmalar yapılmıştır, ancak bu çalışmalarda mukavemet özellikleri çok az etkilendiği (%2-5 bir iyileşme) ifade edilmiştir (Singh ve ark., 2018; Huang ve ark., 2006; Abraham ve Ransinchung 2019). Debbarma ve ark. (2020) GKA agregası ile üretilen betonunun mukavemetindeki bu değişikliğin neredeyse önemsiz olduğunu ifade etmişlerdir. Shi ve ark. (2020), daha az asfalt içeriğine sahip orta boy GKA agregalarının dahil edilmesinin, boşluklu agregalara kıyasla beton karışımları için daha uygun olduğunu göstermiştir. Literatürde bu sorunun üstesinden gelmek için GKA agregalara bazı yüzey iyileştirme yöntemleri uygulanmış olup bu yöntemlerin GKA agregası ile çimento hamuru arasındaki bağlanma potansiyelini artırabildiği ifade edilmiştir (Debbarma ve ark., 2020).

Singh ve ark. (2019) tarafından yapılan çalışmada GKA agregaların içerdiği toz, asfalt film tabakası ve aglomera parçacıkları gibi kirleticilerin uzaklaştırılmasına yönelik bir yüzey işlem tekniği olan Aşınma ve Aşındırma (AB&AT) yöntemi uygulanmıştır. Bu çalışmada, GKA agregalarının belirli oranlarda doğal agregalar ile ikame edildiği altı farklı beton karışımı hazırlanmıştır. Elde edilen bulgular, kirli

GKA agregalarının AB&AT yöntemi ile işlenmesinin yüzeydeki kirletici maddeleri büyük ölçüde giderdiğini ve bunun sonucunda GKA agregası ile harç matrisi arasındaki geçiş bölgesinde daha güçlü bir aderans oluştuğunu ortaya koymuştur. Ayrıca, işlenmiş GKA agregalarının kullanımı taze betonun işlenebilirliğini önemli ölçüde artırırken, sertleşmiş betonun bazı mekanik özelliklerinde sınırlı azalmalar gözlenmiştir. Bununla birlikte, bu azalmaların 40 MPa hedef basınç dayanımı kriterlerini karşıladığı ve ilgili teknik sınırlar içerisinde kaldığı belirlenmiştir.

Singh ve ark. (2017) tarafından yapılan çalışmada ise GKA agregalarının mekanik özelliklerinin AB&AT yöntemi ile işlendiğinde önemli ölçüde arttığı bulunmuştur. AB&AT yöntemi ile GKA agregasının iyileştirilmesi, kirli GKA ve yıkanmış GKA agregası içeren betona kıyasla basınç dayanımını %9,74 ve %12,71, yarmada çekme dayanımını %2,66 ve %12,21, eğilme dayanımını ise %6,05 ve %8,55 oranında artırmıştır. GKA agregasının beton karışımına dahil edilmesi, işlenebilirliği ve kohezifliği iyileştirmiştir. Su emme, ilk su emme hızı, toplam geçirgen boşluklar ve su emme katsayısı gibi betonun dayanıklılık özelliklerinin GKA içeren betonda azaldığı gözlemlenmiştir.

GKA agregalarının yüzey işlemi (kimyasal/mechanik), GKA ve çimento harcı arasındaki bağlanma potansiyelini artırmanın yollarından biridir. Geleneksel betondan farklı olarak, mineral katkı kullanımı, GKA ile üretilen beton içerisindeki asfalt-kohezyon bozukluğu nedeniyle mukavemet performansını artırmayabilir; ancak dayanıklılığın artması beklenebilir. Asfalt içeriği daha az olan orta büyüklükte GKA agregaları kullanmak, ince GKA agregalarının boşluklarını doğal ince malzemelerle doldurmak veya çimento içeriğini artırmak gibi diğer yaklaşımlar, GKA agregasının beton karışımları için uygunluğunu artırabilir (Debbarma ve ark., 2020).

Geri kazanılmış asfalt kaplaması, yol mühendisliği ve beton teknolojisinde sürdürülebilir malzeme yönetiminin temel bileşenlerinden biri olarak görülmektedir. Ancak GKA agregalarının yüzeyinde bulunan yaşlanmış bitüm tabakası, yeni bağlayıcılarla yeterli aderans oluşmasını engelleyerek mekanik ve dayanıklılık performansını sınırlamaktadır (Zaumanis ve Mallick, 2015). Bu nedenle, son yıllarda

GKA agregasının yeniden kullanımını kolaylaştırmaya yönelik çeşitli kaplama (surface coating) yöntemleri geliştirilmiştir.

Mineral esaslı kaplamalar, özellikle beton uygulamalarında öne çıkmaktadır. Kireç, çimento, uçucu kül ve silis dumanı gibi inorganik katkıların şerbet veya toz formunda uygulanması, agrega-çimento ara yüzey bölgesini güçlendirmekte ve su emme ile kılcal su emmeyi azaltarak uzun dönem dayanıklılığı artırmaktadır (Li ve ark., 2019).

Bitümlü bağlayıcı ve emülsiyon kaplamaları, GKA agregasının asfalt karışımlarında yeniden kullanılmasında yaygın bir yöntemdir. Katyonik emülsiyonlar veya rejuvenator katkılı emülsiyonlarla yapılan ön kaplamalar, yeni bitüm ile yüzey arasındaki ıslanmayı kolaylaştırmakta, soyulma riskini düşürmekte ve nem hassasiyetine karşı direnci artırmaktadır (Aurangzeb ve ark., 2014).

Polimer kaplamalar (örneğin SBR, akrilik ve epoksi), GKA agregası yüzeyinde ince ve elastik bir film oluşturarak suya karşı koruma sağlamaktadır. Bunun yanında kimyasal bağlayıcılar ve kuplaj ajanları (silan/siloksan türevleri, anti-stripping aminler) yüzey enerjisini düzenleyerek kimyasal bağlanmayı kuvvetlendirmekte ve özellikle asfalt karışımlarında aderansı geliştirmektedir (Hafeez ve ark., 2021).

Gelişen araştırmalarda nano-malzemeler (nano-silika, nano-kil, grafen oksit) ile yapılan kaplamaların, GKA agregası yüzeyinde mikro ölçekli bir dolgu etkisi yaratarak ITZ yoğunluğunu artırdığı ve erken yaş dayanımlarını iyileştirdiği gösterilmiştir (Xiao ve ark., 2018). Bunun yanında, biyobazlı kaplamalar (ör. lignin, tall-oil türevleri), çevresel sürdürülebilirlik açısından öne çıkmakta ve aynı zamanda yaşlanmış bitümün reolojik özelliklerini kısmen yenileyici bir işlev görmektedir (Cai ve ark, 2020).

Deneyisel düzeyde incelenen enerji tabanlı yöntemler (plazma, mikrodalga, UV-ozon), GKA agrega yüzeyini aktive ederek kaplama verimini artırma potansiyeli taşımaktadır. Ancak bu teknikler, henüz saha uygulamalarına taşınamamış olup laboratuvar ölçeğinde kalmıştır (Liu ve ark., 2022).

Genel olarak, beton uygulamalarında mineral esaslı ve kimyasal bazlı kaplamalar daha uygun sonuçlar verirken, asfalt karışımlarında emülsiyon,

rejuvenator ve anti-stripping katkılarının daha yaygın ve etkin olduğu görülmektedir. Dolayısıyla yöntem seçimi, kullanım amacı, malzeme özellikleri ve ekonomik kısıtlar doğrultusunda belirlenmelidir.

Bu tez çalışmasında ise, literatürde önerilen mekanik ve kimyasal yöntemlerden farklı olarak, GKA agregalarının yüzey özelliklerini iyileştirmek amacıyla soğuk bağlama yöntemiyle likit asfalt yüzey bağlayıcısı ve çimento esaslı bulamaç kullanılarak çok katmanlı kaplama işlemi uygulanmıştır. Deneysel çalışmada, kaplanmamış GKA agregalarının yanı sıra üç farklı kaplama kalınlığına sahip modifiye edilmiş GKA agregaları beton karışımlarında %100 oranında kullanılmıştır. Hazırlanan numuneler üzerinde basınç dayanımı, eğilme dayanımı ve yarmada çekme dayanımı gibi temel mekanik özellikler incelenmiştir. Bu çalışmanın temel amacı, yüzey modifikasyonu uygulanmış GKA agregalarının beton içerisindeki performansını ortaya koymak ve bu tür malzemelerin konvansiyonel betonlara kıyasla sağlayabileceği potansiyel avantajları belirlemektir. Böylece hem doğal kaynak tüketiminin azaltılması hem de altyapı projelerinde çevreye duyarlı, ekonomik ve sürdürülebilir çözümlerin geliştirilmesine katkı sunulması hedeflenmektedir.

2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

GKA agregalarının tanımı, ortaya çıkışı, sürdürülebilir malzeme olarak kullanılması, inşaat faaliyetlerinde kullanılarak çevresel etkilerin en aza indirilmesi ve artan yapı maliyetlerinin azaltılması konusunda ulusal ve uluslararası ölçekte yapılan araştırmaların taraması yapılmıştır. GKA agregalarının beton uygulamalarda kullanılması konusu dikkate alınarak, GKA agregalarının betonun mekanik özelliklerine etkisi irdelenmiştir. Literatür araştırması; GKA agregalarının inşaat uygulamalarında kullanılmasına yönelik kullanım amacını, kullanım yerlerini ve beton uygulamaların mekanik özelliklerine etkilerinin irdelendiği bölümlerden oluşmaktadır.

2.1 GKA Agregalarının Tanımı ve Özellikleri

2.1.1 GKA Agregalarının Oluşum Süreci

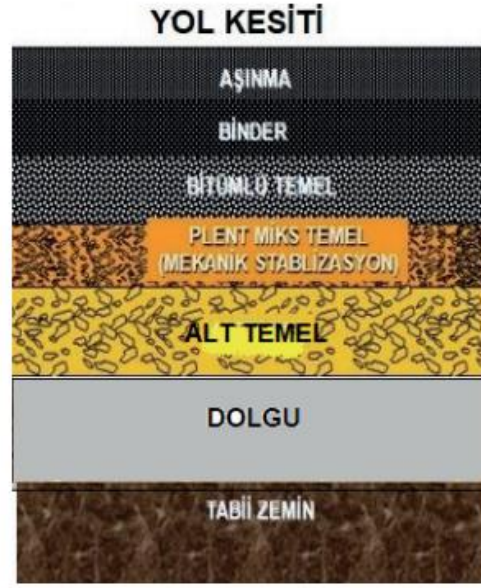
Karayolu altyapılarında kullanılan asfalt kaplamalar, trafik yükleri, iklimsel etkiler, donma-çözülme döngüleri ve çevresel aşınmalar sonucunda zamanla bozulmaya uğramaktadır. Bu bozulmalar yüzeyde çatlak, tekerlek izi, soyulma ve yapısal deformasyonlar şeklinde ortaya çıkar. Belirli bir hizmet ömrünü dolduran asfalt kaplamaların güvenli ve sürdürülebilir biçimde kullanılmaya devam edebilmesi için rehabilitasyon ve bakım faaliyetleri zorunludur. İşte GKA agregası tam da bu sürecin bir yan ürünü olarak ortaya çıkar. Karayolu üstyapılarında farklı tabakalarda kullanılan asfalt karışımlarıyla ilgili araştırmalar ve geliştirme çalışmaları, günümüzde hâlâ önemini korumaktadır. Son yıllarda dünyanın karşı karşıya kaldığı çevresel ve ekonomik sorunlar, karayolu teknolojilerine ve asfalt karışımlarına yönelik bakış açısını önemli ölçüde değiştirmiştir. Bu bağlamda, özellikle sürdürülebilirlik odaklı yaklaşımlar yol mühendisliği alanında giderek daha fazla ön plana çıkmaktadır (Temren, 2013).

Küresel ısınma, iklim değişikliği, hammadde kaynaklarının sınırlılığı, doğal çevrenin tahribatı, artan enerji maliyetleri ve çevresel çıktıların ekonomik yükü, bu eğilimi zorunlu kılan temel unsurlar arasında yer almaktadır. Bu nedenle, asfalt

kaplamaların geri dönüşümü ve yeniden kullanımı artık vazgeçilmez bir konu haline gelmiştir. Nitekim, gerek soğuk geri dönüşüm yöntemleri (Soliman ve Eckmann, 2009; Sağlık ve ark., 2013; Tutan ve ark., 2021) gerekse sıcak geri dönüşüm teknikleri, ömrünü tamamlamış asfalt kaplamalardan elde edilen malzemelerin yeniden değerlendirilmesine olanak tanımaktadır. Bu yaklaşım hem doğal kaynakların korunmasına hem de çevresel etkilerin azaltılmasına katkı sağlamaktadır. Türkiye’de de kazınmış asfalt kaplamaların yeni karışımlarda kullanılmasına yönelik uygulamalar ve mevzuat çalışmaları giderek artış göstermektedir (Gencer ve Kunduracıoğlu, 2009).

GKA, mevcut asfalt kaplamanın freze makineleri ile kazınması, kırıcılar yardımıyla parçalanması ve daha sonra uygun boyutlara indirgenerek stok alanlarına taşınmasıyla elde edilir. Bu süreç yalnızca malzemenin fiziksel ayrıştırılmasını değil, aynı zamanda kaplamadaki eski bitüm bağlayıcı ile mineral agregaların birbirinden ayrılmasını da içerir. Böylece GKA, bünyesinde hem doğal agregaları hem de ince bir asfalt film tabakasını barındıran, heterojen yapıları bir malzeme olarak ortaya çıkar. Avrupa Asfalt Üstyapı Birliği’nin (EAPA) yayımladığı istatistiklere göre, son on yıl dikkate alındığında Türkiye’de her yıl ortalama 37,4 milyon ton asfalt üretimi gerçekleştirilmektedir (EAPA, 2021). İstanbul özelinde ise yıllık üretim miktarı yaklaşık 3 milyon ton civarındadır.

2020 yılı verilerine göre, ülkemizde üretilen 31,7 milyon ton asfaltın %32’si aşınma (yüzey) tabakası, %41’i binder tabakası ve %27’si bitümlü temel tabakasından oluşmaktadır (EAPA, 2020). EAPA, 2021 yılı verilerine göre toplam asfalt üretimi 30,3 milyon ton olarak gerçekleşmiş ve bu üretimin tabakalara göre dağılımı sırasıyla %43 aşınma, %37 binder ve %20 bitümlü temel tabakası şeklinde rapor edilmiştir (Şekil 1.1).



Şekil 1.1. Yol kesiti

Avrupa ölçeğinde bakıldığında, Türkiye 2020 yılında asfalt üretim miktarları açısından Almanya ve Fransa'nın ardından üçüncü sırada yer almıştır. Ancak 2021 yılı itibarıyla, İtalya'nın Türkiye'nin önüne geçmesiyle ülkemiz dördüncü sırada konumlanmıştır. Buna karşın, asfaltta geri dönüşüm oranları dikkate alındığında Türkiye'nin Avrupa'daki konumu üretim kapasitesine kıyasla oldukça geridedir. Bu durum, ülkemizde asfalt geri dönüşümünün yaygınlaştırılması ve daha sistematik politikalarla desteklenmesi gerektiğini ortaya koymaktadır.

Oluşum sürecinde en kritik aşama, yoldan sıyrılan kaplamanın işlenmesi ve uygun dane boyutuna getirilmesidir. Bu amaçla GKA parçacıkları kırıcılar kullanılarak iri ve ince fraksiyonlara dönüştürülür. İri GKA agregaları genellikle beton veya bitümlü sıcak karışımlarda iri agregaya yerine kullanılabilirken, ince GKA agregaları ise çimento esaslı matrislerde bağlanma zorlukları ve su emme sorunları yaratabileceğinden dolayı tercih edilmez. Bu nedenle laboratuvar deneyleri, çoğu kez GKA agregasının %30–50 oranlarında optimum performans gösterdiğini ortaya koymuştur (Arapoğlu, 2015).

Konu ile ilgili daha önce yapılan çalışmalar değerlendirildiğinde; geri dönüşüm, atıkların değerlendirilmesi, yapı maliyetlerin azaltılması gibi konularda GKA agregasının kullanılmasına yönelik olumlu sonuçlara varılmıştır. Ancak yapıların mekanik özelliklerine olumsuz etkilerinin de olduğu önceki çalışmalardan

çıkarılabilmektedir. Yerel bir çalışmada asfalt geri dönüşümüyle milli kaynakların korunacağı, yeni malzeme ihtiyacının azalacağı, atık sahalarının oluşmayacağı ve böylelikle asfalt içeriğindeki petrolün yeraltı sularına daha az etkisi olacağı, tüm bu sebeplerden geri dönüşüm bilinci ve sisteminin mutlaka şart olması gerektiği vurgulanmıştır. (Arapoğlu, 2015)

GKA agregaların, çimento esaslı karışımlarda eğilme ve basınç dayanımı gibi önemli özelliklerde azalmaya neden olmasıyla birlikte belli standartta beton üretiminde alternatif olabilecek bir malzeme olduğu sonucuna varılmıştır. Ancak çimento harcına katılabilecek GKA agregasının optimum oranının belirlenmesi; sürdürülebilir, daha ekonomik ve daha çevreci yapıların inşa edilmesine olanak sağlayacağı düşüncesine varılmıştır (Gündoğdu, 2023).

GKA'nın oluşum süreci yalnızca teknik bir işlem değil, aynı zamanda çevresel sürdürülebilirlik açısından da kritik bir halkadır. Eğer bu malzeme yeniden kullanılmazsa, büyük miktarda depolama alanı işgal eder ve atık yönetimi sorunlarına yol açar. Buna karşılık, yeniden kazanım sayesinde hem doğal agrega tüketimi hem de sera gazı emisyonları ciddi ölçüde azaltılmaktadır. Bu bağlamda GKA agregası, döngüsel ekonomi yaklaşımının karayolu sektöründeki en somut uygulamalarından biri olarak değerlendirilebilir.



Şekil 1. 2. GKA agregası

2.1.2. Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri

GKA agregaları, doğal agregalardan farklı olarak mineral tanelerin yüzeyinde yaşlanmış bir bitüm tabakası bulundurur. Bu nedenle hem fiziksel hem de kimyasal özellikleri bakımından özgün bir yapı sergiler. Literatürde (örn. Debbarma ve ark., 2020; Selvam ve ark., 2022) GKA agregasının en belirgin fiziksel özelliğinin doğal

agregalara kıyasla daha düşük özgül ağırlığa sahip olması olduğu vurgulanmaktadır. 2,26–2,63 aralığında değişen bu değer, mineral agregaların bağlayıcıyla uzun süreli etkileşimi sonucu gözeneklilikte meydana gelen artışla ilişkilidir. Bu durum, karışımların hacimsel parametrelerini etkileyerek optimum tasarımın daha dikkatli yapılmasını gerektirir.

Su emme kapasitesi GKA agregalarının değişkenlik gösteren diğer bir özelliğidir. Bazı araştırmalar (Courard ve ark., 2010; Boussetta ve ark., 2020) bitümlü film tabakasının hidrofobik karakteri nedeniyle GKA agregasının daha düşük su emme gösterdiğini rapor ederken, başka çalışmalar (Debbarma ve ark., 2019; Settari ve ark., 2015) özellikle ince fraksiyonların daha gözenekli yapısı nedeniyle yüksek emme oranları sergilediğini ortaya koymuştur. Bu farklılık, GKA agregasının elde edildiği kaplamanın mineralojisine, üretim yöntemine ve kullanılan geri dönüşüm teknolojisine bağlıdır.

Mekanik açıdan, GKA agregaları çoğunlukla düşük aderans kapasitesi nedeniyle doğal agregalara göre daha zayıf bir bağlanma direncine sahiptir. Brand ve Roesler'in (2017a, 2017b) çalışmalarında gösterildiği üzere, çimento hamuru ile GKA agregası yüzeyi arasındaki ince asfalt filmi, zayıf bir geçiş bölgesi oluşturarak mukavemet kayıplarına yol açmaktadır. Bu nedenle basınç ve çekme dayanımları genellikle %10–30 oranında düşüş gösterebilir (Huang ve ark., 2006). Bununla birlikte, bazı araştırmalar (Singh ve ark., 2018; Abraham ve Ransinchung, 2018) GKA agregasının karışımlara belirli oranlarda dahil edilmesinin işlenebilirlik ve tokluk gibi özellikleri olumlu yönde etkilediğini de ortaya koymuştur.

Kimyasal açıdan GKA, esasen mineral agregalar ve oksidasyona uğramış bitüm bağlayıcının birleşiminden oluşur. Yaşlanma süreci, bağlayıcıda oksidatif sertleşmeye neden olur; karbonil ve sülfoksit gruplarının artışıyla viskozite yükselir ve bağlayıcı gevrekleşir (Huang ve ark., 2005). Bu durum, agregaların yeniden kullanıldığında çimento matrisine zayıf bağlanmasına yol açar. Aynı zamanda, mineral bileşimin farklılığı (örneğin kireçtaşı esaslı agregalar ile silisli agregalar arasındaki fark) GKA agregasının kimyasal tepkiselliğini ve dayanıklılık performansını doğrudan etkiler. Bu nedenle, GKA agregasının kullanılacağı ortama

uygunluğunu belirlemek için hem mineralojik hem de kimyasal analizlerin yapılmasının önemini vurgulanmaktadır (Al-Oraimi ve ark. 2009).

Sonuç olarak, GKA agregalarının fiziksel ve kimyasal özellikleri yüksek düzeyde heterojen ve kaynağa bağlı değişkenlik göstermektedir. Düşük özgül ağırlık, su emme oranındaki farklılıklar ve bağlayıcı film tabakasının varlığı, mekanik performansı sınırlayıcı unsurlar olarak öne çıkarken; işlenebilirlik artışı, geri dönüşüm kapasitesi ve sürdürülebilirlik katkıları GKA agregasını modern beton ve asfalt karışımlarında değerli bir alternatif malzeme haline getirmektedir. Başarılı bir kullanım için, bu özelliklerin ayrıntılı şekilde karakterize edilmesi ve karışım tasarımlarında optimum oranların belirlenmesi kritik önem taşımaktadır.

2.1.3. Doğal Agregalara Kıyasla Farklılıkları

Şekil 3'te görüldüğü üzere, GKA agregalarının özgül ağırlığı doğal agregalardan daha düşük olup (2,26–2,63), bu durum kaplamadaki yaşlanmış bitüm tabakasının ve gözeneklilik artışının bir sonucudur (Debbarma ve ark., 2020; Selvam ve ark., 2022). Su emme kapasitesi, kaynak ve işlem yöntemine bağlı olarak değişkenlik gösterir; bazı çalışmalarda hidrofobik film nedeniyle düşük bulunurken (Courard ve ark., 2010; Boussetta ve ark., 2020), başka araştırmalarda ince fraksiyonların gözenekliliği nedeniyle yüksek emme oranları rapor edilmiştir (Debbarma ve ark., 2019; Settari ve ark., 2015).

Çizelge 2. 1. GKA agregalarının özelliklerinin doğal agregalarla kıyaslanması

Özellik	RAP Agregası	Doğal Agregası
Özgül Ağırlık	2,26–2,63 (doğal agregadan daha düşük)	2,6–2,8
Su Emme Kapasitesi	Kaynağa bağlı değişken; bazı çalışmalarda düşük, bazılarında yüksek	Düşük ve kararlı
Gözeneklilik	Genellikle daha yüksek gözeneklilik	Genellikle daha düşük
Mekanik Dayanım	Doğal agregaya göre %10–30 daha düşük	Yüksek dayanım kapasitesi
Aderans (Çimento ile Bağlanma)	Asfalt film tabakası nedeniyle zayıf ITZ ve düşük aderans	Güçlü bağlanma, iyi ITZ
Yüzey Yapısı	Yüzeyinde bitüm filmi mevcut	Mineral yüzey; film tabakası yok
Kimyasal Özellikler	Oksidasyon sonucu artmış karbonil ve sülfoksit grupları; gevrekleşmiş bağlayıcı	Kimyasal olarak stabil; oksidasyon etkisi yok
Tokluk ve İşlenebilirlik	Belirli oranlarda işlenebilirliği ve tokluğu artırabilir	Tokluk katkısı sınırlı

Mekanik açıdan, GKA agregaları doğal agregalara kıyasla %10–30 daha düşük dayanım göstermektedir (Huang ve ark., 2006). Bunun temel nedeni, yüzeydeki asfalt filminin çimento matrisi ile güçlü bir bağ kurmasını engelleyerek

zayıf bir geçiş bölgesi oluşturmaktadır (Brand ve Roesler, 2017a, 2017b). Ancak bu dezavantaj, belirli oranlarda GKA agregası kullanımının işlenebilirliği ve tokluğu artırmasıyla kısmen dengelenebilir (Singh ve ark., 2018; Abraham ve Ransinchung, 2018).

Kimyasal olarak GKA agregası, bitümün yaşlanma süreci boyunca oksidasyona uğraması nedeniyle karbonil ve sülfoksit gruplarının artışı ile karakterize edilir; bu değişim bağlayıcının sertleşmesine ve gevrekleşmesine yol açar (Huang ve ark., 2005). Buna karşılık doğal agregalar kimyasal olarak daha stabildir ve oksidatif etkilerden bağımsızdır. GKA agregalarının fiziksel ve kimyasal özellikleri, onları hem sınırlayıcı hem de avantajlı kılan bir ikili yapıya sahiptir; mekanik mukavemet açısından dezavantajlı, ancak sürdürülebilirlik ve işlenebilirlik açısından avantajlıdır. Bu nedenle optimum kullanım, detaylı karakterizasyon ve uygun karışım tasarımı ile mümkündür.

2.2. Sürdürülebilir Malzeme Olarak GKA Agregası

Çeşitli sebeplerle ömrünü tamamlamadan bozulan ya da altyapı çalışmaları nedeniyle kaldırılmak zorunda kalan asfalt kaplamaların yeniden değerlendirilmeyip atık olarak kalması, hem doğal kaynakların tükenmesi riskini artırmakta hem de çevresel sorunları derinleştirmektedir (Gencer ve Kunduracıoğlu, 2009; Temren, 2013; Yıldırım, 2019). Asfalt karışımlarının ve betonun en büyük hacmini oluşturan agrega, inşaat sektörünün temel hammaddelerinden biri konumundadır. Nüfus artışıyla birlikte konut talebinin sürekli yükselmesi, plansız kentleşme ve yoğun yapılaşma eğilimleri, agrega ihtiyacını her geçen gün daha da artırmaktadır. Öte yandan, hava, su ve toprak gibi doğal yaşam unsurlarının kirlenmesi tüm canlıların yaşam kalitesini olumsuz etkilemekte; bu nedenle, GKA agregalarının yeniden kullanımı hem doğal kaynakların korunması hem de çevresel yüklerin azaltılması açısından stratejik bir önem taşımaktadır.

GKA agregaları, karayolu sektöründe sürdürülebilir malzeme kullanımının en önemli örneklerinden biridir. GKA agregalarının yeniden değerlendirilmesi, doğal agrega tüketimini azaltarak kaynakların korunmasına katkı sağlar. Aynı zamanda, depolama alanlarında birikecek atık miktarını düşürerek çevresel yükü hafifletir.

Enerji ve karbon ayak izi açısından bakıldığında, GKA agregasının geri dönüşümü üretim sürecinde daha düşük enerji tüketimi ve daha az sera gazı emisyonu ile sonuçlanır. Bu nedenle GKA agregası, döngüsel ekonomi yaklaşımının karayolu mühendisliğindeki en somut uygulamalarından biri olarak kabul edilmektedir.

Ayrıca, uygun oranlarda kullanıldığında, GKA agregası içeren beton ve asfalt karışımları hem ekonomik açıdan maliyet avantajı sağlar hem de teknik performans açısından kabul edilebilir dayanım ve dayanıklılık seviyelerini koruyabilir. Bu özellikleriyle GKA agregası hem çevresel hem de ekonomik boyutlarıyla sürdürülebilir inşaat malzemesi niteliği taşımaktadır.

2.2.1. Doğal Kaynak Tüketiminin Azaltılması

Geri kazanılmış asfalt agregalarının sistematik biçimde yeniden kullanımı, yol mühendisliğinde birincil (işlenmemiş) agrega talebini doğrudan düşürerek doğal kaynakların korunmasına hizmet eder. Bakım-rehabilitasyon döngüsünde frezelenen kaplamanın fraksiyonlayıp karakterize edilerek asfalt ya da çimento esaslı karışımlara geri beslenmesi, hem yeni agrega çıkarımı ve uzun mesafeli taşımayı azaltır hem de depolama sahalarındaki baskıyı hafifletir; bu zincirleme etki enerji tüketimi ve sera gazı salımlarında da anlamlı düşüşler yaratır (Chan ve ark., 2011; EAPA, 2022; Piao ve ark., 2021). Birçok çalışma, uygun fraksiyon ve oranlarda GKA agregası ikamesinin performans hedefleri korunurken birincil malzeme kullanımını azalttığını; böylece döngüsel ekonomi ilkeleriyle uyumlu bir malzeme akışı sağlandığını göstermektedir (Selvam ve ark., 2022; Debbarma ve Ransinchung, 2021; Shi ve ark., 2018). Bu yaklaşım, özellikle büyük metropollerde hızla artan inşaat faaliyetleri dikkate alındığında, doğal agrega rezervlerinin sürdürülebilir yönetimi açısından stratejik önem taşımaktadır (Kumari ve ark., 2018; Singh ve Ransinchung, 2020).

2.2.2. Karbon Ayak İzi ve Çevresel Etkiler

Geri kazanılmış asfalt agregalarının yeniden kullanımının en önemli çevresel katkılarından biri, yol yapım ve bakım süreçlerinde ortaya çıkan karbon ayak izini

azaltma potansiyelidir. Geleneksel yöntemlerde büyük miktarda doğal agrega çıkarımı, taşınması ve işlenmesi yüksek enerji gerektirmekte; bu süreçler doğrudan sera gazı emisyonlarını artırmaktadır. Buna karşılık, mevcut kaplamaların frezelenerek yeniden kullanılması, birincil malzeme ihtiyacını düşürdüğü için hem enerji tüketimini hem de CO₂ salınımlarını ciddi oranda azaltmaktadır (Chan ve ark., 2011; EAPA, 2022; Shi ve ark., 2019).

Çalışmalar, GKA agrega kullanım oranı arttıkça çevresel yüklerin orantısal olarak azaldığını göstermektedir. Örneğin, Shi ve ark. (2018) yaptıkları çalışmada yaşam döngüsü analizine göre, karışımlarda %30 GKA agregası ikamesi doğal agregaya dayalı karışımlara kıyasla yaklaşık %15–20 oranında sera gazı emisyonu tasarrufu sağlayabilmektedir. Benzer şekilde Piao ve ark. (2021), GKA agregasının “urban mining” yaklaşımıyla değerlendirilmesinin sadece karbon emisyonlarını değil, aynı zamanda atık depolama sahalarındaki baskıyı da düşürdüğünü vurgulamıştır.

Çevresel etkiler yalnızca karbon ayak iziyle sınırlı değildir. GKA agregası kullanımının artması, doğal taş ocaklarının üzerindeki baskıyı azaltarak ekosistem tahribatını sınırlamakta, ayrıca malzemenin taşınması için gerekli lojistik süreçlerde yakıt tüketimini minimize etmektedir (Selvam ve ark., 2022). Bu sayede, enerji verimliliği ile kaynak korunumu arasında doğrudan bir ilişki kurulabilmektedir. Bununla birlikte, GKA agregasının çevresel avantajlarının mutlak olmadığını, kullanılan teknoloji ve oranlara göre değişebileceğini de belirtmek gerekir. Örneğin yüksek GKA agregası kullanılan karışımlarda, bağlayıcının yeniden işlenmesi için ek enerji girdisi gerekebilir; bu durum, toplam emisyon tasarrufunu kısmen azaltabilir (Debbarma ve Ransinchung, 2021). Dolayısıyla çevresel kazançların net hesaplanabilmesi için yaşam döngüsü değerlendirmesi yöntemlerinin uygulanması kritik öneme sahiptir.

GKA agregası kullanımının karbon ayak izini azaltıcı etkisi literatür çalışmalarında güçlü biçimde desteklenmektedir. Ancak gerçek faydalar, malzeme oranı, işleme yöntemi, taşıma mesafeleri ve bağlayıcı teknolojileri gibi faktörlerin dikkate alındığı bütüncül bir analizle değerlendirildiğinde anlam kazanmaktadır. Bu yönüyle GKA agregası, çevresel sürdürülebilirlik hedefleriyle uyumlu, ancak

optimizasyon gerektiren bir stratejik malzeme konumundadır. Shi ve ark., 2018; Piao ve ark., 2021; Selvam ve ark., 2022; Debbarma ve Ransinchung, 2021 çalışmalarından elde edilen veriler ışığında, GKA agregası ikame oranlarına göre çevre etki değerlendirmeleri Çizelge 2.2’de özetlenmiştir.

Çizelge 2. 2. GKA kullanım oranlarına çevresel etki değerlendirmesi

RAP Kullanım Oranı	Doğal Agregat İhtiyacı	CO ₂ Emisyonu (yaklaşık)	Çevresel Etki
%0 (kontrol)	Yüksek	Referans seviye	Yüksek karbon ayak izi
%20	%20 daha az	%10–12 azalma	Kısmi tasarruf
%30	%30 daha az	%15–20 azalma	Belirgin düşüş
%50	%50 daha az	%25+ azalma	Yüksek tasarruf, fakat bağlayıcı enerjisi artabilir

2.2.3. Döngüsel Ekonomi Kapsamında Değerlendirilmesi

Döngüsel ekonomi yaklaşımı, kaynakların tüketilmek yerine yeniden kazanılmasını ve malzeme döngülerinin mümkün olduğunca kapatılmasını hedefleyen bir paradigma olarak tanımlanmaktadır. Bu bağlamda geri kazanılmış asfalt agregaları, yol mühendisliği sektöründe döngüsel ekonominin en somut örneklerinden birini oluşturmaktadır. Geleneksel doğrusal modelde yol kaplamaları ömrünü tamamladıktan sonra atık haline gelirken, döngüsel modelde bu malzeme yeniden işlenip farklı oranlarda yeni asfalt veya beton karışımlarına dahil edilmektedir (Selvam ve ark., 2022; Piao ve ark., 2021).

Avrupa Asfalt Birliği’nin (EAPA, 2022) verilerine göre, kıta genelinde yıllık yaklaşık 50 milyon ton GKA agregası üretilmekte ve bunun %65–75’i yeniden asfalt karışımlarında değerlendirilmektedir. Bu oran, doğal agregat tüketiminde önemli bir azalmayı beraberinde getirirken, aynı zamanda depolama sahalarına yönlendirilen atık miktarını da ciddi ölçüde düşürmektedir. Türkiye’de ise GKA agregası %80’in üzerinde farklı mühendislik uygulamalarında yeniden kullanılması, döngüsel ekonominin pratikte ne denli kritik olduğunu göstermektedir.

Literatürde yapılan yaşam döngüsü analizleri, GKA agregası kullanımının yalnızca ekonomik maliyetleri düşürmediğini, aynı zamanda enerji verimliliğini artırarak karbon emisyonlarını da azaltabildiğini ortaya koymaktadır (Shi ve ark., 2018; Debbarma ve Ransinchung, 2021). Örneğin, %30 oranında GKA agregası ikamesi ile üretilen karışımların, hem maliyet hem de çevresel performans açısından konvansiyonel karışımlara kıyasla daha avantajlı olduğu rapor edilmiştir (Huang ve ark., 2006; Singh ve Ransinchung, 2020).

Bu açıdan GKA agregası, döngüsel ekonomi içinde yalnızca bir atık yönetim stratejisi değil, aynı zamanda kaynak verimliliği, çevresel sürdürülebilirlik ve ekonomik kazanımlar arasında köprü kuran stratejik bir malzeme olarak öne çıkmaktadır (Çizelge 2.3). Ancak, bu potansiyelin etkin şekilde gerçekleşebilmesi için geri dönüşüm teknolojilerinin geliştirilmesi, kalite kontrol standartlarının netleştirilmesi ve ulusal düzeyde mevzuatların güçlendirilmesi gerekmektedir.

Çizelge 2. 3. GKA agregalarının döngüsel ekonomi kapsamında değerlendirilmesi

Boyut	Geleneksel Doğrusal Model	Döngüsel Ekonomi (RAP Kullanımı)
Kaynak Yönetimi	Doğal agrega çıkarımı ve yüksek tüketim	Doğal kaynak talebinde azalma
Atık Yönetimi	Kaplama ömrü sonunda depolama veya bertaraf	Yeniden kullanım, kapalı döngü yaklaşımı
Enerji Tüketimi	Yüksek üretim ve nakliye enerjisi	Daha düşük enerji ihtiyacı
Karbon Emisyonu	Yüksek sera gazı salımı	Daha düşük karbon ayak izi
Ekonomik Etki	Sürekli yeni malzeme üretim maliyetleri	Daha düşük maliyet, uzun vadeli ekonomik kazanç

2.3. GKA Agregalarının İnşaat Uygulamalarındaki Kullanım Alanları

2.3.1. Yol Üstyapılarında Kullanımı

Geri kazanılmış asfalt agregalarının en yaygın kullanım alanı, yol üstyapılarının farklı tabakalarında ikame malzeme olarak değerlendirilmesidir. Özellikle kaplama tabakalarının üretiminde GKA agregasının asfalt bağlayıcı ve

mineral agregalarla birlikte yeniden işlenmesi, doğal kaynakların korunmasına ve üretim maliyetlerinin düşürülmesine olanak tanımaktadır (EAPA, 2022; Selvam ve ark., 2022). Modern karayolu mühendisliği uygulamalarında GKA agregası, hem esnek kaplamaların aşınma ve binder (Bağlayıcı tabaka) tabakalarında hem de temel tabakaların granüler dolgularında kullanılabilir.

GKA agregaları kullanımının en kritik avantajlarından biri, bitümlü bağlayıcının geri kazanımıdır. Bu sayede karışıma dahil edilen GKA agregaları, sadece agrega ikamesi sağlamakla kalmaz; aynı zamanda yeni bağlayıcı ihtiyacını da kısmen azaltır. Shi ve ark. (2019) ile Debbarma ve Ransinchung (2021) tarafından yapılan yaşam döngüsü analizleri, %20–30 GKA ikamesiyle üretilen asfalt kaplamaların hem çevresel hem de ekonomik performans açısından konvansiyonel karışımlara kıyasla daha avantajlı olduğunu göstermiştir.

Bununla birlikte, yüksek GKA agregası içerikli karışımların kullanımı bazı teknik sınırlılıklar barındırmaktadır. GKA agregası yüzeyindeki yaşlanmış bitüm tabakası, yeni bağlayıcı ile uyum sorunlarına yol açabilmekte; bu da aderans zayıflığı ve dayanıklılık problemlerini ortaya çıkarmaktadır. (Huang ve ark., 2006; Brand ve Roesler, 2017). Bu nedenle birçok ülke standartlarında, yüzey kaplamalarında GKA agregası kullanım oranı genellikle %30–40 ile sınırlandırılmaktadır. Ancak, sıcak karışım geri dönüşüm teknolojilerindeki gelişmeler sayesinde bu oranların aşamalı olarak artırılması mümkün hale gelmiştir (Piao ve ark., 2021).

Ayrıca, GKA agregasının yol üstyapılarında yalnızca kaplama tabakasında değil, aynı zamanda alt temel ve temel tabakalarında da başarıyla kullanılabileceği deneysel çalışmalarla gösterilmiştir (Kumari ve ark., 2018; Singh ve Ransinchung, 2020). Bu uygulamalarda GKA agregası, granüler dolgu gibi davranarak taşıyıcı tabakanın rijitliğini ve dayanıklılığını desteklemektedir. Böylelikle GKA agregası, yol yapımında çok katmanlı bir sürdürülebilirlik katkısı sunmaktadır. Bu katkılar; doğal agrega kullanımının azaltılması, enerji tasarrufu, karbon ayak izinin düşürülmesi ve atık yönetimi şeklinde sıralanabilir.

2.3.2. Dolgu ve Altyapı Uygulamaları

Geri kazanılmış asfalt agregaları, yalnızca yol üstyapılarında değil, aynı zamanda dolgu ve altyapı uygulamalarında da etkin biçimde değerlendirilmektedir. Özellikle yol ve demiryolu dolguları, drenaj tabakaları, şev dolgu malzemeleri ve geçici altyapı uygulamalarında GKA agregası kullanımı, doğal granüler malzeme tüketimini azaltması ve maliyet avantajı sağlaması nedeniyle tercih edilmektedir (Kumari ve ark., 2018; Singh ve Ransinchung, 2020).

GKA agregasının dolgu malzemesi olarak en önemli avantajı, yüksek rijitlik ve düşük deformasyon potansiyeli sunmasıdır. Bu özellik, taşıyıcı taban dolgularında ve yol altı destek tabakalarında güvenilir bir performans sağlamaktadır (Debbarma ve Ransinchung, 2021; Selvam ve ark., 2022).

Örneğin, ABD’de yapılan saha uygulamalarında %50’nin üzerinde GKA içeren dolguların geleneksel kırmataş dolgularla kıyaslanabilir mukavemet ve rijitlik sergilediği rapor edilmiştir (FHWA, 2011). Avrupa’da ise GKA agregası, genellikle altyapı drenaj tabakalarında kullanılarak hem mekanik dayanım hem de geçirgenlik avantajı sunmaktadır (EAPA, 2022).

Bununla birlikte, GKA agregasının altyapı uygulamalarında bazı sınırlılıkları bulunmaktadır. Özellikle su emme kapasitesi yüksek fraksiyonların kullanıldığı karışımlarda, uzun vadeli durabilite sorunları ve donma-çözülme etkilerine karşı hassasiyet gözlenebilmektedir (Settari ve ark., 2015; Courard ve ark., 2010). Ayrıca yüzeyindeki yaşlanmış bitüm filmi, bazı durumlarda drenaj performansını olumsuz etkileyebilmekte; bu nedenle malzeme seçimi yapılırken GKA agregasının mineralojik ve fiziksel özelliklerinin ayrıntılı karakterizasyonu gerekmektedir (Modarres ve Hosseini, 2014). Aşağıdaki GKA agregasının kullanım alanlarına göre avantaj ve dezavantajları Çizelge 2.4’te sunulmuştur.

Çizelge 2. 4. GKA uygulama alanlarındaki avantajları ve sınırlılıkları

Uygulama Alanı	RAP Kullanım Oranı (Tipik)	Avantajlar	Sınırlılıklar
Yol/Demiryolu Dolgusu	%30–60	Yüksek rijitlik, maliyet avantajı	Su emme potansiyeli
Drenaj Tabakaları	%20–40	İyi drenaj, kaynak tasarrufu	Bitüm filmi nedeniyle geçirgenlikte azalma
Şev Dolguları	%40+	Geri dönüşüm katkısı, atık azaltımı	Donma-çözülme hassasiyeti
Geçici Altyapılar	%50+	Hızlı ve düşük maliyetli uygulama	Uzun dönem performans belirsizliği

2.3.3. Beton ve Harç Üretiminde Kullanımı

Geri kazanılmış asfalt agregalarının beton ve harç sistemlerine entegrasyonu, sürdürülebilir malzeme yönetiminin yol mühendisliği dışındaki önemli uzantılarından biridir. GKA agrega parçacıkları, yüzeylerinde yaşlanmış bitüm filmi taşıdıkları için doğal agregalardan farklı bir yüzey kimyasına ve ara yüz davranışına sahiptir; bu tabaka, çimento hamuru ile doğrudan teması kısmen engeller ve geçiş bölgesini gözenekli bir yapıya iterek aderansın düşmesine yol açabilir (Brand ve Roesler, 2017a; 2017b). Deneysel çalışmalar, GKA agregası ikamesinin artmasıyla birlikte, basınç/çekme dayanımında genellikle düşüşler görüldüğünü (çoğunlukla %10–30 aralığında; daha yüksek oranlarda daha belirgin) ve bunun ana nedeninin zayıflamış ara yüzey ile heterojen mikro yapı olduğunu belirtmektedir (Huang ve ark., 2006; Abraham ve Ransinchung, 2018a, 2018b; Debbarma ve ark., 2019).

Bununla birlikte, uygun fraksiyon seçimi (özellikle orta dane agregalar) ve yüzey işlemleri ile (yıkama, mekanik aşındırma (AB&AT), çimento şerbeti ya da kireçle ön kaplama) aderans kayıpları belirgin ölçüde azaltılabilmekte; işlenebilirlik ve tokluk nitelikleri iyileştirilebilmektedir (Singh ve ark., 2017; 2019; Al-Oraimi ve ark., 2009). Ayrıca yardımcı bağlayıcılar (silis dumanı, uçucu kül vb.) ara yüzeyi sıkılaştırarak geçirgenliği düşürür ve klorür iyonu geçişi ile donma-çözülme direncinde artış sağlayabilir; her ne kadar mekanik dayanım artışları sınırlı kalsa da, dayanıklılık performansındaki kazanımlar kayda değerdir (Courard ve ark., 2010;

Ben Saïd ve ark., 2017; Erdem ve Blankson, 2014; Modarres ve Hosseini, 2014). Nitekim bazı çalışmalarda %10–20 düzeyinde GKA agregası ikamesiyle, referans karışımlarla kıyaslanabilir basınç dayanımı korunurken, işlenebilirliğin ve enerji yutma kapasitesinin iyileşebildiği gösterilmiştir (Abraham ve Ransinchung, 2018a; Singh ve ark., 2018; Thomas ve ark., 2018).

Malzemenin kimyasal yönü de kritiktir: Bitümlü bağlayıcının oksidatif yaşlanması karbonil ve sülfoksit fonksiyonel gruplarını artırır, viskoziteyi yükseltir ve bağlayıcıyı gevrekleştirir; bu durum çimento hamuru ile kimyasal ile adsorptif etkileşimi zayıflatır (Huang ve ark., 2005). Bu nedenle, karışım tasarımı yapılırken yalnızca dane dağılımı ve su/bağlayıcı oranı değil, aynı zamanda GKA agregasının bitüm içeriği, nem durumu ve mineralojisi de dikkate alınmalıdır (Debbarma ve Ransinchung, 2021).

Uygulamada izlenen iyi pratikler;

- (i) GKA agregasının fraksiyonunun dikkatli seçimi,
- (ii) Yüzey temizliği/ön işlem,
- (iii) SCM ve kimyasal katkı optimizasyonu
- (iv) Hedef performansa göre GKA agrega oranının kademeli olarak artırılması

Şeklinde özetlenebilir. Böylece, doğal agrega tüketimi ve karbon ayak izi anlamlı ölçüde azalırken, yapısal performansın kabul edilebilir sınırlar içinde kalması sağlanır (Selvam ve ark., 2022; EAPA, 2022).

2.4. Beton Uygulamalarında GKA Agregalarının Mekanik Özelliklere Etkisi

2.4.1. Basınç Dayanımı

Geri kazanılmış asfalt agregalarının beton karışımlarında kullanılması, basınç dayanımında genellikle azalmaya yol açmaktadır. Bunun temel sebebi, GKA agregalarının yüzeyinde bulunan yaşlanmış bitüm filminin çimento hamuru ile güçlü aderans geliştirememesi ve daha gözenekli bir geçiş bölgesi oluşturmasıdır (Brand ve Roesler, 2017a; Huang ve ark., 2006). Literatürde, %20–30 oranında GKA agregası

ikamesiyle basınç dayanımında %10–25 arasında düşüşler rapor edilmiştir (Abraham ve Ransinchung, 2018a; Debbarma ve ark., 2019). Bununla birlikte, bazı araştırmalar, düşük oranlı (%10–15) GKA agregası kullanımında dayanım kaybının sınırlı olduğunu ve kabul edilebilir mühendislik seviyelerinde kalabildiğini göstermektedir (Singh ve ark., 2018).

2.4.2. Eğilme Dayanımı

GKA agregalarının kullanımı betonun eğilme dayanımını da etkilemektedir. Eğilme dayanımındaki düşüşler genellikle basınç dayanımına paralel seyretmekte, ancak bazı çalışmalar GKA agregalarının karışıma getirdiği tokluk katkısı sayesinde çatlak ilerlemesini sınırlayabildiğini belirtmiştir (Thomas ve ark., 2018). Singh ve ark. (2017), GKA agregası yüzeylerinin mekanik aşındırma yöntemiyle (AB&AT) temizlenmesi halinde eğilme dayanımında %6–8 oranında artış kaydedildiğini göstermiştir.

2.4.3. Çekme Dayanımı

Yarmada çekme dayanımı sonuçları, GKA agregasının yüzeyindeki zayıf aderans nedeniyle genellikle düşüş eğilimi göstermektedir (Ben Saïd ve ark., 2017). Ancak düşük oranlı GKA agregası ikamesi (%10–20) kullanıldığında bu düşüşler sınırlı kalmakta ve dayanım değerleri yapısal uygulamalar için yeterli seviyede olmaktadır (Abraham ve Ransinchung, 2018b). Ayrıca, mekanik ön işlem görmüş GKA agregaları, doğal agrega ile karşılaştırılabilir çekme dayanımı değerleri sergileyebilmektedir (Singh ve ark., 2017).

2.4.4. Elastisite Modülü

Elastisite modülü, GKA agregalarının düşük rijitliği nedeniyle doğal agregalı betonlara kıyasla daha düşük çıkmaktadır (Huang ve ark., 2005; Courard ve ark., 2010). Bu durum, betonun daha yüksek deformasyon göstermesine neden olmaktadır. GKA agregası ikame oranı arttıkça elastisite modülündeki düşüş belirginleşmektedir. Örneğin, %50 GKA agregası içeren karışımlarda elastisite

modülünde %20–30 seviyesinde azalma rapor edilmiştir (Debbarma ve Ransinchung, 2021).

2.4.5. Dayanıklılık Özellikleri

GKA agregası kullanımının betonun dayanıklılığı üzerindeki etkileri daha karmaşık ve çok boyutludur. Donma-çözülme direnci açısından, düşük ve orta düzey GKA agregası oranlarında (%20–30) dayanıklılığın kabul edilebilir düzeyde korunduğu bildirilmiştir (Debbarma ve ark., 2020). Su emme kapasitesi ise GKA agregası fraksiyonunun özelliklerine bağlı olarak değişmektedir; bazı çalışmalar bitüm filminden dolayı daha düşük su emme rapor ederken (Boussetta ve ark., 2020), diğerleri gözenekli GKA agregası parçacıklarında daha yüksek su emme oranları tespit etmiştir (Settari ve ark., 2015). Aşınma direnci açısından ise GKA agregalarının mekanik olarak daha zayıf yapısı nedeniyle, beton karışımlarında genellikle olumsuz etkiler görülmektedir (Erdem ve Blankson, 2014).

Çizelge 2. 5. GKA agregasının deney sonuçları ve genel eğilimleri

Özellik	RAP Etkisi (Genel Eğilim)	Literatürden Bulgular
Basınç Dayanımı	%10–30 düşüş	Abraham & Ransinchung (2018a); Debbarma et al. (2019)
Eğilme Dayanımı	Düşüş; yüzey işlemi ile iyileşme	Singh et al. (2017); Thomas et al. (2018)
Çekme Dayanımı	Hafif düşüş (özellikle %20+ RAP)	Ben Saïd et al. (2017); Abraham & Ransinchung (2018b)
Elastisite Modülü	Belirgin düşüş	Huang et al. (2005); Debbarma & Ransinchung (2021)
Dayanıklılık	Donma-çözülme: kabul edilebilir; su emme: değişken; aşınma: olumsuz	Debbarma et al. (2020); Settari et al. (2015); Erdem & Blankson (2014)

3. GEREÇ VE YÖNTEM

3.1. Malzemeler

3.1.1. Çimento

Deneyssel çalışmada hem agregâ üretiminde hem de beton numunelerinin hazırlanmasında özgül ağırlığı 3,05 ve Blaine incelik değeri 4500 cm²/g olan Portland Kompoze Çimento (CEM II/A-M (P-LL) 42.5 R) kullanılmıştır. Kullanılan çimentonun kimyasal bileşimi ve ilgili özellikleri Çizelge 3.1’de sunulmuştur.

Çizelge 3. 1. Çimentonun kimyasal analiz sonuçları

Kimyasal Analiz (%)	Değer
Kızdırma Kaybı (%)	4,13
Çözünmeyen Kalıntı (%)	0,32
SiO ₂ (%)	17,64
Al ₂ O ₃ (%)	4,83
Fe ₂ O ₃ (%)	2,89
CaO (%)	61,81
MgO (%)	2,89
SO ₃ (%)	3,2
Na ₂ O (%)	0,13
K ₂ O (%)	0,73
Na(eq) (%)	0,61
Cl (%)	0,0564
Rutubet (%)	0,78

3.1.2. Agregâ

GKA agregaları, Şanlıurfa–Gaziantep otoyol projesi kapsamında yürütülen bakım-onarım çalışmalarından temin edilmiştir. Karışımlarda kullanılan bazalt agregası ise Şanlıurfa bölgesindeki yerel kum ocaklarından elde edilmiştir. GKA agregaları laboratuvar ortamında çeneli kırıcı kullanılarak kırılmış ve istenilen gradasyona göre boyutlandırılmıştır. Deneyssel çalışmada kullanılan GKA agregası Şekil 3.1’de, kullanılan laboratuvar tipi kırıcı ise Şekil 3.2’de sunulmuştur.



Şekil 3.1. Deneysel çalışmalarda kullanılan GKA agregaları



Şekil 3.2. GKA agregasının boyutlandırılmasında kullanılan laboratuvar tipi kırıcı

3.1.2.1. GKA Agregalarının Kaplanması ve Kürlenmesi

GKA agregalarına çimento esaslı bulamaç ile soğuk bağlama yöntemi kullanılarak çok katmanlı kaplama işlemi uygulanmıştır. GKA agregalarının yüzey kaplama işleminde kullanılan peletleme cihazı Şekil 3.3'te görülmektedir. GKA

agregalarının kaplanması aşamasında, peletleme cihazı standart açı ve hız değerlerinde çalıştırılmış olup, üretim sırasında kullanılan malzeme miktarları sabit tutularak üretimde tekrarlanabilirlik ve homojenlik sağlanmıştır. Şekil 3.4'te kaplanmış GKA agregalarının üretim süreci görülmektedir. Farklı fraksiyonlardaki GKA agregaları 3,5 ve 7 kat olacak şekilde çimento bulamacı kullanılarak soğuk bağlama yöntemiyle kaplanmıştır. İlk kaplanan agregalar, 24 saat süreyle membran kürleme işlemine (20 °C sıcaklık ve %70 nem) tabi tutulmuştur. Ardından, agregalar ikinci tabakayı oluşturmak için bir kez daha peletlenmiştir. Peletlenen agregalar ikinci bir membran kürleme işlemine tabi tutulduktan sonra, üçüncü tabakayı oluşturmak için bir kez daha peletlenmiştir. Bu işlem yedinci tabakaya ulaşılan kadar tekrarlanmıştır. Kaplanan GKA agregaların maksimum tane büyüklüğü 16 mm'yi aştığından, kaplama işlemi yedi katman uygulamasının ardından sonlandırılmıştır. Üç, beş ve yedi katmanla kaplanan GKA agregaları, kaplama işlemini takiben 28 gün süreyle membran kürlemeye tabi tutulmuştur. Şekil 3.5'te farklı fraksiyonlarda ve farklı kaplama kalınlıklarına sahip kaplanmış GKA agregaları görülmektedir.



Şekil 3. 3. GKA agregalarının kaplanmasında kullanılan peletleme cihazı



Şekil 3. 4. Yüzeyi kaplanan GKA agregalarının üretim süreci



Şekil 3. 5. Farklı fraksiyonlarda ve farklı kaplama kalınlıklarına sahip GKA agregaları

Üretilen GKA agregalar için TS 3530 EN933-1 standardına uygun olarak tane boyutu dağılımı ve TS EN 1097-6 standardına göre su emme ve özgül ağırlık değerleri belirlenmiştir. Özgül ağırlık ve su emme deneyinden elde edilen sonuçlar Çizelge 3.2’de sunulmuştur.

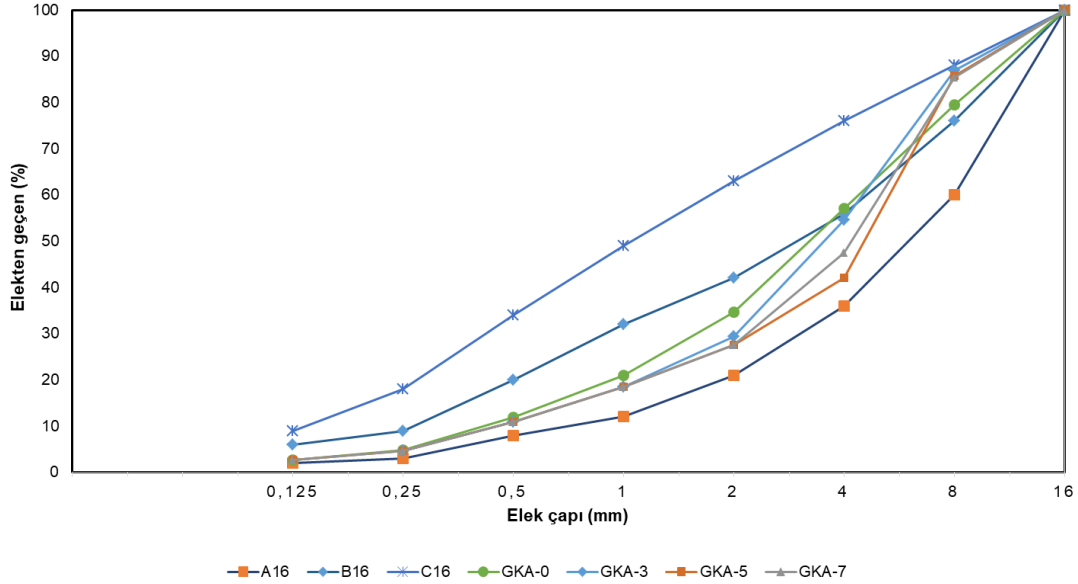
Çizelge 3.2’de görüldüğü üzere, GKA agregalarının özgül ağırlık ve su emme değerleri, kaplama sayısına ve fraksiyonuna bağlı olarak önemli ölçüde değişiklik göstermiştir. Kaplama uygulanmayan GKA agregasının özgül ağırlık değeri 2,52 g/cm³ ve su emme kapasitesi ise %6,43 olarak elde edilmiştir. Kaplama işlemi uygulanan agregalarda ise, özgül ağırlıkta belirgin bir azalma ve su emiliminde önemli bir artış gözlemlenmiştir. 3, 5 ve 7 kat kaplanan GKA agregaları için özgül ağırlık değerleri 2,07–2,24 g/cm³, 1,96–2,03 g/cm³, 1,96–1,97 g/cm³ arasında edilmiş olup, su emme kapasiteleri ise %10,76–17,83, %14,91–18,96, %14,56–18,42 aralığında değişmiştir. Genel olarak, elde edilen sonuçlar kaplama sayısının artırılmasının, özellikle beş katmana kadar, agrega yoğunluğunda belirgin bir azalma ve su emiliminde bir artışa yol açtığını göstermektedir.

Çizelge 3. 2. Çalışmada kullanılan agregaların özgül ağırlık ve su emme değerleri

Agregalar	Özgül Ağırlık (gr./cm ³)	Su Emme Kapasitesi (%)
0-16 mm ham GKA	2,52	6,43
1-4 mm GKA-3 Kat	2,07	17,83
4-8 mm GKA-3 Kat	2,18	12,65
4-16 mm GKA-3 Kat	2,24	10,76
2-8 mm GKA-5 Kat	1,96	18,96
4-16 mm GKA-5 Kat	2,03	14,91
2-8 mm GKA-7 Kat	1,96	18,42
4-16 mm GKA-7 Kat	1,97	14,56

Şekil 3.6’da bu çalışmada kullanılan GKA agrega karışımlarına ait gradasyon eğrileri verilmiştir. Agrega gradasyonunun sınır eğriler içerisinde kalmasını sağlamak amacıyla sabit oranda bazalt kumu kullanılmıştır. Karayolları Genel Müdürlüğü tarafından hazırlanan beton yol kaplamaları teknik şartnamesinde (KGM-ARGE-17-02), beton yollarda en büyük tane büyüklüğü 16 mm olan agregalar için önerilen sınır gradasyon eğrileri de Şekil 3.6’de görülmektedir. Kullanılan GKA

agrega karışımlarına ait gradasyonunun bu sınır eğrileri arasında kaldığı görülmektedir.



Şekil 3. 6. GKA agregalarının gradasyon eğrileri ve sınır değerler

3.1.3. Su

Deneyisel çalışmalarda karma suyu olarak, şebeke suyu kullanılmıştır.

3.1.4. Süper Akışkanlaştırıcı

Karışımlarda hedeflenen kıvam değerini sağlamak için karışıma değişen oranlarda BASF Glenium 51 marka süperakışkanlaştırıcı katkı ilave edilmiştir.

3.2. Beton Karışım Tasarımı

Bu tez çalışmasında üç farklı çimento dozajı ile üç farklı GKA agrega kaplama sayısı dikkate alınarak beton karışımı tasarımı yapılmıştır. Böylece, çimento miktarı ve kaplama sayısının betonun mekanik özellikleri üzerindeki etkileri incelenmiştir. Beton karışım tasarımı Karayolları Genel Müdürlüğü tarafından hazırlanan beton yol kaplamaları teknik şartnamesine (KGM-ARGE-17-02) göre

yapılmıştır. Tüm beton karışımlarında su/çimento oranı 0,45 olarak sabit tutulmuş, hedef çökme (slump) aralığı ise 20-40mm olarak hedeflenmiş ve bu değeri sağlamak için karışımlara değişen oranlarda süperakışkanlaştırıcı katkı ilave edilmiştir. Tüm beton karışımlarında %100 oranında GKA agregaları kullanılmıştır. Çalışmada üretilen beton karışımlarındaki malzeme miktarları Çizelge 3.3'te verilmiştir. Toplamda 12 adet karışım üretilmiş olup taze beton karışımlar üzerinde TS EN 12350-2 standardına göre çökme (Slump) deneyi yapılmıştır (Şekil 3.7).



Şekil 3. 7. Taze beton karışımı üzerinde yapılan çökme deneyi

Çizelge 3. 3. 1 m³ beton için karışım oranları ve elde edilen çökme değerleri

Karışım ID	Kaplama sayısı	s/ç	Çimento (kg)	Su (kg)	SA (kg)	Bazalt kumu (kg)	0-16 mm ham GKA (kg)	1-4 mm GKA-3 (kg)	4-8 mm GKA-3 (kg)	4-16 mm GKA-3 (kg)	2-8 mm GKA-5 (kg)	4-16 mm GKA-5 (kg)	2-8 mm GKA-7 (kg)	4-16 mm GKA-7 (kg)	Slump değeri (cm)
C350GKA-0	0	0,45	350	158	5,4	766	1058								2
C425GKA-0	0	0,45	425	191	2,7	703	970								2,3
C500GKA-0	0	0,45	500	225	0,3	639	883								3,9
C350GKA-3	3	0,45	350	158	7,0	766		249	561	93					2,6
C425GKA-3	3	0,45	425	191	3,5	703		229	514	86					3,1
C500GKA-3	3	0,45	500	225	0,4	639		208	468	78					4
C350GKA-5	5	0,45	350	158	7,0	766					362	477			2,3
C425GKA-5	5	0,45	425	191	3,5	703					332	438			2,9
C500GKA-5	5	0,45	500	225	0,4	639					302	399			3,8
C350GKA-7	7	0,45	350	158	7,0	766							568	256	2,2
C425GKA-7	7	0,45	425	191	3,5	703							521	235	2,8
C500GKA-7	7	0,45	500	225	0,4	639							474	213	3,6

3.3. Numunelerin Hazırlanması

Numuneler üretilirken ilk olarak agregalar ve çimento kuru olarak homojen bir karışım elde edilinceye kadar karıştırılmıştır. Daha sonra karışım suyu ve akışkanlaştırıcı eklenip karıştırılmış ve sump deneyi yapılmıştır. Hazırlanan karışımlar 150x300 mm silindir, 150x150x150 mm küp, 100x100x100 mm küp ve 100x100x400 prizmatik kalıplara vibrasyon uygulanarak yerleştirilmiştir (Şekil 3.8). Üretilen beton numuneler 24 saat sonra kalıptan çıkartılarak Şekil 3.9’da görüldüğü gibi deney gününe kadar numunelere su kürü uygulanmıştır.



Şekil 3. 8. Taze beton numunelerinin kalıplanması işlemi



Şekil 3. 9. Beton numunelerin kür havuzunda bekletilmesi

3.4. Yöntem

Kür havuzunda 28 gün süreyle bekletilen numuneler üzerinde basınç dayanımı, eğilme dayanımı, yarmada çekme dayanımı ve su emme deneyleri ilgili standartlara göre yapılmıştır.

3.4.1. Basınç Dayanımı Deneyi

Basınç dayanımı deneyi 150x150 mm boyutundaki küp beton numunelerinin 28 günlük kür süresinin tamamlanmasının ardından TS EN 12390-3 standardına uygun olarak gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.10). Deney, numunenin basınç dayanım cihazında kırılıncaya kadar yüklenmesi esasına dayanmakta olup, kırılma anında ölçülen maksimum yük değeri kullanılarak basınç dayanımı hesaplanmaktadır. Basınç dayanımı değeri Denklem 3.1 kullanılarak hesaplanmıştır.

$$f_c = \frac{F}{A_c} \quad (3.1)$$

Burada;

f_c : Basınç dayanımı, N/mm^2 (MPa),

F: Kırılma anında ulaşılan en büyük yük, N,

A_c : Numunenin, üzerine basınç yükünün uygulandığı en kesit alanı ,mm²



Şekil 3. 10. Basınç dayanımı deneyi

3.4.2. Eğilme Dayanımı Deneyi

Eğilme dayanımı deneyi, TS EN 12390-5 standardına uygun olarak 100x100x400 mm boyutundaki prizmatik beton numuneler üzerinde, 28 günlük kür süresinin tamamlanmasının ardından gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.11). Numunenin kırılma anında ulaşılan maksimum yük değeri kaydedilerek eğilme dayanımı belirlenmiştir. Orta noktadan yük uygulanan bu deneyde, eğilme dayanımı Denklem 3.2 kullanılarak hesaplanmıştır.

$$f_{cf} = \frac{3.F.L}{2.d_1.d_2^2} \quad (3.2)$$

Burada;

f_{cf} Eğilme dayanımı, Mpa(N/mm²)

F En büyük yük, N,

L Mesnet silindirleri arasındaki açıklık, mm

d_1, d_2 Numunenin en kesit boyutları, mm dir.



Şekil 3. 11. Eğilme dayanımı deneyi

3.4.3. Yarmada Çekme Deneyi

Yarmada çekme dayanımı deneyi TS EN 12390-6 standardına göre 150 mm x 300 mm boyutundaki silindir numuneler üzerinde 28 günlük kür sonrasında yapılmıştır (Şekil 3.12). Yarmada çekme dayanımı Denklem 3.3 kullanılarak hesaplanır:

$$f_{ct} = \frac{2xF}{\pi x L x d} \quad (3.3)$$

Burada;

f_{ct} Yarmada çekme dayanımı, Mpa(N/mm²)

F En büyük yük, N,

L Numunenin yükleme parçasına temas çizgisi uzunluğu, mm,

d Numunenin seçilen en kesit boyutu, mm dir.



Şekil 3. 12. Yarmada çekme dayanımı deneyi

3.4.4. Su Emme Deneyi

Su emme deneyi ASTM C642 standardına göre 100x100x100 mm boyutundaki 28 günlük numuneler kullanılarak gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.13). Numuneler önce 105 ± 5 °C'de sabit kütleye ulaşana kadar etüvde kurutulmuştur. Etüvden çıkarılan numuneler oda sıcaklığına geldikten sonra tartılmıştır. Daha sonra numuneler 20 ± 2 °C'de 24 saat suya bekletilmiş ve bu süre sonunda doygun yüzey

kuru ağırlığı kaydedilmiştir. Denklem 3.4 kullanılarak beton numunelerin su emme oranları belirlenmiştir.

$$\Delta = \left(\frac{W_{dyk} - W_k}{W_k} \right) \times 100 \quad (3.4)$$

Burada;

Δ : Su emme oranı (%)

W_{dyk} : Doygun yüzey kuru ağırlık (gr.)

W_k : Etüv kurusu ağırlık (gr.)



Şekil 3. 13. Su emme deneyi

4. BULGULAR

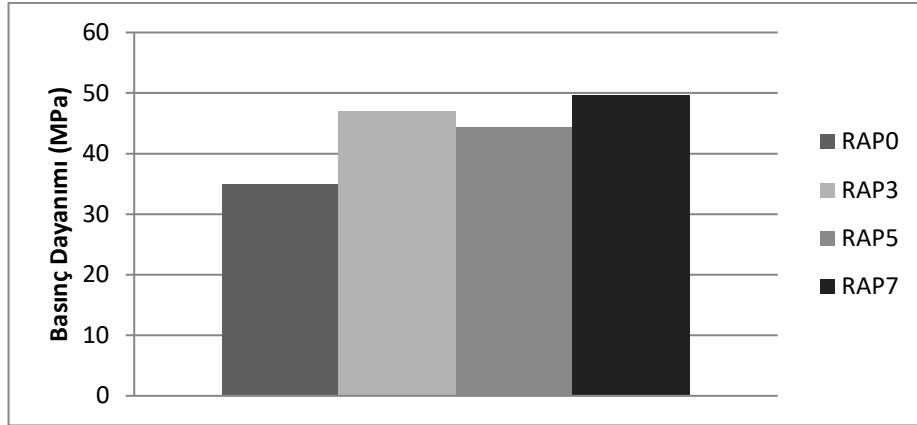
Yapılan deneyler sonucunda elde edilen veriler bu bölümde değerlendirilmiştir.

4.1. Basınç Dayanımı

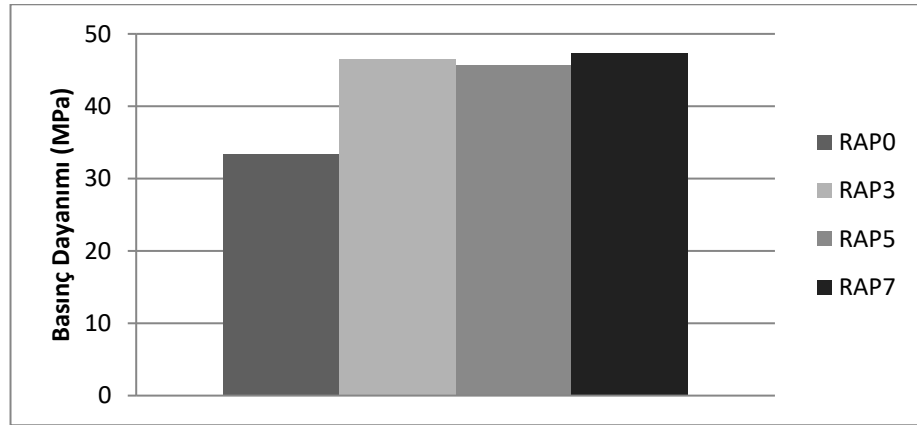
TS EN 12390-3 standardına göre, GKA agregaları kullanılarak hazırlanan beton numuneleri 28 günlük kür süresinin ardından basınç dayanımı testine tabi tutulmuştur. Elde edilen sonuçlar Çizelge 4.1’de sunulmuştur. Ayrıca, Şekil 4.1’de her bir çimento dozajı için GKA agrega kaplama katman sayısının beton numunelerinin basınç dayanımı üzerindeki etkisi gösterilmiştir.

Çizelge 4. 1. Basınç dayanımı sonuçları

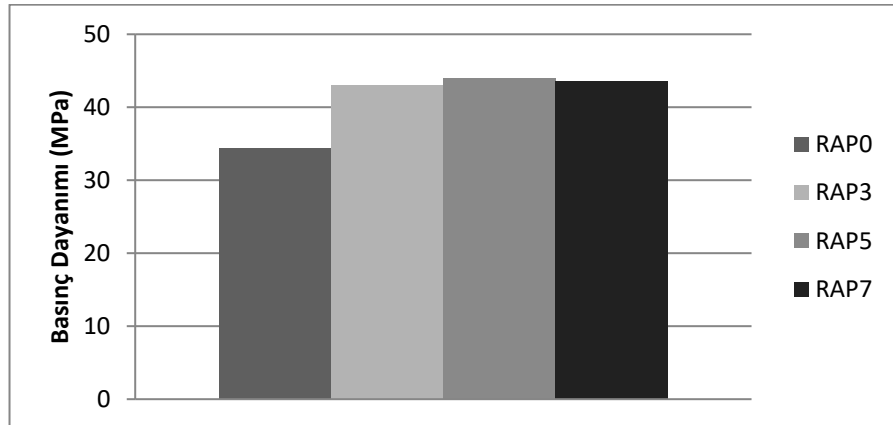
Karışım ID	Basınç Dayanımı (MPa)
C350-GKA0	34,87
C425-GKA0	33,33
C500-GKA0	34,33
C350-GKA3	47,05
C425-GKA3	46,55
C500-GKA3	43,00
C350-GKA5	44,40
C425-GKA5	45,70
C500-GKA5	43,90
C350-GKA7	49,55
C425-GKA7	47,30
C500-GKA7	43,55



(a)



(b)



(c)

Şekil 4. 1. Farklı çimento dozajlarında GKA agrega kaplama sayısının beton numunelerinin basınç dayanımı üzerindeki etkisi: (a) 350 kg/m³, (b) 425 kg/m³ ve (c) 500 kg/m³

350, 425 ve 500 kg/m³ çimento dozajları ve %100 GKA agregası ile üretilen beton numunelerin basınç dayanım sonuçları Şekil 4.1’de sunulmuştur. Sonuçlar incelendiğinde, tüm çimento dozajlarında kaplamasız GKA agregası kullanılan karışımların (GKA0) en düşük basınç dayanımına sahip olduğu görülmektedir. Bu durum, kaplamasız GKA agregalarının yüksek gözenekliliği ve bitüm tabakası nedeniyle matris–agrega ara yüzeyinde olumsuz etki yarattığını ortaya koymaktadır. 350 kg/m³ çimento dozajında, kaplama sayısının artması ile basınç dayanımlarında belirgin iyileşmeler gözlenmiştir. GKA0 numunesinin basınç dayanımı değeri 34,87 MPa olarak elde edilirken, GKA3 numunesinde bu değer 47,05 MPa seviyesine, GKA7 numunesinde ise 49,55 MPa seviyesine yükselmiştir. Bu artış, düşük bağlayıcı dozajında kaplama tabakasının agreganın zayıf yapısını telafi ederek matrisle aderansı güçlendirdiğini göstermektedir. 425 kg/m³ çimento dozajında benzer bir eğilim gözlenmiştir. GKA0 numunesi 33,33 MPa dayanım sergilerken, GKA3 ve GKA5 numunelerinde dayanım sırasıyla 46,55 ve 45,7 MPa değerlerine ulaşmıştır. En yüksek dayanım ise 47,3 MPa ile GKA7’de elde edilmiştir. Bu sonuç, orta çimento dozajında kaplama sayısının yine dayanımı artırıcı yönde etkili olduğunu ortaya koymaktadır. 500 kg/m³ çimento dozajında ise kaplama sayısının etkisi sınırlı kalmıştır. Kaplamasız GKA agregası içeren numunede 34,33 MPa değeri elde edilmiştir. GKA3, GKA5 ve GKA7 içeren numunelerde ise sırasıyla 43,0, 43,9 ve 43,55 MPa dayanım değerlerine ulaşmış, ancak birbirine oldukça yakın değerler sergilemiştir. Bu durum, yüksek çimento dozajlarında matrisin baskın dayanım katkısı nedeniyle, kaplama sayısındaki artışın yalnızca sınırlı düzeyde etkili olduğunu ortaya koymaktadır. Genel olarak bulgular değerlendirildiğinde, kaplama sayısının artışı özellikle düşük ve orta çimento dozajlarında betonun basınç dayanımını önemli ölçüde artırmıştır. Yüksek çimento dozajında ise bu etki sınırlı kalmış ve dayanım değerleri yaklaşık 43–44 MPa aralığında sabitlenmiştir. Dolayısıyla hem ekonomik hem de sürdürülebilir beton tasarımı için orta çimento dozajı ile uygun kaplama sayısının birlikte kullanılması daha etkin bir strateji olarak değerlendirilebilir. Şekil 4.2’de görüldüğü üzere, kaplama uygulanmış agregalarda herhangi bir deformasyon meydana gelmemiştir. Beton numunesinde oluşan kırılma yüzeylerinin ise esas olarak matris–agrega ara yüzeyinde geliştiği gözlemlenmiştir.



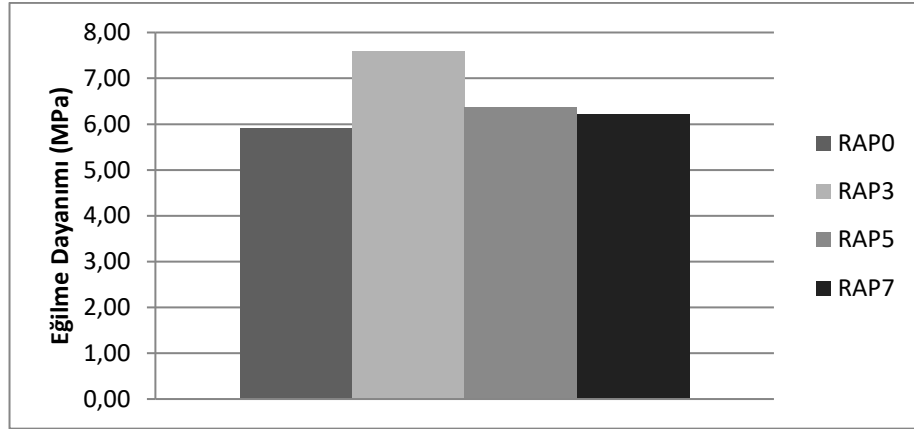
Şekil 4. 2. Basınç deneyi sonrası beton numunesinin görünümü

4.2. Eğilme Dayanımı

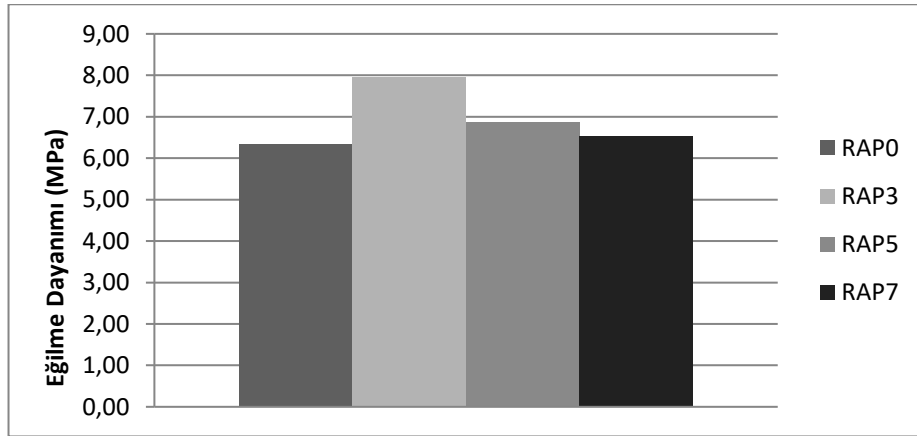
Eğilme dayanımı deneyi TS 12390-5 standardına göre orta noktadan yük uygulanarak yapılmıştır. Numunelere ait deney sonuçları Çizelge 4.2’de sunulmuştur. Ayrıca, Şekil 4.3’te her bir çimento dozajı için GKA agrega kaplama katman sayısının beton numunelerinin eğilme dayanımı üzerindeki etkisi gösterilmiştir. Elde edilen sonuçlar incelendiğinde, kaplama sayısının ve çimento dozajının eğilme dayanımı üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu görülmektedir.

Çizelge 4. 2. Eğilme dayanımı sonuçları

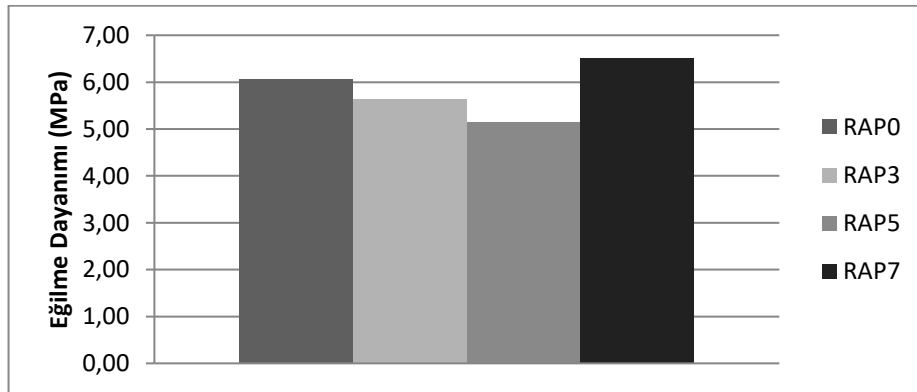
Karışım ID	Eğilme Dayanımı (MPa)
C350-GKA0	5,90
C425-GKA0	6,32
C500-GKA0	6,06
C350-GKA3	7,59
C425-GKA3	7,96
C500-GKA3	5,64
C350-GKA5	6,36
C425-GKA5	6,87
C500-GKA5	5,16
C350-GKA7	6,20
C425-GKA7	6,53
C500-GKA7	6,53



(a)



(b)



(c)

Şekil 4.3. Farklı çimento dozajlarına sahip beton numunelerde GKA agregasının kaplama sayılarının eğilme dayanımına etkisi: (a) 350 kg/m³, (b) 425 kg/m³, (c) 500 kg/m³.

Kaplanmamış GKA agregası kullanılan numunelerde eğilme dayanımı değerleri 5,90–6,32 MPa aralığında değişmiştir. Çimento dozajının 350 kg/m³'ten 425 kg/m³'e yükseltilmesi, eğilme dayanımında sınırlı bir artış sağlamıştır. Ancak 500 kg/m³ dozajda beklenen artış gerçekleşmemiş, dayanım değerinin 6,06 MPa seviyesinde kaldığı gözlemlenmiştir. Bu durum, yüksek çimento miktarının hidrasyon ısını artırarak matris içinde mikro çatlak oluşumuna yol açabileceğini ve dolayısıyla dayanımı sınırlayabileceğini göstermektedir.

GKA3 agregaları kullanılan beton numunlerinde tüm çimento dozajlarında belirgin bir dayanım artışı elde edilmiştir. Özellikle 425 kg/m³ çimento dozajına sahip C425-GKA3 karışımı, 7,96 MPa ile en yüksek eğilme dayanımını göstermiştir. Bu artışın, kaplama sayesinde agrega-matris ara yüzeyinde aderansın iyileşmesi ve gerilme transferinin daha homojen hale gelmesiyle ilişkili olduğu düşünülmektedir.

GKA5 ve GKA7 agregalarının kullanıldığı beton numunelerinin eğilme dayanımlarında düşüş gözlenmiştir. Özellikle GKA5 agregası kullanılan ve 425 kg/m³ çimento dozajına sahip beton numunede 5,16 MPa değeri ile en düşük eğilme dayanım değeri kaydedilmiştir. Kaplama tabakasının kalınlaşmasıyla, agrega-matris arasındaki bağın zayıfladığı, elastik modül farklarının arttığı ve gerilme yoğunlaşmalarının olduğu değerlendirilmiştir.

Genel olarak, GKA agregalarının üç kat kaplanmasının optimum sonuç verdiği; bu kaplama seviyesinin, agrega-matris ara yüzeyinde homojen bir geçiş bölgesi sağlayarak eğilme dayanımını maksimize ettiği belirlenmiştir. Bununla birlikte, 425 kg/m³ çimento dozajının hem ekonomik açıdan hem de mekanik performans açısından en uygun kombinasyonu sunduğu sonucuna ulaşılmıştır.



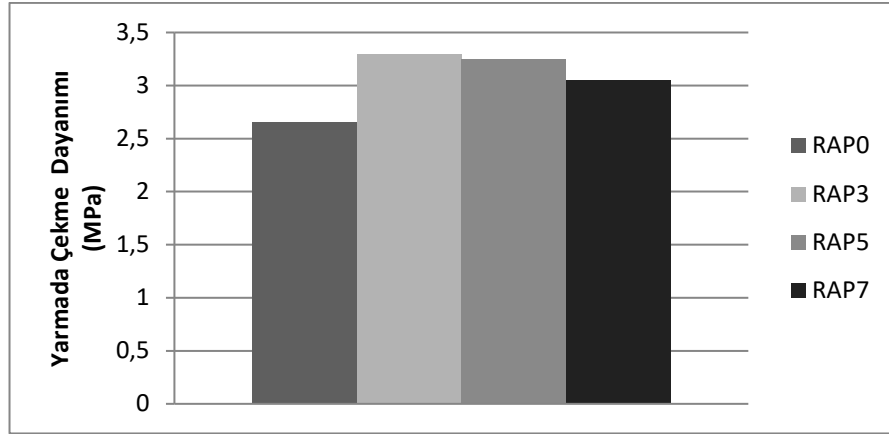
Şekil 4. 4. Eğime dayanımı deneyi sonrası beton numunesinin görünümü

4.3. Yarmada Çekme Dayanımı

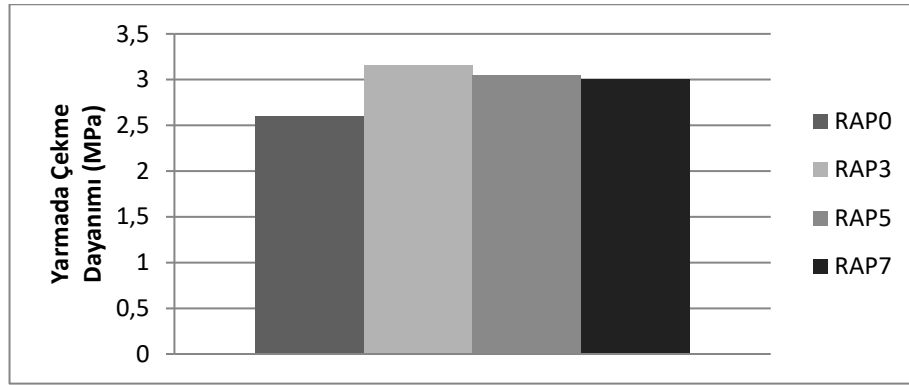
Yarmada çekme deneyi TS EN 12390-6 standardına göre 150 mm x 300 mm kesitli silindir numuneler üzerinde 28 günlük kür sonrasında yapılmıştır. Numunelere ait deney sonuçları Çizelge 4.3'te sunulmuş olup, Şekil 4.5'te her bir çimento dozajı için GKA agrega kaplama sayısının beton numunelerinin yarmada çekme dayanımı üzerindeki etkisi gösterilmiştir. Şekil 4.6'da se yarmada çekme deneyi sonrasında numunelerde oluşan kırılma yüzeylerinin karakteristik biçimi görülmektedir.

Çizelge 4. 3. Yarmada çekme dayanımı deneyi sonuçları

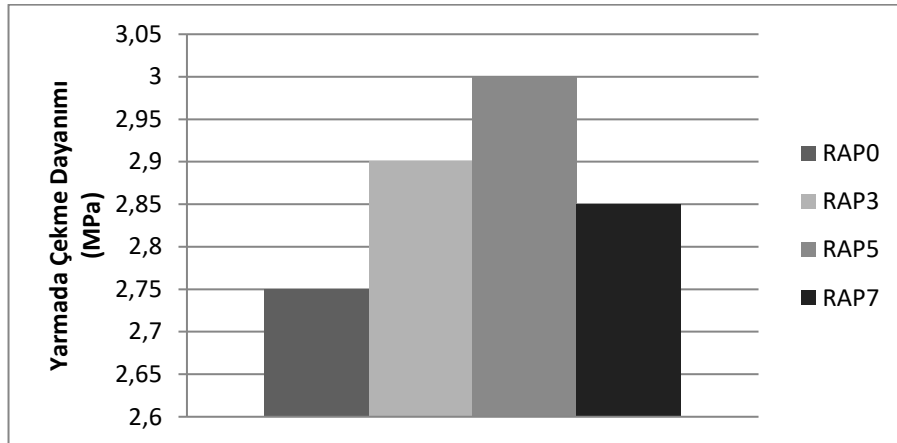
Karışım ID	Yarmada Çekme Dayanımı (MPa)
C350-GKA0	2,65
C425-GKA0	2,6
C500-GKA0	2,75
C350-GKA3	3,3
C425-GKA3	3,15
C500-GKA3	2,9
C350-GKA5	3,25
C425-GKA5	3,05
C500-GKA5	3
C350-GKA7	3,05
C425-GKA7	3
C500-GKA7	2,85



(a)



(b)



(c)

Şekil 4. 5. Farklı çimento dozajlarına sahip beton numunelerde GKA agregasının kaplama sayılarının yarmada çekme dayanımına etkisi: (a) 350 kg/m³, (b) 425 kg/m³, (c) 500 kg/m³.

350, 425 ve 500 kg/m³ çimento dozajları ile farklı kaplama sayılarına sahip GKA agregaları kullanılarak üretilen beton numunelerin yarmada çekme dayanımı sonuçları incelendiğinde, kaplamasız GKA agregalarının (GKA0) en düşük değerleri verdiği görülmektedir. Özellikle C350-GKA0 numunesi 2,65 MPa, C425-GKA0 numunesi 2,60 MPa ve C500-GKA0 numunesi 2,75 MPa dayanım göstermiştir. Bu durum, kaplamasız GKA agregalarının yüksek gözenekliliği ve yüzeylerindeki bitümlü film tabakasının çimento hamuru ile aderansı zayıflatmasıyla açıklanabilir. Kaplama sayısındaki artışın, özellikle 350 ve 425 kg/m³ dozajlarında olumlu etkiler yarattığı tespit edilmiştir. C350 serisinde GKA3 ve GKA5 numuneleri sırasıyla 3,30 MPa ve 3,25 MPa ile önemli bir iyileşme sağlamıştır. Benzer şekilde C425 serisinde, GKA0 değerinin 2,60 MPa olmasına karşın GKA3 numunesi 3,15 MPa ve GKA5 numunesi 3,05 MPa seviyelerine ulaşmıştır. Bu artış, kaplama uygulamasının agreganın zayıf yapısını telafi ederek matris-agrega ara yüzeyinde bağlanmayı güçlendirdiğini göstermektedir. Buna karşın 500 kg/m³ çimento dozajında kaplama sayısının etkisi sınırlı kalmış; tüm numunelerde değerler 2,75–2,90 MPa aralığında sonuçlar elde edilmiştir.

Genel olarak değerlendirildiğinde, kaplama uygulamasının 350 ve 425 kg/m³ dozajlı betonlarda yarmada çekme dayanımını artırıcı yönde belirgin katkı sağladığı; 500 kg/m³ çimento dozajında ise bu etkinin sınırlı düzeyde kaldığı sonucuna varılabilir. Dolayısıyla gerek malzeme verimliliği gerekse ekonomik tasarım açısından 425 kg/m³ çimento dozajı ile uygun kaplama sayısının birlikte tercih edilmesi daha etkin bir strateji olarak öne çıkmaktadır.



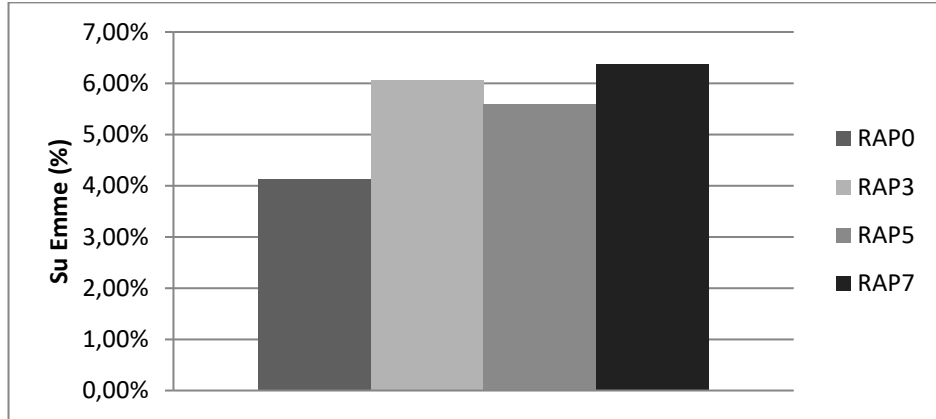
Şekil 4. 6. Yarmada çekme deneyi sonrası beton numunesinin görünümü

4.4. Su Emme

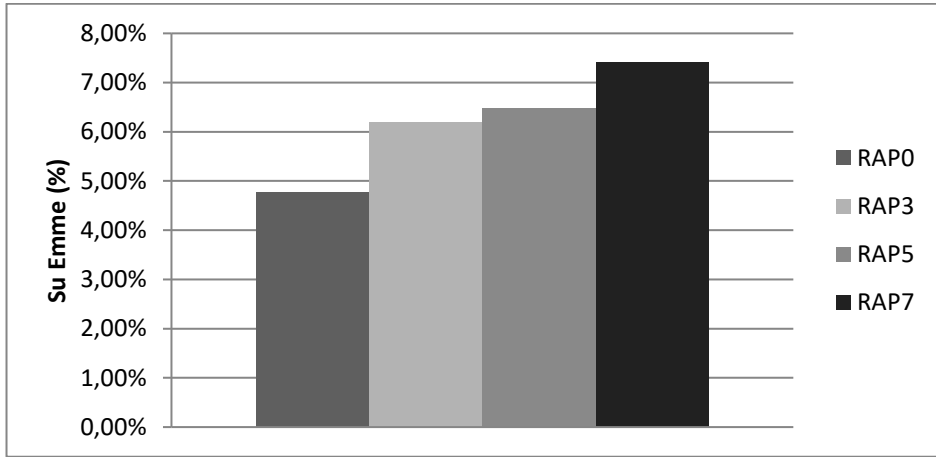
Beton numunelere ait su emme deney sonuçları Çizelge 4.4'te verilmiştir. Şekil 4.7'de her bir çimento dozajı için GKA agrega kaplama sayısının beton numunelerin su emme değerleri üzerindeki etkisi gösterilmiştir.

Çizelge 4. 4. Su emme deneyi sonuçları

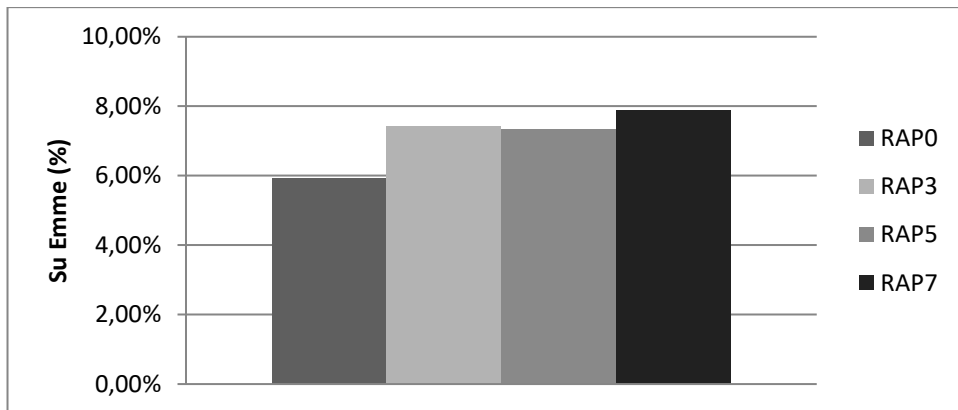
Karışım ID	Su Emme (%)
C350-GKA0	4,13
C425-GKA0	4,77
C500-GKA0	5,93
C350-GKA3	6,05
C425-GKA3	6,20
C500-GKA3	7,43
C350-GKA5	5,58
C425-GKA5	6,47
C500-GKA5	7,32
C350-GKA7	6,37
C425-GKA7	7,42
C500-GKA7	7,86



(a)



(b)



(c)

Şekil 4. 7. Farklı çimento dozajlarına sahip beton numunelerde GKA agregasının kaplama sayılarının su emme değerine etkisi: (a) 350 kg/m³, (b) 425 kg/m³, (c) 500 kg/m³.

350, 425 ve 500 kg/m³ çimento dozajlarıyla üretilen GKA içeren beton numunelerinin su emme oranları incelendiğinde, kaplamasız GKA agregası kullanılan karışımların (GKA0) en düşük su emme değerlerini gösterdiği belirlenmiştir. C350-GKA0 numunesi %4,13, C425-GKA0 numunesi %4,77 ve C500-GKA0 numunesi %5,93 su emme oranı sergilemiştir.

Kaplama sayısının artmasıyla birlikte, tüm çimento dozajlarında su emme oranlarında belirgin bir artış gözlenmiştir. Özellikle C350 serisinde GKA3 ve GKA7 numunelerinde değerler sırasıyla %6,05 ve %6,37'ye yükselmiştir. Benzer şekilde C425 serisinde GKA0'ın %4,77 olan değeri, GKA7 numunesinde %7,42'ye çıkmıştır. En yüksek değerler ise genellikle 500 kg/m³ çimento dozajlı numunelerde elde edilmiştir; örneğin C500-GKA7 numunesi %7,86 su emme oranı ile tüm serilerin üzerinde yer almaktadır.

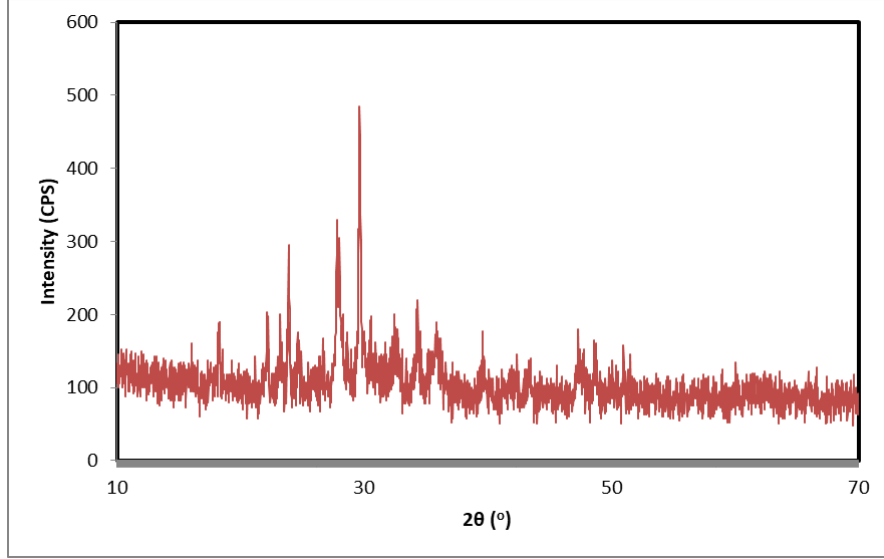
Kaplanmamış GKA agregalarının hidrofobik yüzey özellikleri nedeniyle düşük su emme eğilimi göstermesine karşın, kaplama tabakasının artmasıyla agregaların yüzeyinde oluşan gözeneklilik ve heterojen yapı, suyun matris içerisine daha kolay nüfuz etmesine neden olmuştur. Bu eğilim, kaplama sayısındaki artışın geçirimsizlik üzerinde olumsuz bir etki yarattığını göstermektedir.

Genel olarak değerlendirildiğinde, kaplama sayısının artışı betonun mekanik dayanımında belirli avantajlar sağlarken, su emme açısından olumsuz etki yarattığı söylenebilir. Özellikle 500 kg/m³ çimento içeren karışımlarda kaplama sayısı arttıkça su emme oranlarının %7'nin üzerine çıkması, uzun vadeli dayanıklılık ve donma-çözülme direnci açısından dikkat edilmesi gereken bir durumdur.

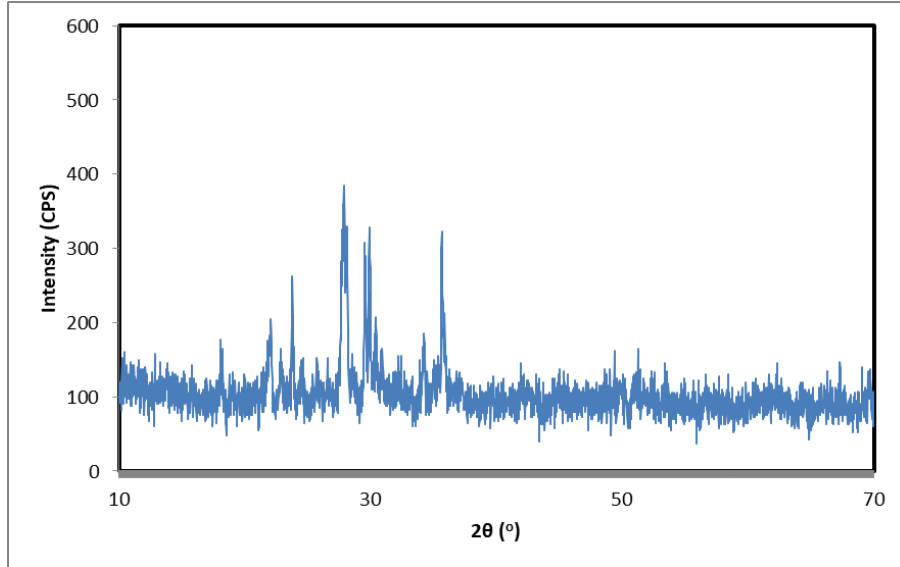
4.5. X- Işını Difraksiyonu (XRD) Analizi

Bu bölümde, kaplamalı ve kaplamasız beton numunelerden elde edilen X- Işını Difraksiyonu (XRD) sonuçları karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. XRD analizi, numunelerin kristalin faz dağılımlarını, amorf yapının varlığını ve kaplama işleminin mineralojik yapıya etkisini belirlemek amacıyla yapılmıştır. Ölçümler 10°–70° 2 θ aralığında gerçekleştirilmiştir.

Şekil 4.8 ve Şekil 4.9’de kaplamasız ve kaplamalı numunelerin X-Işını difraksiyon desenleri görülmektedir. Kaplama işlemi sonrasında tepe yoğunluklarının daha belirgin hale geldiği, amorf yapı katkısının azaldığı ve kristalin faz oranının arttığı gözlemlenmiştir.



Şekil 4. 8. Kaplamasız numuneye ait XRD grafiği



Şekil 4. 9. Kaplamalı numuneye ait XRD grafiği

Kaplamasız numuneye ait difraktogramda 26° – 30° aralığında belirgin bir tepe gözlenmiştir. Bu bölgedeki tepe genellikle kuvars (SiO_2) veya kalsit (CaCO_3) fazlarına karşılık gelmektedir. Ayrıca 18° – 22° , 32° – 35° ve 45° – 50° aralıklarında daha küçük yoğunluklarda çok sayıda tepe bulunması, numunenin çok fazlı bir yapıya sahip olduğunu göstermektedir. Ancak pik genişliklerinin nispeten fazla olması ve taban gürültüsünün yüksek düzeyde seyretmesi, yapının kısmen amorf veya mikrokristalin karakterde olduğunu düşündürmektedir. Bu durum, kaplama işlemi uygulanmamış numunede mineral fazların düzensiz dağıldığını ve kristalin faz oranının düşük olduğunu göstermektedir.

Kaplamalı numunede ise 26° – 30° aralığında daha keskin, simetrik ve belirgin pikler tespit edilmiştir. Bu piklerin yoğunluğu kaplamasız numuneye göre nispeten yüksek olmakla birlikte, taban gürültüsü oldukça düşüktür. Ayrıca düşük açılı bölgelerde (10° – 20°) amorf karakterli geniş tepelerin azaldığı gözlemlenmiştir. Bu durum, kaplama işlemi sonrasında matristeki kristalin faz oranının arttığını, amorf bileşenlerin ise azaldığını göstermektedir. Piklerin daha keskin ve dar yapıda olması, kristal kafes düzeninin geliştiğini ve kaplama işleminin mineral faz kararlılığını artırdığını işaret etmektedir.

Kaplamasız numunede geniş ve düzensiz pikler ile yüksek taban gürültüsü gözlenirken, kaplamalı numunede pikler daha keskin, simetrik ve yoğunluk bakımından belirgindir. Bu farklılık, kaplama işleminin kristalin fazların düzenlenmesine, amorf fazların azalmasına ve genel olarak mikroyapısal homojenliğin artmasına neden olduğunu göstermektedir. Dolayısıyla kaplamalı numune, XRD açısından daha yüksek kristalinlik ve faz kararlılığı sergilemektedir.

Elde edilen sonuçlar, kaplama işleminin numune yüzeyinde ve matris içinde kristalin faz oluşumunu desteklediğini, amorf yapıların oranını azalttığını ve genel mikroyapısal bütünlüğü iyileştirdiğini göstermektedir. Bu nedenle XRD analizine göre kaplamalı numune, kaplamasız numuneye kıyasla daha düzenli ve kararlı bir mineralojik yapı sergilemektedir.

XRD sonuçlarına göre kaplamalı numunede daha keskin ve yüksek yoğunluklu difraksiyon pikleri gözlenmiştir. Bu durum, kaplama işleminin kristalin faz oranını artırarak amorf yapıların azalmasına neden olduğunu göstermektedir.

Buna karşın kaplamasız numunede pikler daha geniş ve düzensiz olup, kristalinlik derecesi daha düşüktür. Dolayısıyla kaplama işlemi, mineral fazların kararlılığını ve yapısal düzenliliği artırıcı etki göstermiştir.

4.6. SEM Analizi

Bu çalışmada, farklı beton karışımlarının mikroyapısal özelliklerini ortaya koymak amacıyla taramalı elektron mikroskobu (SEM) analizleri gerçekleştirilmiştir. SEM görüntüleme ile çimento pastasının mikro düzeydeki morfolojik yapısı, agrega ile çimento arasındaki geçiş zonunun (ITZ) karakteristiği, boşluk yapısı ve çatlak oluşumu detaylı şekilde incelenmiştir. İncelemeler, "Kaplamasız GKA agregası kullanılmış beton numunesi" ve "Kaplama GKA agregası kullanılmış beton numunesi" olarak adlandırılan iki farklı karışıma ait beton numuneleri üzerinde, sırasıyla 100x, 500x ve 2000x büyütme oranlarında yapılmıştır.

Kaplamasız GKA agregası kullanılmış beton numunesine ait SEM görüntülerine göre, çimento pastasında belirgin düzeyde boşluk oluşumu ve dağınık bir mikro yapı gözlenmiştir. 100x büyütmede, özellikle küresel yapıda büyük boşluklar tespit edilmiş; bu boşlukların karışım esnasında sıkıştırma kaynaklandığı düşünülmektedir. 500x büyütmede ise, agrega ile çimento pastası arasında oluşan geçiş zonunda (ITZ) çatlakların başladığı ve yüzey boyunca ilerlediği görülmüştür.

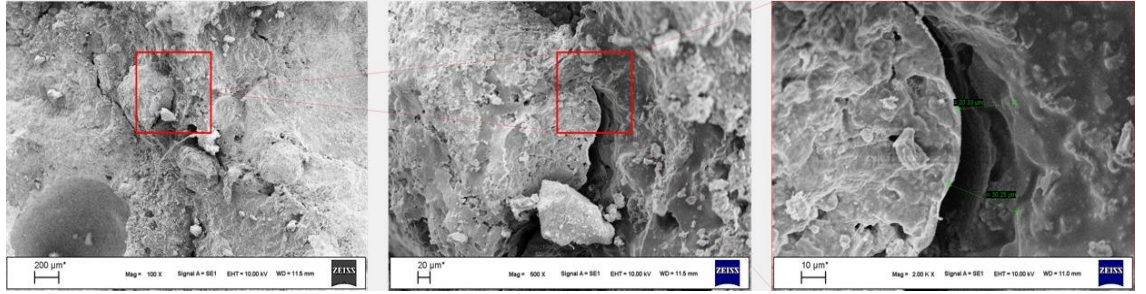
2000x büyütmede yapılan detaylı incelemede, ITZ bölgesinde yer alan çatlakların yaklaşık 20,53 μm ile 30,25 μm arasında değişen genişliklere sahip olduğu ölçülmüştür. Bu gözlem, mikroyapıda bağlanma zayıflığının bulunduğunu ve geçiş zonunun dayanım açısından kritik bir zayıflık bölgesi oluşturduğunu göstermektedir. Ayrıca, ITZ bölgesinin net şekilde ayrışması, agrega ile matris arasındaki fiziksel tutunmanın yetersiz olduğuna işaret etmektedir. Bu tür yapılar, özellikle çekme ve eğilme dayanımı üzerinde olumsuz etkilere neden olabilmektedir.

Kaplama GKA agregası kullanılmış beton numunesine ait SEM görüntüleri ise, daha homojen ve kompakt bir yapı ortaya koymaktadır. 100x büyütmede çimento pastasının daha sıkı yerleştiği, boşluk oranının ise belirgin şekilde azaldığı gözlemlenmiştir. 500x büyütmede agrega çevresinde oluşan geçiş zonu daha düzenli

ve çatlak oluşumu daha sınırlıdır. Bu durum, agrega yüzeyine çimento pastasının daha etkin bağlandığını göstermektedir.

2000x büyütmede gerçekleştirilen detaylı ölçümlerde, çatlak genişliklerinin 7,15 μm ile 8,71 μm arasında olduğu tespit edilmiştir. Bu değerler, Kaplamasız GKA agregası kullanılmış beton numunesi kıyasla oldukça düşüktür ve yapının iç tutarlılığının daha yüksek olduğunu ortaya koymaktadır. ITZ bölgesinin dar olması, geçişin daha yumuşak gerçekleştiğini ve yapının dayanım kapasitesinin artabileceğini göstermektedir.

İki numune arasında yapılan karşılaştırmalı analiz, mikroyapı özelliklerinin mekanik dayanım ile doğrudan ilişkili olduğunu göstermektedir. Kaplamasız GKA agregası kullanılmış beton numunesi, daha geniş ITZ bölgesi ve yüksek çatlak yoğunluğu nedeniyle zayıf bir mikroyapı sergilerken; Kaplamalı GKA agregası kullanılmış beton numunesi, daha dar ITZ bölgesi ve düşük çatlak yoğunluğu ile daha sağlam bir yapı ortaya koymaktadır. Bu bağlamda, geçiş zonunun morfolojisi, betonun genel performansını belirleyen önemli bir parametre olarak değerlendirilmektedir.

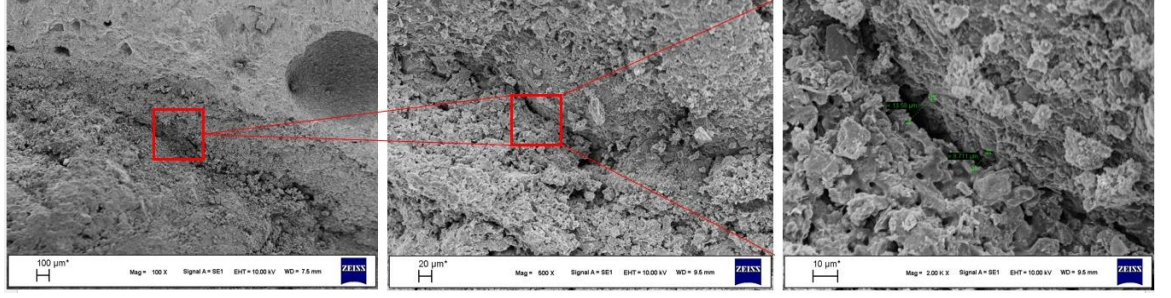


(a)

(b)

(c)

Şekil 4. 10. Kaplamasız GKA agregası kullanılan beton numunesine ait SEM görüntüleri; (a) 100x büyütmede genel mikroyapı görünümü, (b) 500x büyütmede agrega-çimento pastası geçiş zonu (ITZ) detayları, (c) 2000x büyütmede ITZ bölgesinde gözlenen yaklaşık 20–30 μm genişliğindeki çatlakların büyütülmüş görünümü.



(a)

(b)

(c)

Şekil 4. 11. Kaplamalı GKA agregası kullanılmış beton numunesine ait SEM görüntüleri; (a) 100x büyütmede daha homojen çimento matrisi yapısı, (b) 500x büyütmede agrega–matris geçiş bölgesinin kompakt yapısı, (c) 2000x büyütmede ITZ içerisinde yer alan yaklaşık 7–9 µm aralığındaki mikro çatlakların detaylı görünümü.

5.TARTIŞMA

Bu çalışmadan elde edilen sonuçlar, GKA agregalarının betonun mekanik özelliklerini çimento dozajı ve kaplama sayısına bağlı olarak farklı şekillerde etkilediğini göstermektedir. Basınç dayanımı deneylerinde, kaplamasız GKA içeren karışımların (GKA0) en düşük değerlere sahip olduğu; kaplama sayısının artışıyla özellikle 350 ve 425 kg/m³ dozajlarında önemli iyileşmeler sağlandığı görülmüştür. Bu durum, literatürde sıkça vurgulanan, GKA yüzeyinde yer alan yaşlanmış bitüm tabakasının matris–agrega ara yüzeyinde (ITZ) zayıf aderans oluşturduğu bulgusunu (Brand ve Roesler, 2017a; Huang ve ark., 2006) desteklemektedir. Bu çalışmada kaplama tabakası uygulamaları bu olumsuzluğu kısmen gidererek dayanımda %40’a varan artış sağlamış, ancak 425 kg/m³ dozajında matrisin baskın etkisi nedeniyle iyileştirme sınırlı kalmıştır. Bu bulgu, Singh ve ark. (2017)’nin mekanik aşındırma (AB&AT) yöntemiyle GKA yüzeyinin temizlenmesi halinde eğilme dayanımında %6–8 oranında artış kaydedildiğini rapor ettiği sonuçlarla benzerlik göstermektedir. Eğilme dayanımı deneylerinde de kaplamalı GKA’ların, özellikle düşük çimento dozajlarında referanslara kıyasla daha yüksek performans sergilediği; yüksek dozajlarda ise farklı kaplama sayılarının etkisinin sınırlı kaldığı belirlenmiştir. Bu eğilim, Abraham ve Ransinchung (2018a, 2018b)’ın düşük oranlı GKA kullanımında mekanik dayanım kayıplarının sınırlı olabileceği, ancak işlenebilirlik ve tokluk özelliklerinin iyileşebileceği yönündeki bulgularıyla örtüşmektedir.

Yarmada çekme deneylerinde kaplamalı karışımlar, kaplamasızlara göre daha yüksek değerlere ulaşmış, ancak yüksek dozajlı serilerde artış eğilimi sınırlı kalmıştır. Ben Saïd ve ark. (2017) de GKA ile çimento matrisinin aderans problemini modelleyerek düşük oranlarda mekanik performansın kabul edilebilir seviyelerde korunabileceğini vurgulamışlardır. Dayanıklılık açısından incelenen su emme deneylerinde ise, kaplama sayısının artışıyla birlikte gözenekliliğin artmasına bağlı olarak su emme oranlarının yükseldiği görülmüştür. Bu durum, Debbarma ve ark. (2019b) ile Settari ve ark. (2015)’in ince GKA fraksiyonlarının yüksek gözenekliliğe bağlı olarak su emmesini artırdığına dair bulgularıyla uyumludur. Bununla birlikte, bazı çalışmalarda (Boussetta ve ark., 2020) GKA yüzeyindeki bitümlü filmin hidrofobik karakteri nedeniyle su emmenin daha düşük seviyelerde olabileceği rapor edilmiştir.

Diğer iyileştirme yöntemleriyle karşılaştırıldığında, bu tezde uygulanan kaplama tabakası yaklaşımının, özellikle düşük ve orta çimento dozajlarında basınç ve eğilme dayanımlarında sağladığı artış bakımından literatürde önerilen yüzey temizleme (Singh ve ark., 2017) veya çimento şerbeti/kireç ile ön kaplama yöntemleriyle (Al-Oraimi ve ark., 2009; Courard ve ark., 2010) benzer iyileştirici etkiler yarattığı söylenebilir. Ayrıca yardımcı bağlayıcıların (silis dumanı, uçucu kül vb.) kullanıldığı çalışmalarda (Erdem ve Blankson, 2014; Modarres ve Hosseini, 2014) dayanıklılık ve geçirgenlik özelliklerinin güçlendiği bildirilmiş olup, bu tür mineral katkıların kaplama tabakası ile birlikte kullanılması ileride daha güçlü sonuçlar verebilir. Dolayısıyla bu çalışmadan elde edilen bulgular, GKA'nın mekanik zayıflıklarının farklı yöntemlerle iyileştirilebileceğini, kaplama tabakasının ise bu yöntemlerden biri olarak sürdürülebilir ve ekonomik bir alternatif sunduğunu göstermektedir.

6.SONUÇLAR

Bu tez çalışmasında, GKA agregalarının beton yol kaplamalarında sürdürülebilir bir yapı malzemesi olarak kullanılabilirliği araştırılmıştır. Çalışmanın temel amacı; doğal kaynak tüketiminin azaltılması, çevresel etkilerin en aza indirilmesi ve çevre dostu inşaat malzemelerinin geliştirilmesi hedefleri doğrultusunda, GKA agregalarının betonun mekanik ve mikroyapısal özelliklerine etkisini ortaya koymaktır. Bu kapsamda, farklı çimento dozajlarında (350, 425 ve 500 kg/m³) ve farklı kaplama sayılarına (0, 3, 5 ve 7 kat) sahip GKA agregaları ile üretilen numuneler üzerinde basınç dayanımı, eğilme dayanımı, yarmada çekme dayanımı, su emme deneyleri, XRD ve SEM analizleri gerçekleştirilmiştir.

Elde edilen sonuçlara göre, kaplamasız GKA agregaları kullanılan numuneler genel olarak en düşük basınç dayanımı değerlerini göstermiştir. Kaplama sayısının artmasıyla özellikle düşük ve orta çimento dozajlarında (350 ve 425 kg/m³) dayanım değerlerinde belirgin artışlar kaydedilmiştir. Örneğin, 350 kg/m³ çimento dozajlı GKA7 karışımında basınç dayanımı, kaplamasız numuneye göre %42,1 oranında artarak 34,87 MPa'dan 49,55 MPa'a yükselmiştir. Ancak yüksek çimento dozajında (500 kg/m³) kaplama sayısının etkisi sınırlı kalmış ve dayanım değerleri yaklaşık 43–44 MPa aralığında sabitlenmiştir.

Eğilme dayanımı açısından, kaplanmış GKA agregaları kullanılan numuneler kaplamasız GKA agregası kullanılan numunelere göre daha yüksek performans göstermiştir. En yüksek eğilme dayanımları 350 ve 425 kg/m³ çimento dozajlarında GKA3 agregası kullanılarak üretilen beton numunelerden elde edilmiştir. Buna karşın, çimento dozajının veya kaplama sayısının artışı her zaman doğrusal bir artış eğilimi göstermemiş, özellikle yüksek çimento dozajında dayanım değerlerinde dalgalanmalar meydana gelmiştir.

Yarmada çekme dayanımı deneyleri, kaplanmış GKA agregalarının kullanımının tüm dozajlarda dayanımı artırdığını ortaya koymuştur. En yüksek değerler 350 ve 425 kg/m³ çimento dozajlarında GKA3 ve GKA5 agregaları kullanılan numunelerde gözlenmiştir. Bu durum, kaplama tabakasının agrega–matris ara yüzeyinde aderansı güçlendirerek gerilme aktarımını iyileştirdiğini göstermektedir.

Su emme deneyleri, kaplama sayısının artmasıyla agregaların yüzey gözenekliliğinde ve heterojen yapısında artış meydana geldiğini ortaya koymuştur. Bu nedenle, kaplama sayısının fazlaşması su emme oranlarında yükselmeye neden olmuş, bu durumun uzun vadeli dayanıklılık açısından dikkate alınması gereken bir unsur olduğu değerlendirilmiştir.

XRD ve SEM analizlerinden elde edilen bulgular, kaplama işleminin GKA agregalarının mikroyapısal özelliklerini belirgin biçimde iyileştirdiğini göstermektedir. XRD analizlerinde, kaplamalı numunelerde daha keskin ve yüksek yoğunluklu difraksiyon pikleri gözlenmiş; bu durum kristalin faz oranının arttığını, amorf yapıların ise azaldığını ortaya koymuştur. SEM incelemelerinde ise, kaplanmış GKA agregalı numunelerin daha kompakt bir yapı sergilediği, ara yüzey geçiş zonunun (ITZ) daraldığı ve çatlak oluşumunun azaldığı belirlenmiştir. Buna karşın, kaplanmamış GKA agregaları ile üretilen numunelerde gevşek matris yapısı, geniş ITZ bölgesi ve yüksek boşluk oranı dikkat çekmiştir.

Elde edilen bulgular, çok katmanlı kaplama tekniğinin GKA agregalarının yüzey özelliklerini iyileştirerek betonun hem mekanik performansını hem de mikroyapısal bütünlüğünü artırdığını ortaya koymuştur. Bu sonuçlar doğrultusunda, optimum tasarımın 425 kg/m³ çimento dozajı ile GKA3 agrega kombinasyonu kullanılarak elde edildiği belirlenmiştir.

Sonuç olarak, GKA agregalarının uygun kaplama yöntemiyle kullanılması, beton yol kaplamalarında ekonomik, çevresel ve teknik açıdan sürdürülebilir bir çözüm sunmakta ve aynı zamanda atık asfalt malzemelerinin yeniden değerlendirilmesine olanak sağlamaktadır.

7. ÖNERİLER

Bu çalışmadan elde edilen bulgular, GKA agregalarının özellikle düşük ve orta çimento dozajlarında betonun mekanik performansını artırıcı bir etkiye sahip olduğunu ortaya koymuştur. Bu nedenle, sürdürülebilir beton tasarımlarında üç kat kaplama uygulanmış GKA agregalarının belirli ikame oranlarında kullanılması hem dayanım hem de çevresel katkılar bakımından uygun bir yaklaşım olarak önerilebilir. Bununla birlikte, kaplama sayısının artışı her ne kadar basınç ve çekme dayanımlarında iyileşme sağlasa da su emme değerlerinde görülen artış uzun dönemli dayanıklılık açısından olumsuz bir etki yaratabilmektedir. Bu nedenle, kaplama sayısının optimum düzeyde tutulması ve saha uygulamalarında donma-çözülme, aşınma direnci gibi uzun dönemli dayanıklılık testleriyle desteklenmesi büyük önem arz etmektedir. Yüksek çimento dozajlarında kaplama sayısının etkisinin sınırlı kalması, matrisin baskın dayanım katkısını işaret etmekte ve bu tür karışımlarda GKA kullanımının mekanik performans yerine daha çok kaynak tasarrufu ve çevresel sürdürülebilirlik hedefleri doğrultusunda değerlendirilmesi gerektiğini göstermektedir.

Ayrıca literatürde önerilen diğer iyileştirme yöntemleri, örneğin mekanik aşındırma, kireç veya çimento şerbetiyle yüzey kaplama teknikleri, kaplama uygulamaları ile karşılaştırmalı olarak incelenmeli ve aderans sorunlarının azaltılmasına yönelik daha kapsamlı araştırmalar yürütülmelidir. Son olarak; GKA kullanımının yalnızca mekanik performans değil, aynı zamanda karbon ayak izi, enerji tüketimi ve maliyet avantajları bakımından da değerlendirilmesi için yaşam döngüsü analizlerinin yapılması önerilmektedir. Böylece, GKA agregasının hem mühendislik performansı hem de sürdürülebilirlik boyutlarıyla inşaat sektöründe daha etkin bir şekilde kullanımı mümkün hale gelecektir.

KAYNAKLAR

- Abraham, S. M., & Ransinchung, G. D. R. N. (2018a). Influence of RAP aggregates on strength, durability and porosity of cement mortar. *Construction and Building Materials*, 189, 1105–1112.
- Abraham, S. M., & Ransinchung, G. D. R. N. (2018b). Strength and permeation characteristics of cement mortar with reclaimed asphalt pavement aggregates. *Construction and Building Materials*, 167, 700–706.
- Al-Oraimi, S., Hassan, H. F., & Hago, A. (2009). Recycling of reclaimed asphalt pavement in Portland cement concrete. *The Journal of Engineering Research*, 6(1), 37–45.
- Arapoğlu, H. (2015). Asfalt geri dönüşümü üzerine değerlendirmeler. *Karayolları Dergisi*, 17(2), 45–52.
- Aurangzeb, Q., Al-Qadi, I. L., Ozer, H., & Yang, R. (2014). Hybrid life cycle assessment for asphalt mixtures with high RAP content. *Resources, Conservation and Recycling*, 83, 77–86.
- Ben Saïd, S. E. E., Euch Khay, S. E., Achour, T., & Loulizi, A. (2017). Modelling of the adhesion between reclaimed asphalt pavement aggregates and hydrated cement paste. *Construction and Building Materials*, 152, 839–846.
- Boussetta, I., El Euch Khay, S., & Neji, J. (2020). Experimental testing and modelling of roller compacted concrete incorporating RAP waste as aggregates. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 24(11), 1729–1743.
- Brand, A. S., Amirkhanian, A. N., & Roesler, J. R. (2014). Flexural capacity of full-depth and two-lift concrete slabs with recycled aggregates. *Transportation Research Record*, 2456(1), 64–72.
- Brand, A. S., & Roesler, J. R. (2015). Ternary concrete with fractionated reclaimed asphalt pavement. *ACI Materials Journal*, 112(1).
- Brand, A. S., & Roesler, J. R. (2017a). Bonding in cementitious materials with asphalt-coated particles: Part I – The interfacial transition zone. *Construction and Building Materials*, 130, 171–181.
- Brand, A. S., & Roesler, J. R. (2017b). Bonding in cementitious materials with asphalt-coated particles: Part II – Cement-asphalt chemical interactions. *Construction and Building Materials*, 130, 182–192.
- Cai, X., Chen, M., & Guo, R. (2020). Performance evaluation of asphalt binder rejuvenated with bio-based materials. *Construction and Building Materials*, 243, 118202.

- Chan, S., Lane, B., Kazmierowski, T., & Lee, W. (2011). Pavement preservation: A solution for sustainability. *Transportation Research Record*, 2235(1), 36–42.
- Courard, L., Michel, F., & Delhez, P. (2010). Use of concrete road recycled aggregates for roller compacted concrete. *Construction and Building Materials*, 24(3), 390–395.
- Debbarma, S., & Ransinchung, G. D. R. N. (2021). Achieving sustainability in roller compacted concrete pavement mixes using reclaimed asphalt pavement aggregates – State of the art review. *Journal of Cleaner Production*, 287, 125078.
- Debbarma, S., Ransinchung, G. D. R. N., & Singh, S. (2019). Feasibility of roller compacted concrete pavement containing different fractions of reclaimed asphalt pavement. *Construction and Building Materials*, 199, 508–525.
- Debbarma, S., Singh, S., & Ransinchung, G. D. R. N. (2019). Laboratory investigation on the fresh, mechanical, and durability properties of roller compacted concrete pavement containing reclaimed asphalt pavement aggregates. *Transportation Research Record*, 2673(10), 652–662.
- Delwar, M., Fahmy, M., & Taha, R. (1997). Use of reclaimed asphalt pavement as an aggregate in Portland cement concrete. *ACI Materials Journal*, 94(3).
- EAPA. (2022). *Asphalt in figures 2022*. European Asphalt Pavement Association.
- El Euch Ben Said, S., El Euch Khay, S., & Loulizi, A. (2018). Experimental investigation of PCC incorporating RAP. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 12(1), 8.
- Erdem, S., & Blankson, M. A. (2014). Environmental performance and mechanical analysis of concrete containing recycled asphalt pavement (RAP) and waste precast concrete as aggregate. *Journal of Hazardous Materials*, 264, 403–410.
- Fakhri, M., & Amoosoltani, E. (2017). The effect of reclaimed asphalt pavement and crumb rubber on mechanical properties of roller compacted concrete pavement. *Construction and Building Materials*, 137, 470–484.
- Hafeez, I., Mir, M. S., & Ahmad, M. (2021). Effect of anti-stripping additives on moisture susceptibility of asphalt mixtures. *International Journal of Pavement Engineering*, 22(3), 345–357.
- Hassan, K. E., Brooks, J. J., & Erdman, M. (2000). The use of reclaimed asphalt pavement (RAP) aggregates in concrete. In *Waste Management Series* (Vol. 1, pp. 121–128). Elsevier.
- Hossiney, N., Tia, M., & Bergin, M. J. (2010). Concrete containing RAP for use in concrete pavement. [Conference paper].

- Huang, B., Shu, X., & Burdette, E. G. (2006). Mechanical properties of concrete containing recycled asphalt pavements. *Magazine of Concrete Research*, 58(5), 313–320.
- Huang, B., Shu, X., & Li, G. (2005). Laboratory investigation of Portland cement concrete containing recycled asphalt pavements. *Cement and Concrete Research*, 35(10), 2008–2013.
- Kumari, M., Ransinchung, G. D. R. N., & Singh, S. (2018). A laboratory investigation on dense bituminous macadam containing different fractions of coarse and fine RAP. *Construction and Building Materials*, 191, 655–666.
- Li, J., Xiao, F., Amirkhanian, S., & You, Z. (2019). Asphalt pavement recycling – A review. *Journal of Cleaner Production*, 230, 171–182.
- Liu, S., Wang, H., & Zhang, J. (2022). Plasma treatment of reclaimed asphalt pavement: A novel approach to enhance surface properties. *Construction and Building Materials*, 318, 126143.
- Modarres, A., & Hosseini, Z. (2014). Mechanical properties of roller compacted concrete containing rice husk ash with original and recycled asphalt pavement material. *Materials & Design*, 64, 227–236.
- Mohammed, M. S., ElKady, H., & Abdel-Gawwad, H. A. (2021). Utilization of construction and demolition waste and synthetic aggregates. *Journal of Building Engineering*, 43, 103207.
- Monu, K., Ransinchung, G. D. R. N., Pandey, G. S., & Singh, S. (2020). Performance evaluation of recycled-concrete aggregates and reclaimed-asphalt pavements for foam-mix asphalt mixes. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 32(10), 04020295.
- Mukhopadhyay, A., & Shi, X. (2019). Microstructural characterization of Portland cement concrete containing reclaimed asphalt pavement aggregates using conventional and advanced petrographic techniques. In D. Cong & D. Broton (Eds.), *Advances in cement analysis and concrete petrography* (pp. 187–206).
- ASTM International.
- Nodehi, M., & Mohamad Taghvaei, V. (2022). Sustainable concrete for circular economy: A review on use of waste glass. *Glass Structures & Engineering*, 7(1), 3–22.
- Okafor, F. O. (2010). Performance of recycled asphalt pavement as coarse aggregate in concrete. *Leonardo Electronic Journal of Practices and Technologies*, 9(16), 47–58.
- Selvam, M., Debbarma, S., Singh, S., & Shi, X. (2022). Utilization of alternative aggregates for roller compacted concrete pavements – A state-of-the-art review. *Construction and Building Materials*, 317, 125838.

- Settari, C., Debieb, F., Kadri, E. H., & Boukendakdji, O. (2015). Assessing the effects of recycled asphalt pavement materials on the performance of roller compacted concrete. *Construction and Building Materials*, 101, 617–621.
- Shi, X., Mukhopadhyay, A., & Zollinger, D. (2019a). Long-term performance evaluation of concrete pavements containing recycled concrete aggregate in Oklahoma. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2673(5), 429–442.
- Shi, X., Mukhopadhyay, A., Zollinger, D., & Grasley, Z. (2019b). Economic input–output life cycle assessment of concrete pavement containing recycled concrete aggregate. *Journal of Cleaner Production*, 225, 414–425.
- Shi, X., Mukhopadhyay, A., & Zollinger, D. (2020). Sustainability assessment for Portland cement concrete pavement containing reclaimed asphalt pavement aggregates. *Journal of Cleaner Production*, 192, 569–581.
- Singh, S., Ransinchung, G. D. R. N., & Kumar, P. (2018). Laboratory investigation of concrete pavements containing fine RAP aggregates. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 30(2), 04017279.
- Singh, S., Ransinchung, G. D. R. N., & Monu, K. (2019). Sustainable lean concrete mixes containing wastes originating from roads and industries. *Construction and Building Materials*, 209, 619–630.
- Singh, S., & Ransinchung, G. D. R. N. (2020). Laboratory and field evaluation of RAP for cement concrete pavements. *Journal of Transportation Engineering, Part B: Pavements*, 146(2), 04020011.
- Sobhan, K., & Mashnad, M. (2001). Roller-compacted fiber concrete pavement foundation with recycled aggregate and waste plastics. *Transportation Research Record*, 1775(1), 53–63.
- Thomas, R. J., Fellows, A. J., & Sorensen, A. D. (2018). Durability analysis of recycled asphalt pavement as partial coarse aggregate replacement in a high-strength concrete mixture. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 30(5), 04018061.
- Xiao, F., Punith, V. S., & Amirkhanian, S. (2018). Utilization of nano-silica modified asphalt binder in RAP mixtures. *Materials and Structures*, 51(2), 56.
- Zaumanis, M., & Mallick, R. B. (2015). Review of very high-content reclaimed asphalt use in plant-produced pavements: State of the art. *International Journal of Pavement Engineering*, 16(1), 39–55.