

Evaluation of the usability of recycled concrete aggregates under roller compacted concrete pavement specifications in Türkiye

Oula Aljumaili ¹, Yeşim Arslantürk ¹, Emine Özdoğru ², Oğuzhan Şahin ², Emin Şengün ¹

ARTICLE INFO

Dates:

Received: 28.01.2026

Accepted: 22.05.2026

Doi:

10.65206/pajes.1873481

Corresponding author:

Oğuzhan Şahin

(ohsahin@ankara.edu.tr)

Author addresses:

¹Civil Engineering Department,
Faculty of Engineering and
Natural Sciences, Ankara Yıldırım
Beyazıt University, Ankara,
06010, Türkiye
(olaaljumaili340@gmail.com;
yesimarslanturk@aybu.edu.tr;
esengun@aybu.edu.tr)

²Civil Engineering Department,
Faculty of Engineering, Ankara
University, Ankara, 06830,
Türkiye
(eozdogru@ankara.edu.tr;
ohsahin@ankara.edu.tr)

ABSTRACT

Context—This study experimentally evaluates the feasibility of using recycled concrete aggregates (RCA) obtained from construction and demolition waste (CDW) in roller-compacted concrete (RCC) pavements within the framework of national and international standards. Considering the environmental impacts and resource limitations associated with the extraction and processing of conventional natural aggregates, the utilization of RCA in infrastructure applications offers significant potential in terms of sustainability. However, the heterogeneous nature of RCA, the presence of adhered mortar, and their variable physical properties introduce performance uncertainties, particularly in durability-demanding applications such as road pavements. Therefore, comprehensive characterization of RA from different sources, assessment of their compliance with standard requirements, and identification of their practical utilization limits are of critical importance.

Objective—The primary objective of this study is to assess the technical applicability of RCA derived from CDW in RCC pavements, which have become increasingly widespread in Türkiye, in accordance with the Turkish RCC Pavement General Technical Specifications and aggregate requirements reported in the international literature. In addition, the study aims to identify threshold values of RCA in terms of durability-related and physical performance parameters.

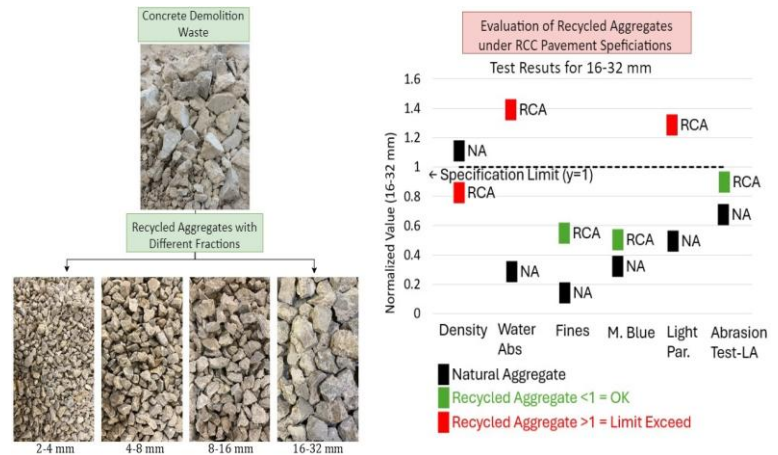
Method—RCAs obtained from different sources were subjected to comprehensive physical and chemical characterization, including particle size distribution, fines content, water absorption, bulk density, sulfate content, and organic matter content. Furthermore, Los

Angeles abrasion, freeze–thaw resistance, and sulfate soundness tests in accordance with ASTM C88 were conducted to evaluate the mechanical integrity and long-term durability potential of the aggregates. The experimental results were compared with relevant standard limits to determine the suitability of RCA for RCC pavement applications.

Results—The experimental findings indicated that RCA satisfied standard requirements in terms of organic matter and sulfate content. However, high water absorption capacity, low bulk density, and limited resistance to freeze–thaw and salt exposure were identified as major disadvantages. These deficiencies were primarily attributed to the porous microstructure of RCA and the presence of adhered mortar.

Conclusion—The results demonstrate that, rather than being entirely excluded from RCC pavements, RCA can be incorporated into pavement designs through appropriate particle size selection and controlled replacement ratios. This approach has the potential to reduce natural aggregate consumption, promote the recycling of construction and demolition waste, and contribute to lowering the carbon footprint of pavement systems. Future studies are recommended to further investigate the mechanical performance, long-term field behavior, as well as the environmental and economic impacts of RCC mixtures incorporating recycled aggregates.

Key Words—Aggregate specification, Recycled concrete aggregate, Roller-compacted concrete pavement, Sustainability.



Türkiye koşullarında beton atıklarından elde edilen geri dönüşüm agregalarının silindirle sıkıştırılmış beton yol kaplama şartnamesi açısından kullanılabilirliğinin değerlendirilmesi

Oula Aljumaili ¹, Yeşim Arslantürk ¹, Emine Özdoğru ², Oğuzhan Şahin ², Emin Şengün ¹

MAKALE BİLGİLERİ

Tarihler:

Geliş: 28.01.2026

Kabul: 22.05.2026

Doi:

10.65206/pajes.1873481

Sorumlu yazar:

Oğuzhan Şahin

(ohsahin@ankara.edu.tr)

Yazar adresleri:

¹ İnşaat Mühendisliği Bölümü,
Mühendislik ve Doğa Bilimleri
Fakültesi, Ankara Yıldırım Beyazıt
Üniversitesi, Ankara, 06010,
Türkiye
(olaaljumaili340@gmail.com;
yesimarslanturk@aybu.edu.tr;
esengun@aybu.edu.tr)

² İnşaat Mühendisliği Bölümü,
Mühendislik Fakültesi, Ankara
Üniversitesi, Ankara, 06830,
Türkiye
(eozdogru@ankara.edu.tr;
ohsahin@ankara.edu.tr)

ÖZ

Arka Plan—Bu çalışmada, inşaat ve yıkıntı atıklarından elde edilen geri dönüşüm agregalarının (GDA), Silindirle Sıkıştırılmış Beton (SSB) kaplamalarda kullanılabilirliği, ulusal ve uluslararası standartlar çerçevesinde deneysel çalışmalarla değerlendirilmiştir. Geleneksel olarak kullanılan doğal agregaların hem temini hem de hazırlanması sırasındaki çevresel etkileri ve kaynak kısıtları dikkate alındığında, GDA'ların altyapı uygulamalarında kullanımı sürdürülebilirlik açısından önemli bir potansiyel sunmaktadır. Bununla birlikte, GDA'ların heterojen yapısı, bağlı harç fazı içermesi ve değişken fiziksel özellikleri, özellikle yol üstyapıları gibi yüksek dayanıklılık gerektiren uygulamalarda performans açısından belirsizlikler oluşturmaktadır. Bu kapsamda, farklı kaynaklardan elde edilen GDA'ların mühendislik özelliklerinin kapsamlı şekilde analiz edilmesi, standartlara uygunluklarının belirlenmesi ve potansiyel kullanım sınırlarının ortaya konması büyük önem arz etmektedir.

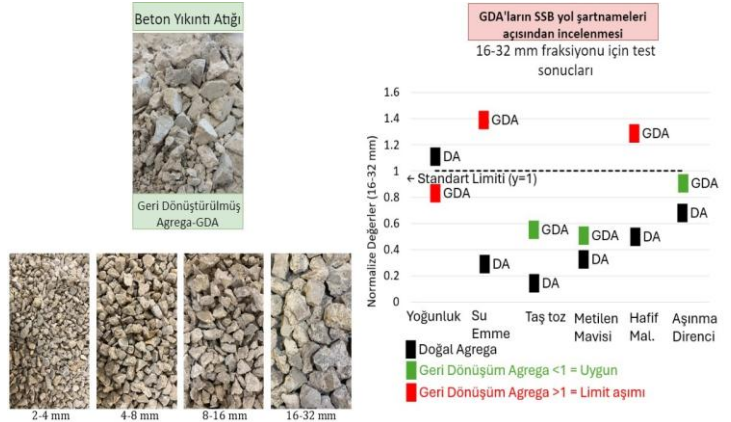
Amaç—Bu çalışmanın temel amacı, inşaat ve yıkıntı atıklarından elde edilen GDA'ların, Türkiye'de giderek yaygınlaşan SSB yol kaplamalarında, Türkiye SSB Yol Genel Teknik Şartnamesi ve uluslararası literatürde tanımlanan agrega gereklilikleri kapsamında teknik olarak kullanılabilirliğini değerlendirmektir. Ayrıca GDA'ların dayanıklılık ve fiziksel performans parametreleri açısından sınır değerlerini ortaya koymak hedeflenmiştir.

Yöntem—Farklı kaynaklardan temin edilen GDA'lar üzerinde tane dağılımı, ince malzeme miktarı, su emme oranı, birim hacim ağırlığı, sülfat içeriği ve organik madde muhtevasının belirlenmesi amacıyla kapsamlı fiziksel ve kimyasal analizler gerçekleştirilmiştir. Buna ek olarak Los Angeles aşınma deneyi, donma-çözünme dayanımı ve ASTM C88 kapsamında sülfat dayanıklılık deneyleri uygulanarak agregaların mekanik bütünlüğü ve uzun dönem performans potansiyeli değerlendirilmiştir. Elde edilen veriler, ilgili standart limitleriyle karşılaştırılarak GDA'ların SSB kaplamalarda kullanımına yönelik uygunluk analizi yapılmıştır.

Bulgular—Deneyel sonuçlar, GDA'ların organik madde ve sülfat içeriği bakımından standart gerekliliklerini sağladığını ortaya koymuştur. Buna karşılık, yüksek su emme kapasitesi, düşük birim hacim ağırlığı ve özellikle donma-tuz etkilerine karşı sınırlı dayanım sergilemeleri önemli dezavantajlar olarak belirlenmiştir. Bu olumsuzlukların, GDA'ların gözenekli mikro yapısı ve bağlı harç fazının varlığı ile ilişkili olduğu değerlendirilmiştir.

Sonuç—Çalışma kapsamında, GDA'ların SSB kaplamalarda tamamen dışlanması yerine, uygun tane fraksiyonları seçilerek ve kontrollü ikame oranları kullanılarak yol üstyapı tasarımlarında değerlendirilebileceği sonucuna varılmıştır. Bu yaklaşımın doğal agrega tüketimini azaltabileceği, inşaat ve yıkıntı atıklarının geri kazanımını teşvik edebileceği ve karbon ayak izinin düşürülmesine katkı sağlayabileceği öngörülmektedir. Ayrıca ileri çalışmalar kapsamında, GDA içeren SSB karışımlarının mekanik performansının, saha koşullarındaki uzun dönem davranışının ve çevresel ve ekonomik etkilerinin detaylı olarak araştırılması önerilmektedir.

Anahtar Kelimeler—Agrega şartnamesi, Geri dönüşüm agregası, Silindirle sıkıştırılmış beton yol kaplaması, Sürdürülebilirlik.



I. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Silindire sıkıştırılmış Beton (SSB) kaplamalar, taze halde iken silindire sıkıştırmaya imkân veren kuru katı kıvamları, görece düşük çimento ve su içerikleri, yüksek ince agrega oranları ve asfalt kaplamalara benzer serim-sıkıştırma prosedürleri sayesinde geleneksel beton yollara alternatif bir rijit üstyapı türü olarak öne çıkmaktadır. Ülkemizde SSB kullanılarak yapımı devam eden ve tamamlanan birçok baraj uygulaması da bulunmasına rağmen [1], erken trafiğe açılma, düşük bakım-onarım ihtiyacı ve uzun servis ömrü gibi avantajları nedeniyle son yıllarda hem dünyada hem de Türkiye’de sürdürülebilir yol kaplamaları bağlamında da sıklıkla gündeme gelmektedir. 1970’li yıllardan itibaren gelişen yol sıkıştırma ekipman teknolojilerine bağlı olarak Kanada ve Amerika Birleşik Devletleri’nde daha çok depolama ve liman sahaları, sanayi tesisleri, terminal ve lojistik alanları gibi ağır yüklere maruz saha uygulamalarında tercih edilmeye başlarken son yıllarda yol uygulamaları daha popüler hale gelmiştir. Ülkemizde 2009 yılından bu yana belediyeler ve il özel idarelerinin öncülüğünde uygulanan SSB yol kaplamalarının toplam uzunluğu 2023 yılı itibarıyla 5.000 km’yi aşmış [2], buna paralel olarak Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı (ÇŞİDB) tarafından 2020 yılında “SSB Yol Genel Teknik Şartnamesi” [3] yayımlanmış ve TÜRKÇİMENTO tarafından tasarım, üretim, serim-sıkıştırma, kür ve bakım gibi konularda çeşitli uygulama rehberleri hazırlanmıştır [4]-[7]. Diğer yandan, yoğun yapılaşma, kentsel dönüşüm projeleri, yol yapım-bakım faaliyetleri ve özellikle büyük depremler sonrası yıkımlar nedeniyle Türkiye’de her yıl çok yüksek miktarda inşaat ve yıkıntı atığı (İYA) oluşmaktadır. Avrupa Birliği (AB) verilerine göre, üretilen toplam atığın yaklaşık %25-%30’luk önemli bir kısmı İYA oluşturmaktadır. İYA bileşenlerinin yaklaşık olarak 404 milyon tonunun tuğla atığı ve 191 milyon tonunun ise beton atığı olduğunun raporlanması, Türkiye bina tipolojisi incelendiğinde öncelikli olarak yığma yapıların ve ardından betonarme binaların baskın olmasını destekler niteliktedir [8]. Buna ilaveten, Türkiye’nin son yaşadığı ve geniş ölçüde büyük bir yıkıma sebep olan 6 Şubat 2023 depremleri tahmini olarak 250 milyon ton civarında arasında bir İYA oluşmasına yol açmıştır [9]. Bu miktar Türkiye’nin yıllık ortalama hafriyat atığının katbekat fazladır ve çok büyük bir yönetim planı gerektirmektedir. İYA’ların kontrolsüz biçimde depolanması veya düşük katma değerli dolgu malzemesi olarak kullanılması; doğal kaynak tüketiminin artması, atık depolama alanı ihtiyacının büyümesi ve çevresel etkilerin yoğunlaşması gibi sorunları beraberinde getirmektedir. Buna ilaveten, inşaat sektörünün küresel ölçekte enerji ve doğal kaynak tüketiminin yaklaşık yarısından sorumlu tutulması CO₂ salımının düşürülmesi için ciddi çalışmalar gerektirmektedir. Buna karşılık, beton atıklarının geri dönüşüm agregası (GDA) veya çimento ikame malzemesi olarak değerlendirilmesi, hem doğal agrega (DA) ve klinker tüketiminin azaltılması hem de CO₂ salımının düşürülmesi açısından önemli bir potansiyel sunmaktadır.

Uluslararası literatürde, özellikle yol kaplamaları gibi yüksek hacimli ve görece daha düşük yapısal hassasiyet gerektiren uygulamalarda GDA’nın kullanılabilirliği, uygun oranlarda ikame edildiğinde performansın birçok durumda doğal malzemelerle rekabet edebilir düzeyde olduğu gösterilmiştir [10], [11]. Son yıllarda gerçekleştirilen deneysel çalışmalar, GDA’ların SSB üretiminde kullanılmasının teknik olarak mümkün olduğunu ve belirli oranlarda ikame durumunda mekanik performans açısından kabul edilebilir sonuçlar elde edilebildiğini göstermektedir. Örneğin, atık beton agregalarının iri agrega olarak kullanıldığı çalışmalarda, su emme ve aşınma direnci gibi temel fiziksel özellikler açısından yeterli homojenliğin sağlanabildiği ve bu malzemelerin SSB üretiminde yeniden değerlendirilebilir olduğu ortaya konmuştur [12]. Bununla birlikte, agreganın türü ve kalitesinin özellikle dayanıklılık performansını üzerinde belirleyici olduğu, farklı doğal agregalar kullanılarak üretilen SSB’lerde donma-çözünme dayanımının

önemli ölçüde değiştiği ve agrega tipinin performans üzerindeki kritik rolünü ortaya koyduğu rapor edilmiştir [13]. Ayrıca geri dönüştürülmüş agregalar ile üretilen alternatif bağlayıcı sistemlerde (örneğin alkali aktive sistemler), yüksek basınç dayanımı elde edilebilmesine rağmen, birim hacim ağırlık, su emme ve elastisite modülü gibi fiziksel özelliklerin malzeme performansını doğrudan etkilediği vurgulanmıştır [14]. Bu bulgular birlikte değerlendirildiğinde, özellikle SSB gibi yüksek agrega hacmine sahip sistemlerde, agreganın fiziksel ve dayanıklılık özelliklerinin performans üzerinde kritik bir rol oynadığı ve geri dönüştürülmüş agregaların kullanımının mutlaka bu parametreler çerçevesinde değerlendirilmesi gerektiği anlaşılmaktadır. Ancak Türkiye özelinde, SSB kaplamalarda GDA kullanımına ilişkin çalışmalar henüz sınırlı olup, özellikle 2020 yılında yayımlanan “SSB Yol Genel Teknik Şartnamesi”nde tanımlanan agrega kriterleri açısından GDA’ların sistematik olarak değerlendirilmesine yönelik bir boşluk bulunmaktadır. SSB kaplamalarda agrega hacminin oldukça yüksek olması ve karışımın kıvamı, yoğunluğu, dayanımı ve dayanıklılığı üzerinde belirleyici rol oynaması, GDA’ların yalnızca mekanik performans açısından değil, aynı zamanda ilgili teknik şartnamelerde tanımlanan sınır değerler çerçevesinde değerlendirilmesini gerekli kılmaktadır. Bu bağlamda, mevcut literatürde geri dönüştürülmüş agregaların kullanımına yönelik önemli çalışmalar bulunmasına rağmen, bu çalışmaların büyük bir kısmının doğrudan ulusal teknik şartnameler kapsamında sistematik bir uygunluk değerlendirmesi sunmadığı görülmektedir. Dolayısıyla, GDA’ların SSB kaplamalarda kullanımının şartname temelli bir yaklaşımla incelenmesi önemli bir araştırma ihtiyacı olarak ortaya çıkmaktadır.

Bu çalışmada, Türkiye’deki beton atıklarından elde edilen GDA’ların, SSB yol kaplama şartnamesinde tanımlanan agrega gereklilikleri açısından kullanılabilirliğinin araştırılması amaçlanmaktadır. Bu kapsamda, farklı kaynaklardan temin edilen GDA’lar üzerinde temel fiziksel özellikler, metilen mavisi, organik madde ve hafif madde içeriği, suda çözünen sülfat içeriği ve ince malzeme miktarı gibi standart agrega deneyleri gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın özgün yönü olarak, GDA tanelerinin yüzeyinde bulunan çimento hamuru miktarının tayinine, aşınma direncinin belirlenmesine, donma-çözünme etkisine karşı dayanıklılığın incelenmesine ve tuz etkisi altındaki stabilitenin değerlendirilmesine yönelik ilave deneyler de yapılmıştır. Elde edilen bulgular, GDA’ların SSB yol kaplama şartnamesi kapsamındaki uygunluk düzeyinin ortaya konulması ve SSB karışımlarında geri dönüştürülmüş agregaların kullanımına yönelik malzeme seçimi ve ön tasarım aşamalarına altyapısı sağlanması açısından önemli olacaktır.

II. SSB YOL KAPLAMALARINDA AGREGA GEREKLİLİKLERİ (AGGREGATE REQUIREMENTS FOR RCC PAVEMENTS)

SSB karışımlarında beton hacminin yaklaşık %85’ini agrega fazı oluşturmakta ve taze karışımın sıkışabilirliği, ayrışma potansiyeli, sertleşmiş betonun yoğunluğu, dayanımı, rötre davranışı, boşluk oranı, geçirimsizliği ve dayanıklılığı büyük ölçüde agrega özelliklerine bağlı olmaktadır. Bu nedenle ulusal ve uluslararası şartnameler, SSB (İngilizce kısaltması: RCC) uygulamalarında kullanılacak agregalar için hem gradasyon hem de fiziksel-dayanıklılık özellikleri açısından görece sıkı sınırlar tanımlamaktadır. Aşağıda önce Türkiye’de yürürlükte olan SSB Genel Teknik Şartnamesi, ardından Avrupa, İngiltere ve ABD kaynaklı SSB şartname/rehberleri özetlenmiş ve GDA açısından kritik görülen parametreler tartışılmıştır.

A. Türkiye SSB yol genel teknik şartnamesi (Turkish RCC road general technical specification)

SSB Yol Genel Teknik Şartnamesinde [3] SSB üretiminde kullanılacak agregaların, TS 706 EN 12620 [15] “Beton

agregaları” standardına uygun olması, doğal kum-çakıl ocaklarından veya taş ocaklarından temin edilmesi, elenip gerekiyorsa yıkanarak iri, orta ve ince olmak üzere en az üç fraksiyona ayrılıp ayrı ayrı stoklanması zorunlu tutulmaktadır. Metinde, agreganın beton hacmindeki yüksek payı vurgulanarak, SSB üretiminde sürekli gradasyona sahip karışımların verilen gradasyon zarflarının sağlanması gerektiği ifade edilmektedir. Şartnamede, SSB karışımlarında sürekli gradasyona sahip, asfalt betona benzer şekilde “hedeflendiği”; bu amaçla maksimum dane boyutuna (12.5 mm, 22.4 mm ve 31.5 mm) bağlı olarak farklı gradasyon zarflarının tanımlandığı ifade edilmektedir. Ayrıca şartnamede, maksimum dane boyutuna bağlı gradasyon zarfları tanımlanırken, 0.063 mm elek açıklığı için geçen malzeme oranı %0-7 aralığında sınırlandırılmakta; böylece hem yeterli ince malzeme ile sıkı paketlenme sağlanmakta hem de aşırı ince-reaktif tanelerin karışımında birikmesi engellenmektedir. Bununla birlikte, agregaların parçalanma direnci (≤ 30 -LA30), donma-çözünmeye dayanıklılığı (≤ 18 -MS18), iri ve ince su emme ($\leq \%2.0$ ve $\leq \%2.5$) ve birim hacim ağırlığı (≥ 2.55 g/cm³), yassılık indeksi (≤ 20 -FI20), kil topağı ve dağılabilen taneler (kütlece $\leq \%0.5$), metilen mavisi değeri (≤ 2.0), ve alkali-silika reaksiyonu potansiyeli (genleşme $\leq \%0.10$) özellikleri için de sınır değerler verilmekte; böylece hem mekanik performans hem de dayanıklılık açısından yüksek kaliteli agregalar istenmektedir. Şartnamede, agreganın kaynağı “doğal” ocak malzemesi olarak tanımlanmakta, GDA kullanımına ilişkin herhangi bir özel hüküm veya izin bulunmamaktadır. Bu durum, SSB uygulamalarında GDA kullanımının şu an için mevzuatta açıkça tanımlanmadığını ve bu konuda performansa dayalı ek çalışmalara ihtiyaç olduğunu göstermektedir. Bu çalışmada GDA’lar üzerinde gerçekleştirilen standart deneyler, söz konusu şartname maddeleriyle uyumlu olacak şekilde seçilmiş olup, limitler ve diğer ülke standartları ile karşılaştırmalar Tablo 1’de özetlenmiştir.

B. Uluslararası SSB şartnameleri ve rehberler (International RCC specifications and guidelines)

1. Avrupa Hazır Beton Birliği (ERMCO) - SSB rehberi (European Ready Mixed Concrete Organization (ERMCO) - RCC guideline)

Avrupa Hazır Beton Birliği (ERMCO) tarafından yayımlanan SSB yol rehberinde [16], SSB’nin geleneksel betona benzer bileşenler içerdiği, ancak agrega gradasyonunun ve oranının karışımın derhal yük alabilecek şekilde seçilmesi gerektiği vurgulanmaktadır. Rehber, agreganın genel olarak EN 12620 beton agregası standardına uygun olmasını ve özellikle iri

agregada yeterli parçalanma direnci ve şekil özelliklerini ön plana çıkarmaktadır [15]. Rehberde bazı endüstriyel uygulamalarda yüksek aşınma direncinin gerekli olduğu belirtilmekte ve bu amaçla iri agreganın Los Angeles kategorisinin LA40 olması gerektiği, bu sayede hem yüzey aşınma direncinin hem de arayüz geçiş bölgelerinde agrega kilitlenmesinin sağlanacağı ifade edilmektedir. Ayrıca, donma-çözünme dayanımı bakımından, betonun ilgili çevresel etki sınıfı (örneğin XF3-XF4) için yerel beton agrega şartlarının sağlanması gerektiği belirtilmekte; alkali-silika reaksiyonu ve benzeri kimyasal dayanıklılık konularında da mevcut beton standartlarının referans alınması önerilmektedir. Rehber, uygun kalite sağlanması hâlinde GDA kullanımının SSB uygulamalarında mümkün olabileceğini, özellikle mevcut kaplamanın kırılarak yeniden kullanıldığı durumlarda sürdürülebilirlik açısından önemli avantajlar sunduğunu vurgulamaktadır.

2. İngiltere Karayolları – SSB tasarım rehberi ve şartnamesi (UK Highways – RCC design guide and specification)

İngiltere Karayolları tarafından 2017 yılında yayımlanan SSB tasarım rehberi [17], ve şartnamesinde, yüksek hacimli ve yüksek hızlı yollar için kullanılacak SSB karışımları, İngiltere “Specification for Highway Works (SHW) Series 1000” kapsamında ele alınmakta ve agregalar için görece sıkı sınırlamalar getirilmektedir. Bu kapsamda:

- İri ve ince agregaların kırmataş olması istenmekte, dere agregaları gibi yuvarlak şekilli agregaların, sentetik üretimli ve geri kazanılmış agregaların kullanılmaması gereken malzemeler olduğu tanımlanmaktadır.
- İri agrega için parçalanma direnci LA35 kategorisine karşılık gelecek şekilde sınırlandırılmaktadır.
- Donma-çözünmeye karşı dayanıklılık için MgSO₄ dayanım kategorisi MS18 benimsenmekte; buna ek olarak, toplam sülfür içeriği S1 ile kimyasal dayanıklılık güvence altına alınmaktadır.
- İnce malzeme fraksiyonunun plastik olmaması gerektiği vurgulanmaktadır.
- Maksimum agrega dane boyutu 14 mm ve 20 mm için şartnamede gradasyon zarfları verilerek, sıkı paketlenmiş ve iyi sıkışabilen SSB karışımları hedeflenmiştir.
- 0.063 mm elekten daha ince malzemeler için izin verilen aralık %2-10 arasındadır. Ayrıca rehberde plastik olmaması şartıyla, %10’a kadar kullanımın daha yoğun matris elde edilmesine olanak sağlayacağı belirtilmiştir.

Tablo 1. SSB agrega kriterleri ve limit değerleri karşılaştırması.

Table 1. RCC aggregate criteria and comparison of limit values.

Özellik / Kriter	Türkiye SSB Yol Genel Tek. Şart.	Avrupa Birliği (ERMCO Rehberi)	İngiltere (Std. for Highway Works-SHW)	ABD (RCC Pav. Council)
Referans agrega standardı	TS 706 / EN 12620 [15]	EN 12620 [15]	SHW / BS/EN 13242 [17]-[22]	ASTM C33 / AASHTO M6/M80 [19]-[21]
GDA’ya yaklaşım	Açık yasak yok	Sürdürülebilirlik açısından destekleme	Yasak (yüksek hızlı yollar)	Standart bazlı, DOT onaylı ise
Maksimum dane boyutu	12.5 / 22.4 / 31.5 mm	≤ 20 mm	14 / 20 mm	12.5 / 19 / 25 mm
Parçalanma direnci (Los Angeles-LA)	LA ≤ 30	LA ≤ 40	LA ≤ 35	ASTM C33 + DOT onay (dolaylı)
Hava etkilerine dayanıklılık (MgSO ₄)	MS ≤ 18	XF3-XF4 uygun	MS ≤ 18	ASTM C33 + DOT onay (dolaylı)
Su emme oranı	İri Agr. $\leq \%2.0$ İnce Agr. $\leq \%2.5$	EN sınırları	BS/EN sınırları	ASTM C33 sınırları
Yassılık indeksi (FI)	FI ≤ 20	FI ≤ 20	BS/EN sınırları	ASTM C33 + DOT onay (dolaylı)
Plastisite / İnce malzeme temizliği	MB ≤ 2.0 g/kg	Silisli kum gibi sert ve dayanıklı ince malzeme	425 μ m altı malzeme plastik olmamalıdır	PI ≤ 5
İnce malzeme (taş toz) limiti	%0-7 (0.063 mm elek)	EN 12620	%2-10 (0.063 mm elek)	%0-8 (0.075 mm elek)
Diğer özel şartlar	Kil topağı $\leq \%0.50$ Yoğunluk ≥ 2.55 g/cm ³ ASR $\leq \%0.10$	Donma-çözülme direnci	Sülfat direnci	Detaylı SSB yoğunluk kontrolü

Bu rehber, özellikle otoyol standardında, yüksek hız ve ağır trafik altında hizmet verecek SSB kaplamalar için agrega seçiminde oldukça korumacı bir yaklaşım sergileyerek, GDA ve sentetik agregaların kullanılmasına izin vermemiştir.

3. Amerikan SSB yol konseyi şartnamesi (American RCC pavement council specification)

Amerikan SSB yol konseyi tarafından 2021 güncel versiyonlu yayımlanan şartnamede [18], ABD ve Kanada'daki uygulamalar için model bir teknik şartname niteliği taşımakta ve agrega özelliklerini büyük ölçüde mevcut beton agregası standartlarına dayandırmaktadır. Bu kapsamda:

- İnce ve iri agregalar için AASHTO M6 [19], (Portland çimentosu betonu için ince agrega) ve AASHTO M80 [20], (hidrolik çimento betonu için iri agrega) standartlarına atıf yapılmakta; ASTM C33 [21] beton agregası ile uyumlu bir kalite hedeflenmektedir.
- Şartnamede, maksimum dane boyutu 12.5 mm, 19.0 mm ve 25.0 mm olan üç farklı SSB karışımı için birleşik agrega gradasyon zarfları tanımlanmakta; No. 200 (75 µm) eleğinden geçen malzeme oranı her üç durumda da %0-8 aralığında sınırlanmaktadır.
- İnce fraksiyonun kalitesi açısından kritik bir kriter olarak, agrega plastisite indeksinin (PI) 5'i geçmemesi gerektiği ifade edilmekte, "PI > 5 olan agregaların kullanılmaması" net bir şart olarak verilmektedir.
- Şartnamede, genel kalite kriterlerinin yerel idarenin (DOT vb.) onaylı beton agrega listeleri veya ilave laboratuvar/deneme kesiti performans verileri ile sağlanması gerektiği belirtilmektedir.

Bu rehberde agreganın dayanıklılık ve şekil özellikleri açısından AASHTO/ASTM beton agregası gerekliliklerini esas almakta; gradasyon ve plastisite sınırları ile de SSB'nin sıkıştırılabilir, ayırmaya dirençli ve düşük rötreli bir yapı sergilemesini hedeflemektedir.

C. GDA açısından kritik parametreler (Critical parameters for RCAs)

SSB uygulamalarında agrega kriterleri; ülkelerin yaklaşımı, hedeflenen kullanım alanları ve çevresel önceliklerine bağlı olarak farklılık göstermektedir. İngiltere, yüksek hızlı ve yüksek hacimli yollar için en korumacı tutumlardan birini benimseyerek GDA ve sentetik agregaların kullanımına izin vermezken, ERMCO SSB'yi sürdürülebilir bir çözüm olarak konumlandırmakta ve uygun kalite sağlanması hâlinde geri dönüştürülmüş malzeme kullanımını teşvik etmektedir. Türkiye ve ABD ise bu konuda açık bir beyan koymadan malzeme performansına odaklanmışlardır.

Tablo 1'de özetlenen şartnameler birlikte değerlendirildiğinde, agregalardan genel olarak; düşük Los Angeles aşınma değeri, donma-çözünmeye karşı yeterli dayanıklılık, düşük su emme ve yüksek birim hacim ağırlık, yassı/uzun tanelerin sınırlanması, kil topağı, aktif ince malzeme ve plastisitenin düşük tutulması, sülfat/sülfür ve ASR riskinin kontrolü ile maksimum dane boyutuna bağlı, sürekli ve yoğun bir gradasyonu sağlaması beklenmektedir. Bu çerçevede, ince malzeme içeriğinin kontrolü hem dayanıklılık hem de kompaksiyon açısından kritik olup, Türkiye SSB Genel Teknik Şartnamesi'nde 0.063 mm elek açıklığı için geçen malzeme oranı %0-7 aralığında sınırlanmaktadır; benzer şekilde, İngiltere SSB rehberinde 0.063 mm eleğinde %2-10, ABD şartnamesinde ise No. 200 (75 µm) eleğinde %0-8 aralığı tanımlanmaktadır. Böylece farklı şartnameler için, karışımda yeterli miktarda ince malzeme bulundurulurken, aşırı ince ve çoğu zaman reaktif/plastik karakterde olabilecek tanelerin birikmesinin önlenmesi hedeflenmektedir.

Teknik kriterler açısından Türkiye, agrega sertliği ($LA \leq 30$) bakımından en yüksek kaliteyi talep ederken, ince malzeme oranını 0.063 mm elek için %0-7 ile sınırlayarak en katı şartnamelerden biri olmuştur. ERMCO ise maksimum dane

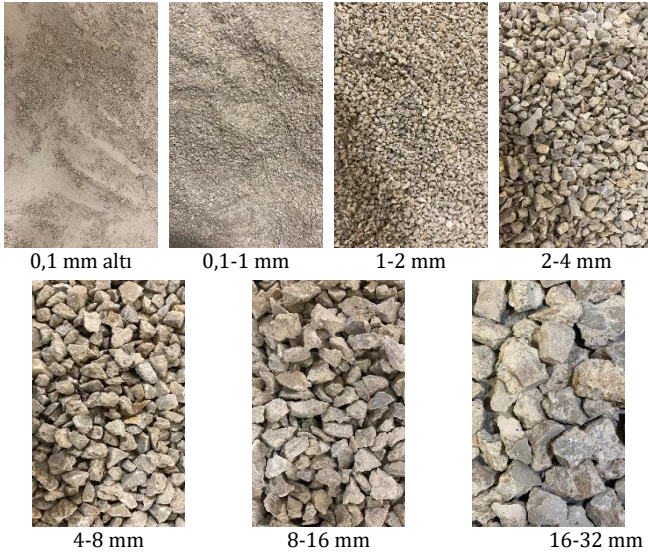
boyutunu 20 mm ile sınırlandırıp aşınma direncini ($LA \leq 40$) daha esnek tutarak özellikle endüstriyel saha uygulamaları için ekonomik çözümleri öne çıkarmaktadır. SSB'nin performansının büyük ölçüde sıkıştırmaya bağlı olması nedeniyle kompaksiyon kriteri her şartname ve rehberde kritik bir parametre olarak ele alınmıştır. Türkiye'de SSB yol kaplamalarında, titreşimli tokmak referans alınarak belirlenen maksimum yaş birim hacim ağırlığın en az %96'sına ulaşılması istenirken, ERMCO rehberinde bu sınır %98 ve üzeri olarak tanımlanmaktadır. İngiltere'nin yaklaşımı ise, sayısal bir yoğunluk yüzdesinden ziyade kullanılan ekipman teknolojisine ve deneme sahasındaki performans odaklanmakta; normal asfalt finişer ve silindirlerinin yeterli olmadığını, mutlaka yüksek yoğunluklu sıkıştırma tablalarının kullanılması gerektiğini vurgulamaktadır. ABD şartnamesi, sıkıştırma kontrolü açısından en ayrıntılı kriterleri vererek, yol gövdesi ve derz kenarları için sırasıyla en az %98 ve %96'lık yoğunluk oranlarını (modifiye Proktor referans alınarak) şart koşmakta ve İngiltere'ye benzer biçimde yüksek yoğunluklu sıkıştırma ekipmanlarının kullanımını zorunlu tutmaktadır. Yoğunlukla birlikte, birincil kalite kontrol parametresi olarak minimum dayanım değerleri de şartnamelerde yer almakta; Türkiye ve ERMCO rehberine göre SSB yol kaplamaları için 28 günlük karakteristik basınç dayanım sınıfı en az C30/37 iken, ABD şartnamesi en az 31 MPa (4500 psi) basınç dayanımı istemekte, İngiltere'de ise yüksek trafik hacimli yollar için C40/50 beton sınıfı hedeflenmektedir.

Bu çalışma kapsamında, İYA'lardan elde edilen GDA'ların SSB yol kaplama şartnamesi açısından kullanılabilirliğinin değerlendirilebilmesi için öncelikle GDA'lardan beklenen tipik özelliklerin mevcut ulusal ve uluslararası şartnameler ışığında ortaya konulması gerekmektedir. Tüm parametreler arasında özellikle su emme ve birim hacim ağırlığı, Los Angeles değeri, yapılmış çimento hamuru miktarı, aşınma direnci ve donma-çözünme ile tuz etkisi altındaki stabilite öne çıkmaktadır. GDA'larda artık çimento hamuru nedeniyle su emmenin artması ve yoğunluğun düşmesi, hem taze karışımın kıvam ve kompaksiyon davranışını hem de sertleşmiş betonun mekanik ve dayanıklılık performansını doğrudan etkileyebilmektedir. Bu çalışmada, Türkiye'deki beton atıklarından elde edilen GDA'lar üzerinde gerçekleştirilen standart agrega deneyleri ile ulusal SSB şartnamesinin ilgili limitleri kontrol edilmekte; ilave olarak, GDA taneleri üzerindeki çimento hamuru miktarı, aşınma direnci, donma-çözünme dayanıklılığı ve ASTM C88 kapsamındaki tuz etkisi altındaki stabilite deneyleri ile, GDA'ların SSB kaplamalarda kullanımı açısından ulusal ve uluslararası şartnamelerde özetlenen performans beklentilerini sağlayıp sağlayamadığı tartışılmaktadır.

III. YÖNTEM (METHOD)

A. Malzemeler (Materials)

Bu çalışmada ilk olarak Ankara'da bulunan iki farklı lokasyondan beton atığı numuneleri temin edilmiştir. Agrega özelliklerinin büyük ölçüde kaynak betonun (parent concrete) niteliklerine bağlı olduğu göz önünde bulundurularak, saha temsil kabiliyetini artırmak amacıyla atıklar sahaların farklı bölgelerinden toplanmıştır. Söz konusu beton atıkları, laboratuvar ortamına getirildikten sonra öncelikle birincil kırıcı ile daha küçük parçalara ayrılmış, ardından çene kırıcı kullanılarak, farklı tane boyutlarını içeren karışık agrega elde edilmesine imkân verecek şekilde ikinci bir kırma işlemine tabi tutulmuştur. Kırma işlemini takiben elde edilen GDA'lar manuel karıştırma yoluyla harmanlanarak homojen bir karışım yığını haline getirilmiştir. Sonrasında ise söz konusu karışım yığını ASTM C136 [23] standardına göre elek analizi ile sınıflandırılmış ve tane boyutuna bağlı olarak yedi fraksiyon altında gruplandırılmıştır (Şekil 1): < 0.10 mm, 0.10-1.00 mm, 1.00-2.00 mm, 2.00-4.00 mm, 4.00-8.00 mm, 8.00-16.00 mm ve 16.00-32.00 mm (ASTM C136 [23]). Bu sınıflandırma ile, hem standart agrega deneylerinde



Şekil 1. Yıkım sahalarından toplanmış beton atığı ve GDA'lar.

Figure 1. Concrete waste and GDAs collected at demolition sites.

kullanılacak numunelerin hazırlanması hem de GDA'ların tane boyutuna bağlı davranışlarının ayrı ayrı değerlendirilebilmesi amaçlanmıştır. Çalışmada kontrol numunesi olarak ülkemizde beton üretiminde yaygın olarak tercih edilen kireçtaşının konkasörlerde kırılmasıyla elde edilen kırmataş tipi doğal agregre kullanılmıştır.

B. Deneysel yöntem (Experimental methods)

Tablo 2'de özetlenen deney programı, GDA'ların SSB Yol Genel Teknik Şartnamesi ile uluslararası SSB şartname/rehberlerinde özetlenen agregre gereklilikleri açısından sistematik olarak değerlendirilmesini sağlayacak şekilde kurgulanmıştır. Öncelikle, farklı fraksiyonlara ayrılan GDA'lar üzerinde temel fiziksel özellikler (birim hacim ağırlık, su emme), metilen mavisi deneyi, organik madde içeriği, hafif madde içeriği, suda çözünen sülfat içeriği ve ince malzeme miktarı gibi standart agregre deneyleri gerçekleştirilmiş; böylece GDA'ların temizlik, dayanıklılık ve granülometrik uygunluk seviyeleri ortaya konulmuştur. Bununla birlikte, GDA'ların özgün yapısal özelliklerini ve SSB uygulamalarındaki potansiyel kısıtları daha iyi irdeleyebilmek amacıyla, çalışmaya ek deneyler de dâhil edilmiştir. Bu kapsamda GDA taneleri yüzeyinde bulunan çimento hamuru miktarının tayini, aşınma direncinin belirlenmesi, donma-çözünme etkisine karşı dayanıklılığın incelenmesi ve ASTM C88 kapsamında tuz etkisi altındaki stabilite değerlendirilmesi hedeflenmiştir. Elde edilen tüm deney sonuçları, hem Türkiye SSB şartnamesinde tanımlanan sınır değerler hem de ERMCO, İngiltere Karayolları ve

ABD SSB Yol Konseyi belgelerindeki kriterler ile karşılaştırılarak, GDA'ların SSB yol kaplamalarında kullanılabilirliği şartname temelli bir bakış açısıyla tartışılmıştır. Genel olarak deneysel çalışmalar tekrarlı olarak gerçekleştirilmiş ve değişim katsayısı değerleri %15'in altında belirlenmiştir.

IV. TARTIŞMA ve SSB ŞARTNAMESİ KAPSAMINDA DEĞERLENDİRME (DISCUSSION and EVALUATION WITHIN THE CONTENT OF RCC SPECIFICATION)

A. GDA'ların fiziksel ve granülometrik özellikleri (Physical and gradation properties of RCAs)

Harç ve beton karışımlarında kullanılan agregaların birim hacim ağırlığı, boşluk oranı ve su emme değerleri, taze karışımın işlenebilirliği ile sertleşmiş malzemenin mekanik ve durabilite performansını doğrudan etkilemektedir. Bu nedenle, SSB karışımlarında kullanılabilecek GDA'nın fiziksel özelliklerinin DA ile karşılaştırmalı olarak belirlenmesi kritik öneme sahiptir.

Bu çalışmada, farklı tane boyut aralıklarına sahip GDA ve DA fraksiyonlarının birim hacim ağırlığı ve su emme değerleri TS EN 1097-6 [24] standardına göre tayin edilmiştir. Her bir fraksiyon için temsili numuneler 110 ± 5 °C'de sabit kütleye ulaşmaya kadar etüve kurutulmuş, soğutulduktan sonra iri agregalar için (>4 mm) 2000 g, ince agregalar için (<4 mm) ise 500 g'lık numuneler üzerinde ölçümler ilgili standartta verilen piknometre metodu kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Agregalar piknometreye alındıktan sonra içerisine su ilave edilerek hava boşluklarının giderilmesi sağlanmış, piknometre ağızına kadar su ile doldurulmuş ve agregaların suya doygun hâle gelmesi için 24 saat bekletilmiştir. Bu sürenin sonunda numuneler suya doygun ve yüzeyi kuru (SDYK) duruma getirilerek tartılmış, ardından etüve tekrar kurularak fırın kurusu kütleleri elde edilmiştir. İlgili yoğunluk ve su emme değerleri, TS EN 1097-6'da verilen prosedür takip edilerek hesaplanmıştır. GDA ve DA'lara ait farklı tane boyutlarındaki fiziksel özellikler Tablo 3'te özetlenmiştir. Bu tablo incelendiğinde, tüm tane boyutları için GDA'ların gerek görünür gerekse fırın kurusu tane yoğunluğu değerlerinin DA'lara kıyasla belirgin biçimde daha düşük, su emme oranlarının ise özellikle ince fraksiyonlarda anlamlı ölçüde daha yüksek olduğu görülmektedir. Bu durum, GDA taneleri üzerinde bulunan yapışmış çimento hamurunun gözenekli yapısı ve kırma işlemleri sırasında bu kısımda oluşan mikro çatlakların bir sonucu olarak değerlendirilebilir [30]. Çimento hamurunun kapiler boşlukları ile boyutlandırma sürecinde gelişen mikro çatlaklar birlikte GDA'ların yoğunluğunu düşürmekte ve su emme kapasitesini artırmaktadır [31]. Tablo 3'te listelenen ve yorumlanan bu özellikler, GDA'ların beton veya harç karışımlarında kullanılması durumunda DA'ya kıyasla farklı bir taze karışım davranışı ortaya koymasına neden olmaktadır.

Tablo 2. Çalışmaya ait deney programı.

Table 2. Experimental program for the study.

Deney Adı	Standart / referans	Ölçülen büyüklük / amaç	İlgili şartname parametresi
Tane boyut dağılımı (elek analizi)	ASTM C136 [23]	Gradasyon, 0.063 mm altı ince malzeme oranı	Gradasyon zarfları, ince malzeme sınırları
Birim hacim ağırlık ve su emme	TS EN 1097-6 [24]	Yoğunluk, su emme oranı	Yoğunluk ve su emme limitleri
Metilen mavisi deneyi	TS EN 933-9 [25]	Aktif kil/ince malzeme miktarı	Metilen mavisi (MB) sınırı
Organik madde içeriği	TS EN 1744-1 [26]	Organik kirlenme düzeyi	İnce agregre kalitesi
Hafif madde içeriği	TS EN 1744-1 [26]	Hafif/gevrek tane oranı	Kil topağı / dağılabilen tanelerle ilişkili
Suda çözünen sülfat içeriği	TS EN 1744-1 [26]	Sülfat iyonu konsantrasyonu	Sülfat / sülfür içerik sınırları
Aşınma direnci (Los Angeles deneyi)	TS EN 1097-2 [27]	Los Angeles aşınma değeri	LA limitleri
Donma-çözünme dayanıklılığı	ASTM C666 [28]	Kütle kaybı, donma-çözünme etkisine karşı dayanıklılık	Donma-çözünme dayanımı (MS18 ile ilişkili)
Tuz etkisi altındaki stabilite (Na ₂ SO ₄)	ASTM C88 [29]	Kimyasal etki altında kütle kaybı / parçalanma	Kimyasal dayanıklılık, sülfat etkisiyle ilişkili
Çimento hamuru kaplama miktarının tayini	Laboratuvar yöntemi	GDA taneleri üzerindeki yapışmış harç oranı	Su emme-yoğunluk ile ilişkili, GDA özgünlüğü

Tablo 1. GDA ve DA'ların tane boyutuna bağlı özellikleri.**Table 1.** Physical properties of RCA and NA with respect to grain size.

Agrega tipi	Tane boyutu aralığı (mm)	Görünür tane yoğunluğu (g/cm ³)	Fırın kuru tane yoğunluğu (g/cm ³)	SDYK tane yoğunluğu (g/cm ³)	Su emme (%)
GDA	16-32*	2.67	2.41	2.53	2.93
	8-16	2.65	2.37	2.48	4.38
	4-8	2.63	2.33	2.44	5.00
	2-4	2.51	2.08	2.25	8.30
	1-2	2.45	2.02	2.19	8.74
DA	16-32	2.84	2.83	2.83	0.18
	8-16	2.71	2.71	2.72	0.28
	4-8	2.81	2.77	2.78	0.52
	2-4	2.85	2.78	2.81	0.88
	1-2	2.53	2.12	2.28	4.00

* Tam bir homojenite sağlamak amacıyla ilgili deneyler çalışma sürecinde genişletilmiş bir numune setiyle yinelenmiştir.

Özellikle ince fraksiyonlarda su emme değerlerinin %10'a yaklaşması, GDA içeren sistemlerde karışım suyunun önemli bir kısmının agrega tarafından tutulmasına ve buna bağlı olarak işlenebilirliğin azalmasına yol açabilmektedir. Bu nedenle, GDA kullanımı durumunda karışım suyunun "su düzeltmesi" ile ayarlanması veya agregaların ön ıslatma/SDYK durumda kullanılması büyük önem taşımaktadır. Sonuç olarak DA fraksiyonlarının birim hacim ağırlık ve su emme açısından SSB şartnamesinde öngörülen yoğunluk ($\geq 2.55 \text{ g/cm}^3$) ve su emme ($\leq 2.0-2.5$) limitlerini karşıladığını, buna karşılık GDA fraksiyonlarında daha düşük yoğunluk ve özellikle ince fraksiyonlarda şartname sınırlarının belirgin biçimde üzerinde su emme değerleri elde edildiğini, haliyle GDA'ların doğrudan ve yüksek oranlarda kullanılabilmesi için ilave iyileştirme veya karışım optimizasyonu gerektirdiğini göstermektedir.

Agregada 75 μm 'den küçük (No. 200 elekten geçen) aşırı ince malzeme miktarı, çimento hamurunun su ihtiyacını artırarak işlenebilirliği ve dayanımı olumsuz etkileyebilmekte; ayrıca bağ yüzeyinde zayıf bir tabaka oluşturarak agrega-pasta aderansını düşürebilmektedir. Bu nedenle, GDA ve DA fraksiyonlarında ince malzeme içeriği ASTM C117 [32] standardına göre belirlenmiştir. Deneyde, farklı dane boyutu aralıklarındaki agrega yığınları 75 μm 'lik elekte bol su ile yıkanmış, agregaların gözeneklerine suyun nüfuzu ve ince malzemenin uzaklaştırılabilmesi için numuneler su içinde 24 saat bekletilmiştir. Süre sonunda suyu süzülen agregalar tekrar No.200 elekte yıkanmış, $110 \pm 5^\circ \text{C}$ 'de sabit kütleye ulaşınca kadar etüvde kurutulup soğutulduktan sonra tartılmıştır. Başlangıçtaki kuru kütle ile deney sonrası kuru kütle farkından yararlanılarak, her fraksiyon için 75 μm 'den küçük malzeme oranı hesaplanmıştır. Elde edilen değerler Tablo 4'te verilmiştir. Bu tablodan görüldüğü üzere tüm tane boyutlarında GDA fraksiyonlarının DA fraksiyonlarına kıyasla önemli ölçüde daha yüksek ince malzeme içerdiği görülmektedir. Bu durum, kırma ve eleme işlemleri sırasında hasar gören çimento pastasının daha kolay tozlaşması ve daha iri fraksiyonların yüzeyinde ince partiküller hâlinde birikmesiyle açıklanabilir. Elde edilen ince malzeme oranları, Türkiye SSB Genel Teknik Şartnamesi'nde 0.063 mm eleği için verilen %0-7 sınırı ile karşılaştırıldığında hem GDA hem de DA fraksiyonlarının şartname limitleri içinde kaldığı, ancak GDA'larda değerlerin

DA'ya göre belirgin biçimde yüksek olması nedeniyle işlenebilirlik, su ihtiyacı ve katkı dozajlarının daha hassas kontrol edilmesi gerektiğine işaret etmektedir.

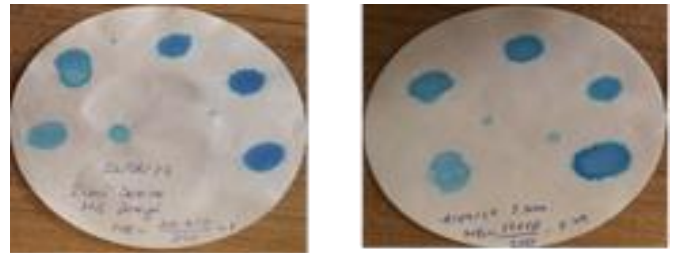
B. GDA'ların kimyasal ve dayanıklılık özellikleri (Chemical and durability properties of RCAs)

1. İnce malzeme kalitesi ve kimyasal özellikleri (Fine material quality and chemical properties)

GDA'ların SSB karışımlarında kullanılabilirliğinin değerlendirilmesinde, yalnızca tane boyutu ve yoğunluk gibi fiziksel özellikler değil, ince malzemenin tipi ve reaktivitesi ile agregada bulunan organik, hafif ve sülfat içeren bileşenler de belirleyici rol oynamaktadır. Bu kapsamda GDA ve referans DA üzerinde metilen mavisi deneyi, organik madde tayini, hafif madde içeriği tayini ve suda çözünebilir sülfat içeriği tayini gerçekleştirilmiştir.

Metilen mavisi deneyi (TS EN 933-9 [25]), agregada bulunan kil ve kil benzeri, yüksek yüzey alanlı ince taneli minerallerin miktarını ve aktivitesini belirlemek amacıyla uygulanmıştır. 0-2 mm fraksiyonundaki numuneler üzerinde yürütülen deneyler sonucunda (Şekil 2), GDA için metilen mavisi değeri 1.00 mL/g, DA için ise 0.75 mL/g olarak elde edilmiştir. Her iki değer de ilgili standart ve SSB şartnamesinde verilen sınırların altında olmakla birlikte, GDA'nın daha yüksek MB değerine sahip olması, yüzeyinde daha fazla aktif ince malzeme ve kil benzeri partikül bulunduğuna işaret etmektedir. Bu durum, GDA kullanılan karışımlarda su/bağlayıcı oranı ve kimyasal katkı dozajlarının doğal agregaya göre daha hassas kontrol edilmesini gerektiren bir parametre olarak öne çıkmaktadır.

Organik madde içeriği tayini, agregada humus, kök, bitkisel artık vb. organik safsızlıkların varlığını ve bunların çimento hidrasyonu üzerindeki olası olumsuz etkilerini değerlendirmek amacıyla gerçekleştirilmiştir. 4 mm altı fraksiyonda, NaOH çözeltisi ile renk karşılaştırmasına dayalı yöntem kullanılmış; GDA ve DA numunelerinin her ikisinde de 24 saatlik temas sonrasında çözeltide belirgin bir renk koyulaşması veya



Şekil 2. TS EN 933-9 [25] standardına göre GDA (sol) & DA (sağ) deney sonuçları.

Figure 2. RCA (left) & NA (right) experiment results in reference to TS EN 933-9.

Tablo 4. DA ve GDA'lar için 75 μm 'den küçük malzeme içeriği**Table 4.** Material content for smaller than 75 μm for NA and RCA

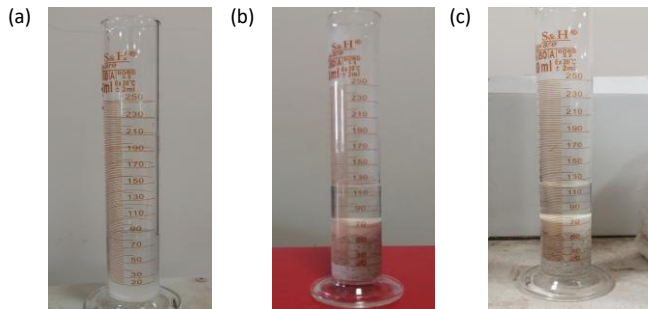
Agrega tipi	Tane boyutu aralığı (mm)	75 μm 'den küçük malzeme içeriği (%)
GDA	16-32	1.92
	8-16	1.88
	4-8	2.21
DA	16-32	0.42
	8-16	0.71
	4-8	0.29

farklılaşma gözlenmemiştir. Bu sonuç, her iki agregada türünde de anlamlı düzeyde organik madde bulunmadığını göstermekte ve GDA'nın bu açıdan DA'ya benzer bir performans sergilediğini ortaya koymaktadır (Şekil 3).

Hafif madde içeriği tayini ile agregada düşük özgül ağırlığa sahip, genellikle zayıf veya gevrek karakterli tanelerin oranı belirlenmiştir. 4 mm altı fraksiyonda, Şekil 4'te görülen çinko klorür ($ZnCl_2$) çözeltisi ile yoğunluk farkına dayalı ayırma yöntemi kullanılarak yapılan deneyler sonucunda DA için hafif madde içeriği %2.63, GDA için ise %6.25 olarak bulunmuştur. GDA'daki bu daha yüksek oran, yapısındaki yapışmış harç parçacıkları ve gözenekli kırıntılarının varlığı ile uyumludur ve GDA içeren karışımlarda birim hacim ağırlık, mekanik dayanım ve dayanıklılık açısından dikkate alınması gereken bir husus olarak değerlendirilmelidir.

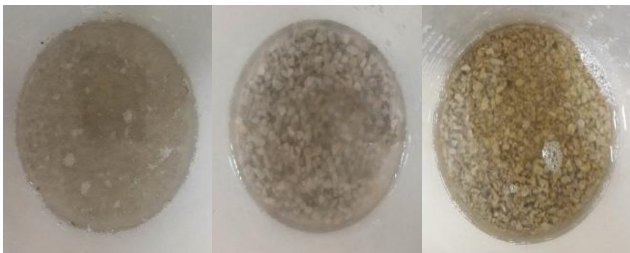
Son olarak, suda çözünebilir sülfat içeriği tayini ile agregalarda su ile temas ettiğinde çözünebilir sülfat tuzlarının miktarı araştırılmıştır. İnce agregada fraksiyonları üzerinde yapılan deneylerde, ekstraksiyon sonrası elde edilen süzöntü HCl ile asitleştirilmiş, ısıtılmış ve $BaCl_2$ çözeltisi ilavesiyle sülfat iyonlarının çökmesi hedeflenmiştir. Ancak gerek GDA gerekse DA numunelerinde gözle görülür bir çökelti oluşmamış; bu nedenle her iki agregada türünde de suda çözünebilir sülfat içeriği, tespit edilebilir seviyenin altında olarak değerlendirilmiştir. Bu sonuç, agregaların sülfat saldırısı açısından ilave bir risk oluşturmadığını ve SSB şartnamesinde öngörülen kimyasal dayanıklılık gereklilikleriyle uyumlu olduğunu göstermektedir.

Genel olarak, bu dört deneyin bulguları birlikte ele alındığında; GDA'ların organik madde ve sülfat içeriği bakımından DA ile benzer ve şartname açısından kabul edilebilir düzeyde, buna karşılık aktif ince malzeme miktarı (MB değeri) ve hafif madde oranı bakımından daha olumsuz bir profile sahip olduğu söylenebilir. Bu tablo, GDA kullanımını tamamen dışlamamakta; ancak SSB karışımlarında GDA kullanım oranının, tane boyutu seçiminin ve karışım tasarımı su/bağlayıcı-katkı dengesinin, özellikle ince malzeme kalitesi dikkate alınarak dikkatle optimize edilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır.



Şekil 3. Organik madde tayini: (a) NaOH çözeltisi, (b) GDA eklenmiş NaOH çözeltisinin 24 saat sonundaki renk değişimi, (c) NA eklenmiş NaOH çözeltisinin 24 saat sonundaki renk değişimi.

Figure 3. Determination of organic matter (a) NaOH solution (b) color change of the RCA added solution at the end of 24 hours (c) color change of the NA added solution at the end of 24 hours.



Şekil 4. Agregaların $ZnCl_2$ çözeltisi ile yıkanma aşamaları.

Figure 4. Stages of washing aggregates with $ZnCl_2$.

2. Mekanik ve çevresel dayanıklılık özellikleri (Mechanical and environmental durability properties)

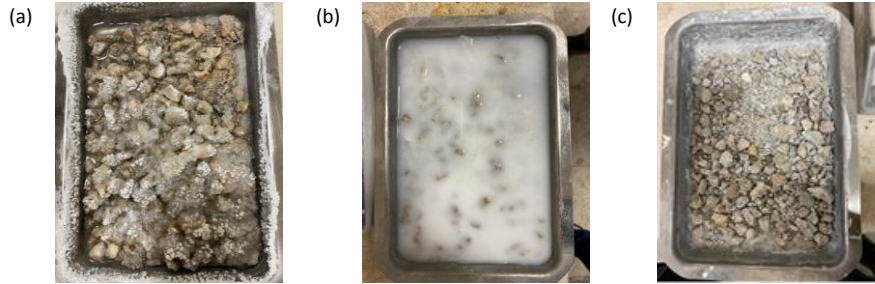
GDA'ların SSB yol kaplamalarında kullanılabilirliğinin gerçekçi biçimde değerlendirilebilmesi için, yalnızca fiziksel ve kimyasal özellikleri değil, mekanik aşınma direnci ile tuz-donma etkisi altındaki davranışı da dikkate alınmalıdır. Bu kapsamda GDA ve DA üzerinde Los Angeles aşınma deneyi ile tuz esaslı donma-çözünme ve tuz kristalleşmesi testleri uygulanmıştır.

Agregaların parçalanma/aşınma direncinin belirlenmesi amacıyla, 4-8 mm, 8-16 mm ve 16-32 mm fraksiyonlarındaki GDA ve DA numuneleri üzerinde TS EN 1097-2 [27] standardına göre Los Angeles aşınma deneyi gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda, yüzey tozlarından arındırılan ve 110 ± 5 °C'de tamamen kurutulmuş agregalar, standartta tarif edilen bilye sayısı ve numune kütlesi kullanılarak tamburda 500 devir döndürülmüş; deney sonrası yapılan elek analizi ile her fraksiyon için LA katsayıları hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar Tablo 5'te verilmiştir. Bu tablodan görüldüğü üzere, her bir tane boyutu aralığında doğal agreganın LA katsayıları GDA'ya kıyasla daha düşük çıkmıştır. GDA için LA katsayıları 21-27 aralığında değişirken DA için 18-20 aralığında değerler elde edilmiştir. Özellikle 16-32 mm GDA fraksiyonunda LA = 27 değeri, diğer GDA fraksiyonlarına göre daha yüksek olup, bu fraksiyonun mekanik aşınmaya daha hassas olduğunu göstermektedir. Deney sonrası gradasyon analizleri, her fraksiyonda eşdeğer dane boyutu aralığında kalan agregada oranının DA için GDA'ya kıyasla daha yüksek olduğunu ortaya koymuştur. Bu durum, özellikle iri GDA tanelerinde yapışmış çimento pastası ve kırılma sürecinde oluşan mikro çatlakların varlığı nedeniyle parçalanma eğiliminin arttığını göstermektedir. Başka bir ifadeyle, GDA taneleri üzerindeki zayıf harç zonları, agreganın "taşıyıcı çekirdeğine" göre daha erken hasar almakta ve bu da LA kütle kaybını artırmaktadır. Buna karşın 4-8 mm ve 8-16 mm GDA fraksiyonlarının LA değerleri, beton ve yol altyapısı için TS EN 13242'de [22] ve SSB şartnamesinde öngörülen sınırlar ile genel olarak uyumludur. 16-32 mm GDA fraksiyonunda da sınır değeri LA30'a yakın değer elde edilmiştir.

Donma-çözünme etkisine benzer şekilde agregaların yapısındaki boşluklarda hacimsel genleşme kaynaklı hasar potansiyeli açısından kritik önem arz eden maddelerin varlığındaki davranışının belirlenmesi amacıyla literatürde farklı metotlar uygulanmaktadır. Çeşitli tuzların kullanıldığı test metotları mekanik bir etki olarak boşluklu yapının hasar görmesini sağlayan etkileri oluşturmaya ek olarak tuz varlığından kaynaklanan bir bozulmayı da beraberinde getirdiğinden birçok çalışmada kullanılmıştır. Çalışma kapsamında GDA'ların ve DA'ların tuz kristalleşmesine karşı dayanıklılığının tespiti için, ASTM C88 [29] standardı kapsamında, Na_2SO_4 yöntemiyle uygulanan prosedür göz önüne alınmış, 8-16 mm, 4-8 mm ve 2-4 mm boyutlarındaki GDA ve DA'lar için ASTM C88 prosedürüne göre ardışık çevrimler uygulanmıştır. Her çevrimde numuneler, doygun sodyum sülfat çözeltisine 16 saat süre daldırılmış, ardından süzülerek 110 ± 5 °C'de kurutulmuş ve kütle değişimleri ile gözle görülür hasar durumu izlenmiştir. Görsel muayenede hasar tespit edildikten sonra deneyin sonlandırılması ve hasar miktarının tespit edilmesi için agregalar %5'lik baryum klorür çözeltisiyle 45 °C'de oldukça detaylı bir şekilde yıkanmış ve tuz kristallerinden tamamen arınması sağlanmıştır. Daha sonra 105 ± 5 °C'te kurutulup elek analizi yapılarak hasar miktarı tespit edilmiştir. Dört çevrim sonucunda belirgin şekilde hasar başlangıcı tespit edilen 8-16 mm işlem görmemiş GDA'ların deney sürecindeki ve sonundaki görüntüler detaylıca raporlanmıştır (Şekil 5). Gözlemler, 8-16 mm GDA fraksiyonunda hasar başlangıcının yaklaşık 4. çevrimde, 4-8 mm fraksiyonunda 5. çevrim civarında, 2-4 mm fraksiyonunda ise 9. çevrim sonrasında belirginleştiğini göstermiştir. Hasar, öncelikle GDA taneleri üzerindeki çimento pastasının ayrışması ve dökülmesi şeklinde ortaya çıkmış; doğal agreganın ise aynı çevrimlerde göreceli olarak sağlam kaldığı gözlemlenmiştir.

Tablo 5. Los Angeles aşınma direnci deneyi sonrasında agregaların elek analizi ve LA kat sayıları.**Table 5.** Sieve analysis and LA coefficients of aggregates after Los Angeles abrasion resistance test.

Agrega tipi	Tane boyutu aralığı	≥16 mm (%)	8-16 mm (%)	4-8 mm (%)	2-4 mm (%)	1-2 mm (%)	≤1 mm (%)	LA Katsayısı
GDA	16-32 mm	10.41	18.92	13.70	16.81	12.67	27.46	27
	8-16 mm	-	19.29	25.84	22.07	12.07	19.54	21
	4-8 mm	-	-	21.73	39.50	17.30	21.35	21
DA	16-32 mm	15.96	36.56	14.95	8.82	5.46	18.23	18
	8-16 mm	-	7.92	37.34	25.38	11.51	17.83	19
	4-8 mm	-	-	24.53	42.53	13.13	19.73	20

**Şekil 5.** (a) Sodyum sülfat çözeltisinde 4 çevrim sonu, (b) baryum klorürde yıkama işlemi, (c) kurutulmuş GDA'nın tartılması.**Figure 5.** (a) End of 4 cycles in sodium sulfate solution, (b) washing in barium chloride, (c) weighing of dried GDA.

Donma-çözünme çevrimleri sonrası GDA için yapılan elek analizleri Tablo 6'da, DA ve GDA için yapılan kütle tartım sonuçlarına göre belirlenen kayıp yüzdeleri Tablo 7'de malzeme görselleri ise Şekil 6'da verilmiştir. Özellikle 8-16 mm ve 4-8 mm GDA fraksiyonlarında, başlangıç tane boyutu aralığında kalan agrega oranının önemli ölçüde azaldığını, daha küçük fraksiyonlara geçen malzeme miktarının ise arttığını göstermektedir. Bu bulgu, yüksek su emme ve gözenekli yapı ile birlikte değerlendirildiğinde, GDA taneleri üzerindeki yapışmış çimento pastasının tuz-kurutma çevrimleri altında önemli bir zayıf bölge oluşturduğunu doğrulamaktadır.

DA ve GDA numunelerinin durabilite davranışları fraksiyon bazında karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir (Tablo 7). DA numunelerinde tüm fraksiyonlar için kütle kaybı değerleri %2.52-2.94 aralığında sınırlı kalmış ve tane boyutuna bağlı belirgin bir artış eğilimi gözlenmemiştir. Buna karşılık GDA numunelerinde özellikle iri fraksiyonlarda belirgin şekilde daha yüksek kütle kayıpları elde edilmiştir; 8-16 mm ve 4-8 mm fraksiyonları için kütle kaybı sırasıyla %7.51 ve %6.71 olarak hesaplanırken, 2-4 mm fraksiyonunda bu değer %2.48'e düşmüştür. GDA'da fraksiyon küçüldükçe kütle kaybının azalması, iri tanelerin bünyesinde bulunan eski harç kalıntıları, artmış açık porozite ve önceden oluşmuş mikro çatlakların sodyum sülfat kristalizasyonu sırasında iç gerilmeleri artırmasıyla açıklanmaktadır. İnce GDA fraksiyonlarının ise

kırma ve eleme süreçleri sırasında zayıf fazlarını büyük ölçüde kaybetmiş olması nedeniyle ilave ayırmaya karşı daha sınırlı bir potansiyel sergilediği düşünülmektedir. Elde edilen sonuçlar, GDA'nın DA'ya kıyasla sodyum sülfat etkisine karşı daha düşük durabilite gösterdiğini, ancak bu farkın tane boyutuna bağlı olarak değiştiğini ortaya koymaktadır.

GDA numunelerinde, nispeten düşük çevrim sayılarında belirgin yüzey ayrışmaları ve çimento pastası kopmaları gözlemlenirken diğer taraftan DA numunelerinde aynı çevrim sayılarında herhangi bir çatlak, pul dökülme veya belirgin kütle kaybı tespit edilmemiştir (Tablo 7). Hatta DA numuneleri, GDA'ların hasar aldığı çevrim sayısının yaklaşık iki katı çevrime maruz bırakılmış olmasına rağmen, gözle görülür bir bozulma göstermemiştir.

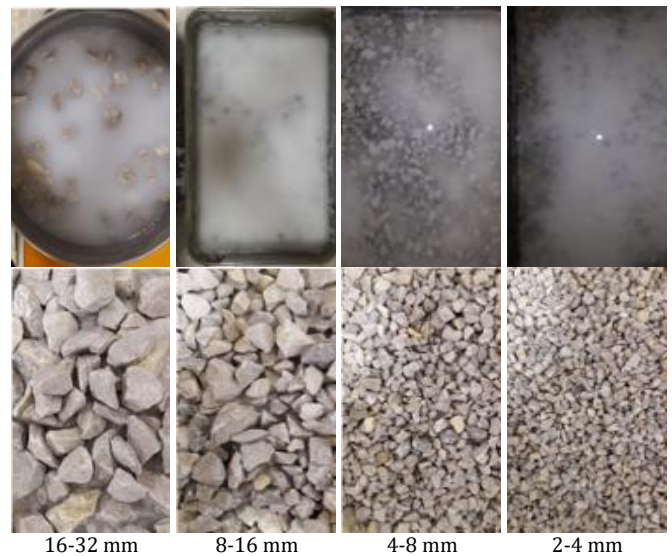
DeneySEL gözlemler DA numunelerinde BaCl₂ ile yıkama ve kurutma işlemleri sonunda yalnızca %1-3 seviyesinde bir kütle kaybı ve yüzeyde sınırlı miktarda gevşek parçacık oluştuğunu, bu kütle kaybının da büyük ölçüde yüzeySEL olduğunu göstermiştir. Buna karşın, GDA numunelerinde hasarın daha erken başlaması

Tablo 2. GDA'ların üzerinde uygulanan donma çözünme çevrimleri sonrasında tanecik boyutu değişimi.**Table 2.** Particle size variation after freeze-thaw cycles applied on GDAs.

Agrega Boyutu	≥8 mm (%)	4-8 mm (%)	2-4 mm (%)	1-2 mm (%)	≤1 mm (%)
8-16 mm	53.38	9.38	15.82	13.91	7.43
4-8 mm	-	37.58	38.85	16.86	6.71
2-4 mm	-	-	81.96	15.56	0.60

Tablo 3. GDA ve DA'ların ASTM-C88 testi sonucu kayıp yüzdeleri.**Table 3.** Loss percentages of GDAs and DAs in the ASTM-C88 test.

Agrega Boyutu	DA			GDA		
	M ₀ (g)	M ₁ (g)	Kayıp (%)	M ₀ (g)	M ₁ (g)	Kayıp (%)
8-16 mm	500	487.2	2.56	500	462.45	7.51
4-8 mm	500	487.4	2.52	500	466.45	6.71
2-4 mm	500.1	485.4	2.94	500	487.60	2.48

**Şekil 6.** On çevrimlik test sonucunda BaCl₂ ile yıkanan farklı fraksiyonlardaki GDA ve DA numuneleri.**Figure 6.** As a result of the ten-cycle test, GDA and DA samples of different fractions washed with BaCl₂.

ve kütle kaybının daha yüksek olması, GDA'nın yüksek su emme kapasitesi, daha yüksek porozitesi ve zayıf harç-agrega geçiş bölgesi ile doğrudan ilişkilidir. DA'nın düşük su emme ve yüksek yoğunluk değerleri ile ortaya konan daha sıkı iç yapısı, tuz çözeltisinin agregaya nüfuz etmesini zorlaştırmakta ve kristalleşme kaynaklı hasarı sınırlandırmaktadır.

Genel olarak, bu sonuçlar GDA'ların mekanik aşınma, tuz kristalleşmesi ve tuz esaslı donma-çözünme koşulları altında DA'ya kıyasla daha sınırlı dayanıklılık sergilediğini ortaya koymaktadır. Bununla birlikte, elde edilen LA değerlerinin ve tuz/donma-çözünme davranışının SSB Genel Teknik Şartnamesi ve uluslararası SSB şartnamelerinde öngörülen sınırlarla birlikte değerlendirilmesi, GDA kullanım oranının, tane boyutu seçiminin ve maruz kalınacak çevresel koşulların, tasarım aşamasında birlikte ele alınması gerektiğini göstermekte; özellikle ağır iklim ve yoğun trafik koşullarında GDA kullanımının sınırlı oranlarda ve kontrollü şekilde tasarlanmasını gerekli kılmaktadır.

C. GDA taneleri üzerindeki çimento hamuru miktarının tayini (Determination of the amount of adhered cement paste on RCA particles)

GDA taneleri üzerindeki yapışmış çimento hamuru, yoğunluk, su emme, aşınma direnci ve donma-çözünme davranışı gibi SSB performansı açısından kritik özellikleri doğrudan etkilemektedir. Bu nedenle, GDA'ların SSB karışımlarında hangi oranlarda ve hangi fraksiyonlarda kullanılabileceğinin sınırlandırılmasında, yapışmış çimento hamuru miktarının nicel olarak belirlenmesi önemli bir ihtiyaçtır. Literatürde bu amaçla sıcak su muamelesi, salisilik asit çözeltisi veya hidroklorik asit çözeltisi ile kimyasal çözündürme gibi çeşitli yöntemler önerilmektedir [33]. Çimento hamurunun salisilik asit-metanol çözeltisi içinde çözünmesine dayalı yöntem denenmiştir [33]-[35]. Bu çalışmada, söz konusu yöntemlerin GDA'lar için uygulanabilirliği test edilmiştir.

1. Salisilik asit ile muamele (Treatment with salicylic acid)

İlk aşamada Zhao ve diğ. [34] tarafından önerilen, çimento hamurunun salisilik asit-metanol çözeltisi içinde çözünmesine dayalı yöntem denenmiştir. Bu kapsamda, 14 g salisilik asit ve 80 mL metanol kullanılarak hazırlanan çözeltide <0.2 mm fraksiyonunda 0.5 g GDA, ultrasonik banyoda 1 saat karıştırılmış; ardından çözeltinin süzdürülmesi ve katı fazın tartılması hedeflenmiştir. Ancak kullanılan numune miktarının çok az olması, filtrasyonun uzun sürmesi ve ölçümlerdeki belirsizlik nedeniyle, bu yaklaşımın GDA'ların rutin değerlendirilmesi için pratik olmadığı görülmüştür. Bu nedenle aynı yöntem, 4-8 mm GDA fraksiyonunda farklı salisilik asit derişimleri (%5, %10 ve %20) için modifiye edilmiştir. Kütle kaybı değerleri %2-%10 (Tablo 8) aralığında Şekil 7'de görüldüğü üzere GDA taneleri üzerinde yapışmış çimento hamurunun gözle görülür biçimde

ayırışmadığı, doğal agreganın da anlamlı bir zarar görmediği tespit edilmiştir. Daha yüksek derişimlerde (%40-%50) salisilik asidin metanol içinde çözünmemesi nedeniyle çözeltinin derişiminin artırılması da mümkün olmamıştır.

Sonuç olarak, salisilik asit yönteminin sadece çok ince toz fraksiyonları için anlamlı sonuç verebildiği, SSB uygulamalarında kritik olan iri GDA fraksiyonları için ise yeterli çözünme ve seçicilik sağlamadığı değerlendirilmiştir.

2. Hidroklorik asit ile muamele (Treatment with hydrochloric acid)

Salisilik asit yönteminin yetersiz kalması üzerine, literatürde daha yaygın kullanılan hidroklorik asit (HCl) ile muamele yöntemi denenmiştir. 4-8 mm fraksiyonundaki 20 g GDA numunesi ağırlıkça %5, %10 ve %20 derişimlerde hazırlanan HCl çözeltisinde hem ultrasonik banyoda 35 dakika karıştırılmış hem de 48 saat laboratuvar koşullarında bekletilmiştir. Her iki durumda da numuneler muamele sonrasında su ile yıkanmış, 105 ± 5 °C'de kurutulmuş ve kütle kayıpları ile görsel hasar durumu değerlendirilmiştir.

Tablo 9'da özetlenen veriler, HCl derişimi arttıkça GDA'larda kütle kaybının %10'lardan %40-%45 düzeylerine kadar yükseldiğini göstermektedir. Şekil 8'de görülen GDA görüntüleri, çimento pastası ile birlikte doğal agreganın da kısmen tahrip olduğunu ortaya koymaktadır. Bu nedenle, HCl çözeltisinin GDA taneleri üzerindeki çimento hamurunu selektif biçimde çözmekten ziyade, belirli bir derişimin üzerinde doğal agregayı da aşındırdığı anlaşılmıştır. Bu tespiti doğrulamak amacıyla, aynı derişimlerdeki HCl çözeltisinde hem doğal agrega hem de yüksek oranda çimento pastası içeren GDA numuneleri seçilerek muameleye tabi tutulmuş ve doğal agregada dahi %10 HCl için %18-%19, %20 HCl için %30-50'ye varan kütle kayıpları ölçülmüştür. Dolayısıyla HCl yönteminin, GDA'daki yapışmış çimento hamurunu güvenilir ve seçici bir şekilde ayırtmak için uygun olmadığı hem GDA hem de referans doğal agregada taş iskeletin önemli ölçüde hasar gördüğü sonucuna varılmıştır.

3. Termal şok ile mekanik ayırıştırma denemesi (Mechanical separation test using thermal shock)

Kimyasal yöntemlerin istenen seçiciliği sağlayamaması üzerine, GDA'larda çimento hamuru ile doğal agrega arasındaki en zayıf bölge olan arayüz geçiş bölgesini hedefleyen basit bir termal şok yöntemi uygulanmıştır. Bu amaçla, 105 ± 5 °C'de kurutulan GDA numuneleri önce -4 °C'de 4 saat bekletilmiş, ardından numunelerin oda sıcaklığına gelmesi için vakit tanınmadan yaklaşık 90 °C'deki kaynar su ile temas ettirilmiştir. Farklı termal genleşme davranışlarının arayüzde çatlak oluşumu ve çimento hamurunun mekanik ayrılmasıyla sonuçlanacağı öngörülmüştür. Ancak görsel incelemeler ve elek analizleri, bu işlemten sonra GDA tanelerinde belirgin bir ayırma veya kütle transferi

Tablo 8. Salisilik asit muamelesi sonucunda ağırlık değişimleri.

Table 8. Weight changes as a result of salicylic acid treatment.

Uygulanan İşlemler	M ₀ (g)	%5'lik salisilik asit muamelesi		%10'luk salisilik asit muamelesi		%20'lik salisilik asit muamelesi	
		M ₁ (g)	ΔM (%)	M ₁ (g)	ΔM (%)	M ₁ (g)	ΔM (%)
Ultrasonik banyo ile karıştırma (35 dk)	20	19.6	2	19.3	3.5	18.0	10
Çözeltide bekletme (48 s)	20	19.2	4	18.9	5.5	18.6	7

*M₀: İlk ağırlık (g), M₁: Fırın Kuru ağırlık (g)



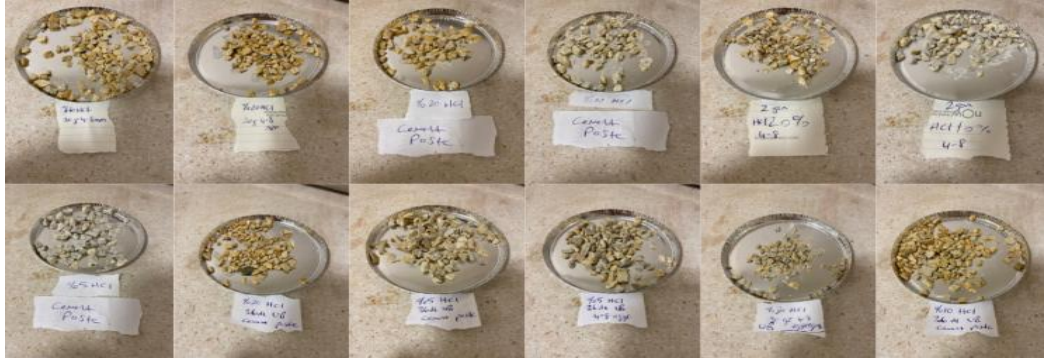
Şekil 7. Salisilik asit muamelesi uygulanan GDA görüntüleri.

Figure 7. Salicylic acid-treated GDA images.

Tablo 8. Hidroklorik asit muamelesi sonucunda ağırlık değişimleri.**Table 8.** Weight changes as a result of hydrochloric acid treatment.

Uygulanan İşlemler	M ₀ (g)	%5'lik hidroklorik asit muamelesi		%10'luk hidroklorik asit muamelesi		%20'lik hidroklorik asit muamelesi		%30'luk hidroklorik asit muamelesi	
		M ₁ (g)	ΔM (%)	M ₁ (g)	ΔM (%)	M ₁ (g)	ΔM (%)	M ₁ (g)	ΔM (%)
Ultrasonik banyo ile karıştırma (35 dk)	20	17.6	12	15.0	25.0	10.9	45.5	5.9	70.5
Çözeltide bekletme (48 s)	20	17.8	11	15.1	24.5	11.2	44.0	6.2	69.0

*M₀: İlk ağırlık (g), M₁: Fırın Kuru ağırlık (g)

**Şekil 8.** Hidroklorik asit muamelesi sonrası GDA görüntüleri.**Figure 8.** GDA images after hydrochloric acid treatment.

oluşmadığını; yöntemin uygulanabilir koşullarda yeterli termal şok etkisi yaratmadığını göstermiştir.

Yapılan üç ayrı deneysel çalışma neticesinde, GDA taneleri üzerindeki yapışmış çimento hamuru miktarının, iri agrega fraksiyonları için rutin ve güvenilir bir kimyasal yöntemle nicel olarak belirlenmesinin sanıldığı kadar kolay olmadığını göstermiştir. Salisilik asit muamelesi iri GDA'lar için yetersiz çözünme sağlarken, hidroklorik asit muamelesi hem çimento pastasını hem de doğal agrega iskeletini tahrip etmekte; dolayısıyla çimento hamuru miktarını selektif olarak ayırt etmeye imkân vermemektedir. Termal şok yaklaşımı ise, uygulanan sıcaklık ve süre kombinasyonlarında arayüzde beklenen ayrışmayı oluşturamamıştır. Bu nedenle, bu çalışma kapsamında GDA'ların yapışmış çimento hamuru miktarı doğrudan ve güvenilir bir şekilde sayısallaştırılamamış, ancak kimyasal muameleler sırasında gözlenen davranış ve kütle kayıpları, SSB açısından önemli bazı nitel sonuçlara işaret etmiştir: (i) yüksek çimento hamuru içeriğine sahip GDA'lar, tuz ve asit gibi agresif ortamlara karşı doğal agregaya göre belirgin biçimde daha hassastır; (ii) bu hassasiyet, çalışmanın önceki bölümlerinde gösterilen yüksek su emme, düşük yoğunluk, daha yüksek LA ve tuz/donma çevrimleri altındaki zayıf performans ile tutarlıdır. Bu tablo, SSB şartnamesi açısından GDA kullanımının özellikle su emme, birim hacim ağırlık, LA, donma-çözünme ve tuz etkisine dayanıklılık performans kriterleri üzerinden kontrol edilmesini; yapışmış çimento hamuru içeriğinin ise doğrudan ölçümden ziyade bu dolaylı parametreler üzerinden sınırlandırılmasını daha gerçekçi kılmaktadır. Öte yandan, GDA'larda yapışmış çimento hamuru miktarının güvenilir ölçümüne yönelik ihtiyaç devam etmektedir. Bu noktada, kimyasal çözündürme yöntemleri yerine, termogravimetrik analiz (TGA/DTG) veya mikroyapı temelli görüntü analizi gibi yöntemlerin, ileride SSB şartnamelerinin GDA içeriğine özgü limitlerin tanımlanmasına katkı sağlayabileceği düşünülmektedir.

V. SONUÇLAR ve ÖNERİLER (CONCLUSIONS and RECOMMENDATIONS)

A. Sonuçlar (Conclusions)

Bu çalışma, sürdürülebilir çevre yönetimi açısından büyük bölümü inert nitelikte olan İYA'ların yalnızca depolama sahalarında bertaraf edilmesi yerine; geri kazanılarak ekonomiye

dahil edilmesi, hem doğal agrega rezervlerinin korunması hem de çevresel kirliliğin önlenmesi açısından kritik bir yaklaşımla çözüm odaklı çalışılmış, Türkiye'deki beton yıkıntı atıklarından elde edilen GDA'ların, ÇŞİDB tarafından yayımlanan SSB Yol Genel Teknik Şartnamesi ve uluslararası SSB şartnameleri açısından kullanılabilirliğini agrega ölçeğinde incelemiştir. Elde edilen bulgular, GDA'ların mineralojik ve kimyasal açıdan çoğu parametrede şartname ile uyumlu olmakla birlikte, özellikle yoğunluk, su emme, hafif madde içeriği, mekanik aşınma ve tuz/donma etkisi altındaki dayanıklılık bakımından DA'ya göre belirgin sınırlılıklar taşıdığını göstermektedir.

Fiziksel ve granülo-metrik açıdan GDA'ların tüm fraksiyonlarda DA'ya kıyasla daha düşük birim hacim ağırlığa ve özellikle ince fraksiyonlarda daha yüksek su emme değerlerine sahip olduğu belirlenmiştir. No. 200/0.063 mm altı ince malzeme miktarı her iki agrega türü için de SSB şartnamesindeki limitler içinde kalmakla birlikte, GDA'larda bu oranın anlamlı biçimde daha yüksek çıkması, kırma işlemi sırasında çimento hamurunun kolayca tozlaşması ile uyumlu bulunmuştur. Metilen mavisi değerleri GDA'da doğal agregaya göre daha yüksek olup, aktif ince malzeme miktarının fazla olduğunu ve GDA içeren karışımlarda su/bağlayıcı oranı ile kimyasal katkı dozajının daha hassas kontrol edilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır. Buna karşılık organik madde ve suda çözünmeyen sülfat içeriklerinin her iki agrega türünde de tespit edilebilir seviyenin altında olması, GDA'ların kimyasal safsızlıklar ve sülfat saldırısı açısından ek bir risk oluşturmadığını göstermektedir. Hafif madde içeriğinin GDA'larda belirgin şekilde yüksek olması ise, yapışmış harç ve gözenekli parçaların varlığını doğrulamakta ve yoğunluk/durabilite açısından dezavantaj yaratmaktadır.

Mekanik ve dayanıklılık testleri, GDA-DA farkını SSB performansı açısından daha da belirgin hâle getirmektedir. Los Angeles aşınma deneyinde tüm fraksiyonlarda GDA'ların LA katsayıları DA'dan daha yüksek bulunmuş; 4-8 mm ve 8-16 mm GDA fraksiyonları beton ve yol malzemesi için kabul edilebilir sınırlar içinde kalsa da 16-32 mm GDA fraksiyonu sınır değerlere oldukça yaklaşmıştır. Na₂SO₄ esaslı donma-çözünme ve tuz kristalleşmesi testlerinde GDA numunelerinde, DA'ya kıyasla daha düşük çevrim sayılarında belirgin yüzey ayrışmaları ve yapışmış çimento hamurunun koparak parçalanması gözlemlenmiş DA numuneleri ise aynı ya da daha yüksek çevrim sayılarında sınırlı kütle kaybı ve gözle görülür hasar olmaksızın testi tamamlamıştır. Bu tablo, yüksek su emme, yüksek porozite ve

zayıf harç-agrega arayüzünün, GDA'ların tuz ve donma etkisi altındaki davranışında belirleyici olduğunu göstermektedir.

GDA taneleri üzerindeki çimento hamuru miktarının doğrudan tayini için denenen salisilik asit, hidroklorik asit ve termal şok temelli yöntemler, iri fraksiyonlar için pratik, selektif ve güvenilir bir nicel belirleme imkânı sunmamıştır. Salisilik asit yöntemi iri taneler için yeterli çözüme sağlamazken, hidroklorik asit muamelesi belirli derişimlerin üzerinde hem çimento pastasını hem de doğal agrega iskeletini tahrip etmiş; termal şok yaklaşımı ise uygulanabilir parametrelerde arayüzde beklenen ayrışmayı oluşturamamıştır. Bununla birlikte, kimyasal muamelelerde gözlenen yüksek kütle kayıpları ve görsel hasar, GDA'ların bağlayıcı faza ve agresif çevresel etkilere karşı doğal agregaya göre çok daha hassas olduğunu doğrulamış, önceki su emme, yoğunluk, LA ve tuz/donma sonuçları ile tutarlı bir genel performans profili ortaya koymuştur.

B. Öneriler (Recommendations)

Elde edilen bulgular ışığında, Türkiye SSB Yol Genel Teknik Şartnamesi'nin [3] sıkı agrega kriterleri dikkate alındığında, GDA'ların yüksek trafik hacimli, ağır yük taşıyan ve donma-tuz etkisine maruz SSB kaplamalarında tek başına veya yüksek oranlarda kullanımı uygun görünmemektedir. Bununla birlikte, GDA'ların tamamen dışlanması yerine belirli koşullar altında dikkatli ve kontrollü olarak değerlendirilmesi mümkündür. Bu çalışma, GDA'ların nihai SSB karışım performansını doğrudan belirlemekten ziyade, SSB yol kaplama şartnamesindeki agrega gereklilikleri açısından ön uygunluk düzeyini ortaya koymaya odaklanmaktadır. Bu nedenle elde edilen bulgular, SSB karışım tasarımına geçmeden önce malzeme seçimi, fraksiyon kontrolü ve ön eleme aşamalarında dikkate alınabilecek bir altyapısı çalışması olarak değerlendirilmelidir. Uygulamaya yönelik öne çıkan öneriler aşağıdaki gibi özetlenebilir:

- GDA'lar, doğal agregalarla karışımli olarak, sınırlı oranlarda (özellikle ince ve yüksek su emmeli fraksiyonlar için daha düşük ikame oranlarıyla) kullanılmalı; iri ve daha dayanıklı fraksiyonlara öncelik verilmelidir.
- İnce GDA fraksiyonları hem yüksek su emme hem de aktif ince malzeme miktarı nedeniyle SSB karışımlarında sınırlandırılmalı; ince fraksiyon için DA tercih edilmelidir.
- GDA içeren karışımlarda, agregaların ön ıslatma/SDYK durumunda kullanılması veya karışım suyunda su düzeltmesi yapılarak taze beton işlenebilirliği ve etkin su/bağlayıcı oranı kontrol edilmelidir.
- Donma-çözünme ve buz çözücü tuzların yoğun olduğu iklim bölgelerinde, GDA kullanım oranı düşük tutulmalı; GDA'lar daha çok ılıman iklime sahip, daha düşük yük ve bakım gerektiren SSB uygulamalarında değerlendirilmelidir.
- Bu çalışmada GDA'lar kaynak bazlı ayrı bir karşılaştırmadan ziyade, SSB yol kaplama şartnamesi açısından ön uygunluk değerlendirmesi için ele alınmıştır. Ancak GDA özelliklerinin kaynak, orijinal beton kalitesi, kırma-eleme yöntemi ve depolama koşullarına bağlı olarak değişebileceği dikkate alındığında, gelecek çalışmalarda farklı İYA'lardan elde edilen GDA'lar karıştırılmadan ayrı ayrı karakterize edilmeli ve kaynak değişkenliği istatistiksel olarak değerlendirilmelidir.
- GDA kullanımına ilişkin nihai değerlendirme yalnızca agrega deneyleri üzerinden yapılmamalı; bu agregalarla üretilecek SSB karışımlarının yoğunluk, işlenebilirlik, mekanik dayanım, aşınma direnci, donma-çözünme ve tuz etkisi altındaki dayanıklılık performansları da ayrıca incelenmelidir.

Gelecek çalışmalar açısından, farklı GDA oranlarına sahip SSB karışımları üzerinde mekanik ve durabilite testleri yapılarak agregaya özgü bulguların gerçek ölçekli SSB performansı ile ilişkilendirilmesi önem taşımaktadır. Bu kapsamda, mevcut çalışmanın devamında karakterize edilen GDA'lar kullanılarak SSB karışımlarının üretilmesi ve işlenebilirlik, yoğunluk, mekanik performans ile dayanıklılık özelliklerinin deneysel olarak

incelenmesi planlanmaktadır. Böylece bu çalışmada şartname temelli olarak ortaya konulan ön uygunluk değerlendirmesinin, gerçek SSB karışım performansı ile ilişkilendirilmesi mümkün olacaktır. Bu tür çalışmalar, hem Türkiye'de artan İYA hacminin daha yüksek katma değerli alanlarda değerlendirilmesine hem de SSB şartnamesine, GDA kullanımını performans temelli ve kademeli olarak tanımlayan ilave kabul kriterlerinin eklenmesine zemin hazırlayacaktır.

YAZAR BEYANI (AUTHOR STATEMENT)

İntihal Kontrolü (Plagiarism Check)—Makale iThenticate programı ile taranmış ve derginin intihal politikası ile uyumlu bulunmuştur.

Çıkar Çatışması (Conflict of Interest)—Makalede herhangi bir kişi/kurum ile çıkar çatışması bulunmamaktadır.

Etik Kurul Onayı (Ethics Committee Approval)—Makalede etik kurul izni alınmasına gerek yoktur.

Yapay Zekâ Araçlarının Kullanımı (Use of Artificial Intelligence Tools)—Makalenin hazırlanmasında yapay zekadan faydalanılmamıştır. Tüm içerik yazarların özgün katkısını yansıtmaktadır.

Finansman ve Proje Desteği (Funding)—Bu çalışma, Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) tarafından 125M941 ve 124M623 numaraları kapsamında desteklenmiştir.

Veri Paylaşım (Data availability)—Bu çalışmanın bulgularını destekleyen veriler yazar(lar) tarafından üretilmiş olup; makul talepler doğrultusunda yazar(lar)dan temin edilebilir.

Yazar Katkısı (CRediT Author Contribution)—Araştırma (Oula Aljumailli); Yazma – ilk taslak Yazılım, Araştırma (Yeşim Arslantürk, Emine Özdoğru); Kavramsallaştırma, Yazma – inceleme ve düzeltme, Danışmanlık, Proje Yönetimi (Oğuzhan Şahin, Emin Şengün).

Teşekkür (Acknowledgment)—Bu makale, Ankara Yıldırım Beyazıt Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü'nde, Oula Aljumailli'nin Doç. Dr. Emin Şengün ve Doç. Dr. Oğuzhan Şahin danışmanlığında yürüttüğü "Performance assessment of roller-compacted concrete pavements incorporating recycled materials derived from construction and demolition waste" başlıklı yüksek lisans tezinden üretilmiştir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] A. Mardani, S. H. Bayqra, S. Özen, Z. A. Faqiri, K. Ramyar, "Properties of Materials Used in Roller Compacted Concrete Mixtures", *International Journal of Engineering Research and Development*, 12(1), 61-72, 2020. <https://doi.org/10.29137/umagd.569501>.
- [2] E. Şengün, "Mekanistik-Ampirik Tasarım Yaklaşımıyla Silindirle Sıkıştırılmış Beton Yol Performans Değerlendirmesi: Ankara Temelli Yolu Örneği", *Black Sea Journal of Engineering and Science*, 7(6), 1155-1162, 2024. <https://doi.org/10.34248/bsengineering.1538930>.
- [3] Türk Çimento, "SSB Yollar Genel Teknik Şartnamesi", https://www.turkcimento.org.tr/uploads/pdf/SSB_Yollar_Genel_Teknik_%C5%9Eartnamesi2.pdf (19.12.2025).
- [4] Türk Çimento, "SSB Yollar Bakım Onarım Rehberi", https://www.turkcimento.org.tr/uploads/pdf/SSB_Yol_Bak%C4%B1m_Onar%C4%B1m_Rehberi.pdf (19.12.2025).
- [5] Türk Çimento, "SSB Yollar: Tasarım Rehberi", https://www.turkcimento.org.tr/uploads/pdf/SSB_Yollar_Tasar%C4%B1m_Rehberi.pdf (19.12.2025).
- [6] Türk Çimento, "SSB Yollar: Üretim ve Taşıma", https://www.turkcimento.org.tr/uploads/pdf/SSB_Yollar_%C3%9Cretim_ve_Ta%C5%9F%C4%B1ma.pdf (19.12.2025).
- [7] Türk Çimento, "Silindirle Sıkıştırılmış Beton (SSB) Yollar: Serme ve Sıkıştırma", [https://www.turkcimento.org.tr/uploads/pdf/Silindirle_S%C4%B1k%C4%B1%C5%9F%C4%B1r%C4%B1m%C4%B1%C5%9F_Beton_\(SSB\)_Yollar-Serme_ve_S%C4%B1k%C4%B1%C5%9F%C4%B1rma.pdf](https://www.turkcimento.org.tr/uploads/pdf/Silindirle_S%C4%B1k%C4%B1%C5%9F%C4%B1r%C4%B1m%C4%B1%C5%9F_Beton_(SSB)_Yollar-Serme_ve_S%C4%B1k%C4%B1%C5%9F%C4%B1rma.pdf) (19.12.2025).
- [8] J. Xiao, Q. Deng, M. J. Hou, J. Y. Shen, O. Gencel, "Where are demolition wastes going: reflection and analysis of the February 6, 2023 earthquake disaster in Turkey", *Low-carbon Materials and Green Construction*, 1(1), 17, 2023. <https://doi.org/10.1007/s44242-023-00017-3>.
- [9] G. Bilgen, "Sürdürülebilir Çevre Kavramı Çerçevesinde İnşaat ve Yıkım Atıkları", *Mühendislik ve Multidisipliner Yaklaşımlar*, A. Güllü, S. Yalçınkaya, Ed., İstanbul, Türkiye, Güven Plus Grup A.Ş. Yayınları, 2021, 403-433.
- [10] M. Etxeberria, E. Vázquez, A. Marí, M. Barra, "Influence of amount of recycled coarse aggregates and production process on properties of recycled aggregate concrete", *Cement and Concrete Research*, 37(5), 735-742, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2007.02.002>.

- [11] L. Courard, F. Michel, P. Delhez, "Use of concrete road recycled aggregates for Roller Compacted Concrete", *Construction and Building Materials*, 24(3), 390-395, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.08.040>.
- [12] İ. Kiliç, S. G. Gök, "Silindirle Sıkıştırılmış Atık Beton Agregasının Silindirle Sıkıştırılmış Beton Üretiminde Yeniden Değerlendirilmesi", *Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 10(3), 999-1008, 2021. <https://doi.org/10.17798/bitlisfen.877421>.
- [13] İ. Kiliç, S. G. Gök, "Investigation of Freeze-Thaw Resistance of Roller Compacted Concretes Produced with Different Aggregates", *Journal of the Institute of Science and Technology*, 11(4), 2849-2859, 2021. <https://doi.org/10.21597/jist.908579>.
- [14] S. G. Gök, İ. Kiliç, O. Sengül, "Properties of alkali-activated roller compacted concretes produced from waste aggregates", *Cement Wapno Beton*, 26(4), 352-363, 2021. <https://doi.org/10.32047/CWB.2021.26.4.7>.
- [15] Türk Standartları Enstitüsü, "Beton Agregaları (Aggregates for Concrete)", Ankara, Türkiye, TS 706 EN 12620, 2009.
- [16] European Ready Mixed Concrete Organization, "ERMC O Guide to Roller Compacted Concrete for Pavements", Brüksel, Belçika, 2013.
- [17] Highways England, "Road Pavements - Concrete Materials", Londra, England, MCHW Volume 1, Series 1000, 2006.
- [18] RCC Pavements Council, "Specification for Roller-Compacted Concrete Pavements as Exposed Wearing Surface", Greenville, USA, 2021.
- [19] AASHTO, "Standard Specification for Fine Aggregate for Hydraulic Cement Concrete", Washington, D.C., USA, AASHTO M 6, 2008.
- [20] AASHTO, "Standard Specification for Coarse Aggregate for Hydraulic Cement Concrete", Washington, D.C., USA, AASHTO M 80, 2011.
- [21] ASTM International, "Specification for Concrete Aggregates", West Conshohocken, USA, ASTM C33/C33M-18, 2018.
- [22] Türk Standartları Enstitüsü, "İnşaat Mühendisliği İşleri ve Yol Yapımında Kullanılan Bağlayıcısız ve Hidrolik Bağlayıcı Malzemeler için Agregalar (Aggregates for Unbound and Hydraulically Bound Materials for Use in Civil Engineering Work and Road Construction)", Ankara, Türkiye, TS EN 13242, 2009.
- [23] ASTM International, "Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates", West Conshohocken, USA, ASTM C136/C136M-19, 2019.
- [24] Türk Standartları Enstitüsü, "Agregaların Mekanik ve Fiziksel Özellikleri için Deneyler - Bölüm 6: Tane Yoğunluğunun ve Su Emme Oranının Tayini (Tests for Mechanical and Physical Properties of Aggregates - Part 6: Determination of Particle Density and Water Absorption)", Ankara, Türkiye, TS EN 1097-6, 2022.
- [25] Türk Standartları Enstitüsü, "Agregaların Geometrik Özellikleri için Deneyler - Bölüm 9: İnce Tanelerin Tayini - Metilen Mavisini Deneyi (Tests for Geometrical Properties of Aggregates - Part 9: Assessment of Fines - Methylene Blue Test)", Ankara, Türkiye, TS EN 933-9, 2022.
- [26] Türk Standartları Enstitüsü, "Agregaların Kimyasal Özellikleri için Deneyler - Bölüm 1: Kimyasal Analiz", Ankara, Türkiye, TS EN 1744-1, 2013.
- [27] Türk Standartları Enstitüsü, "Agregaların Mekanik ve Fiziksel Özellikleri için Deneyler - Bölüm 2: Parçalanma Direncinin Tayini için Metotlar", Ankara, Türkiye, TS EN 1097-2, 2020.
- [28] ASTM International, "Test Method for Resistance of Concrete to Rapid Freezing and Thawing", West Conshohocken, USA, ASTM C666/C666M-15, 2015.
- [29] ASTM International, "Test Method for Soundness of Aggregates by Use of Sodium Sulfate or Magnesium Sulfate", West Conshohocken, USA, ASTM C88/C88M-13, 2013.
- [30] C. J. Zega, Y. A. Villagrán-Zaccardi, A. A. Di Maio, "Effect of natural coarse aggregate type on the physical and mechanical properties of recycled coarse aggregates", *Materials and Structures*, 43(1-2), 195-202, 2010. <https://doi.org/10.1617/s11527-009-9480-4>.
- [31] J. de Brito, N. Saikia, *Recycled Aggregate in Concrete: Use of Industrial, Construction and Demolition Waste*, Dordrecht, Netherlands, Springer Science & Business Media, 2012.
- [32] ASTM International, "Test Method for Materials Finer than 75-µm (No. 200) Sieve in Mineral Aggregates by Washing", West Conshohocken, USA, ASTM C117/C117M-17, 2017.
- [33] Z. H. Duan, C. S. Poon, "Properties of recycled aggregate concrete made with recycled aggregates with different amounts of old adhered mortars", *Materials & Design*, 58, 19-29, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.01.044>.
- [34] Z. F. Zhao, S. Remond, D. Damidot, W. Y. Xu, "Influence of fine recycled concrete aggregates on the properties of mortars", *Construction and Building Materials*, 81, 179-186, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.02.037>.
- [35] B. Mazhoud, T. Sedran, B. Cazacliu, A. Cothenet, J.-M. Torrenti, "Influence of residual mortar volume on the properties of recycled concrete aggregates", *Journal of Building Engineering*, 57, 104945, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2022.104945>.