

ATIK CAM KATKILI ASFALT KARIŞIMLARIN POTANSİYEL ÇEVRESEL ETKİLERİNİN YAŞAM DÖNGÜSÜ DEĞERLENDİRMESİ İLE ANALİZİ

Burak Yiğit KATANALP ^{1*}

¹ Çukurova Üniversitesi, Adana, Türkiye, ORCID No: <https://orcid.org/0000-0002-7172-8192>

Anahtar Kelimeler	Öz
Asfalt YDD Atık Cam Enerji	<i>Atık camların düzenli depolanma yöntemi ile bertarafı yaygın kullanılmakta ancak çevresel etkilerinden kaynaklı sıklıkla eleştirilmektedir. Bu çalışmada, düzenli depolamaya bir alternatif olarak %25 ile %100 arasında değişen oranlarda atık camın asfalt karışımında kırmataş agrega yerine ikamesinin oluşturacağı çevresel etkilere odaklanılmıştır. Araştırmada karışımların yakıt tüketimi, sera gazı emisyonları ile bu emisyonlara bağlı iklim değişikliği (GWP-100), asidifikasyon (AP), ötrofikasyon (ÖP), toksisite (TP), fotokimyasal ozon (FOP) ve enerji tüketimi (CED) indikatörleri incelenmiştir. Yaşam döngüsü değerlendirmesi (YDD) analizleri hammadde temini (HM), asfalt üretimi (AU), kaplama inşaatı (KI) ve servis ömrü sonu (SS) aşamalarını kapsamaktadır. Bulgular, atık cam içerikli kaplamalarda dizel ve elektrik tüketiminin ve nitroz oksit (N₂O) haricindeki emisyon değerlerinin azaldığını göstermiştir. En yüksek enerji gereksinimleri HM ve AU aşamalarında ortaya çıkmıştır. HM aşamasında karbondioksit (CO₂) ve N₂O emisyonlarının atık cam miktarına bağlı yükseldiği görülmüştür. Atık cam ilavesi ile en yüksek çevresel kazanımlar TP ve ÖP indikatörlerinde elde edilmiştir. Düşük miktarda atık cam içerikli karışımların GWP-100 indikatörüne belirgin bir katkısının olmadığı tespit edilmiştir.</i>

ANALYSIS OF THE ENVIRONMENTAL IMPACTS ASSOCIATED WITH WASTE GLASS INCORPORATION INTO ASPHALT MIXES USING LIFE CYCLE ASSESSMENT

Keywords	Abstract
Asphalt LCA Waste Glass Energy	<i>The disposal of waste glass through landfilling is widely practiced but often criticized for its environmental impacts. This study focuses on assessing the environmental effects of using waste glass, ranging from 25% to 100%, instead of crushed stone aggregate in asphalt mixtures as an alternative to landfilling. The research investigates fuel consumption, greenhouse gas emissions, climate change (GWP-100), acidification (AP), eutrophication (EP), toxicity (TP), photochemical ozone (FOP), and energy consumption (CED) indicators. Life cycle assessment (LCA) was used to analyze the stages of raw material supply (HM), asphalt production (AU), pavement construction (KI), and end-of-service life (SS). The findings indicate that diesel and electricity consumption, as well as emissions other than N₂O, decrease in mixes containing waste glass. The highest energy requirements are observed in the HM and AU stages. In the HM stage, carbon dioxide (CO₂) and N₂O emissions increase with the amount of waste glass. Additionally, the highest environmental benefits are achieved in the TP and ÖP indicators with the addition of waste glass. Mixtures containing low amounts of waste glass show insignificant contributions to the GWP-100 indicator.</i>

Araştırma Makalesi

Research Article

Başvuru Tarihi : 13.02.2024

Submission Date : 13.02.2024

Kabul Tarihi : 06.07.2024

Accepted Date : 06.07.2024

* Sorumlu yazar: bykatanalp@cu.edu.tr
<https://doi.org/10.31796/ogummf.1436124>

1. Giriş

Gelişen teknoloji ve endüstriyel faaliyetler neticesinde cam materyallerin çeşitli alanlarda kullanımı yaygınlaşmıştır. Bu bağlamda cam sektörü, dünya genelindeki yıllık 180 milyon tonluk ürün hacmi ile

önemli endüstrilerden biri olarak görülmektedir (Gedik, 2021). Öte yandan, cam sanayinde yükselen üretim trendlerinin bir sonucu olarak, faydalı ömrünü tamamlamış, atık camların sayısı da son yıllarda önemli ölçüde artmıştır.



Bu eser, Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>) hükümlerine göre açık erişimli bir makaledir.

This is an open access article under the terms of the Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

Atık camların yönetilmesine yönelik yeniden işleme (geri dönüşüm) veya bertaraf gibi stratejilerden faydalanılmakla beraber (Kazmi ve diğ., 2020), bu faaliyetlerin dünya genelinde ortaya çıkan toplam atık cam miktarının yaklaşık %20'si kadarını kapsadığı görülmektedir (Mohajerani ve diğ., 2017). Bu bağlamda, cam atıklarının yaklaşık %80'lik bir çoğunluğu ise düzenli depolama amacı ile stok sahalarına gönderilmektedir. Düzenli depolama, uygulama kolaylığı açısından sık tercih edilen ancak uzun zamanlı fayda-maliyet analizlerinde oldukça eleştirilen bir atık yönetim stratejisidir. Avrupa Birliği Enerji, İklim Değişikliği ve Çevre komisyonunun hazırladığı raporda; AB ülkelerinde ortaya çıkan yıllık 2,2 milyar ton atığın 2017 yılında %24 kadarının düzenli depolama yolu ile yönetildiği, bu rakamın 2022 yılında %18 olarak kaydedildiği ve 2035 yılı için ise %10 seviyelerinin hedeflendiği yer almaktadır (Guillot, 2023).

Düzenli depolanan atık camların tutuşmaya ve çürümeye elverişsiz yapısından kaynaklı doğada kaybolması milyonlarca yıl sürmektedir. Bu süre boyunca, Son yıllarda özellikle geoteknik (Bilgen, 2020; Blayi ve diğ., 2020), beton teknolojisi (Qin ve diğ., 2021) ve asfalt mühendisliği (Canpolat ve diğ., 2022; Choudhary ve diğ., 2021; Katanalp ve diğ., 2019; Varol, 2023) alanlarında atıklar için alternatif yönetim stratejilerine yönelik araştırmalara ait trend yükselmektedir. Atık camların bertaraf edilmesi amacı ile bitüm modifiyeri olarak veya asfalt karışımında katkı olarak kullanıldığı çalışmalar mevcuttur. Kalampokis ve diğ. (2023), monolitik ve temperli cam atıklarını asfalt karışımında ağırlıkça farklı yüzdelerde agrega yerine kullanmıştır. Varol (2023), Marshall kriterlerine göre üretilen karışım numunelerinde %7 oranında atık cam tozu kullanımının şartnameye uygunluğunu değerlendirmiştir. Bir diğer çalışmada, Tahmoorian ve diğ. (2018) geri dönüştürülmüş inşaat agregaları ile hazırlanan asfalt karışımında optimum bitüm miktarının azaltılması için atık cam kullanmıştır. Geçmiş dönem bulguları, atık cam modifikasyonun bitüm penetrasyon değerinde belirgin bir etkisinin olmadığını, yumuşama noktası değerinin ise önemli ölçüde azaldığını göstermiştir. Ming ve diğ. (2022), atık cam modifikasyonu sonrasında bitümün koloidal yapısının sol-gel yapıdan sol yapıya yaklaştığına işaret eden penetrasyon indeksi bulguları paylaşmıştır. Asfalt karışımının yolculuk performansı ve deformasyon direnci üzerinde atık cam modifikasyonun belirgin iyileştirmeler sağladığı önceki çalışmalarda yer almaktadır (Shafabakhsh ve Samed, 2014). Simone ve diğ. (2019) atık cam katkılı asfalt karışımının sağladığı düşük yoğunluğunun ve yüksek hava boşluğu oranının, kaplamanın su hasarına karşı direncini belirgin ölçüde azalttığını raporlanmıştır. Cheng ve diğ. (2021) mikro yüzey kaplama uygulamasında kaba agrega yerine %5-%20 oranlarında atık cam kullanımının asfalt karışımın

kayma direnci performansını iyileştirdiğini göstermiştir.

Son yıllarda artan sürdürülebilir faaliyetler ve bu faaliyetlerin çevresel hassasiyetler üzerindeki çıktıları asfalt araştırmalarında sürdürülebilirlik etkilerinin göz önünde bulundurulması gerektiğine işaret etmektedir (Katanalp ve diğ., 2024). Bu kapsamda, katkı miktarından kaynaklı bitüm azalmasının sağladığı avantajlar (Zarei ve diğ., 2020), geri dönüştürülmüş malzeme kullanımının çevresel avantajları (Movilla-Quesada ve diğ., 2021), performans iyileşmelerinin sağladığı avantajlardan kaynaklı çevresel kazanımlar (Ör. Bakım & Onarım planlarının tahsisi, kullanım aşamasındaki operasyonel faaliyetler) (Aliyu ve diğ., 2021; Günay ve diğ., 2023), modifiye bitüm üretim sıcaklıklarından kaynaklı faydalar (Almusawi ve diğ., 2022; Katanalp ve Ahmedzade, 2023) veya asfalt kaplama için gerekli ham maddelerin temini sırasındaki verimlilikler (Hamzah ve diğ., 2010), sıklıkla araştırılan başlıkların başında gelmektedir.

Atık cam ilavesinin asfalt kaplamanın hizmet süresi boyunca sağladığı çevresel kazanımlar dikkat çekicidir. Mammeri ve diğ. (2023), kırmataş agrega yerine atık cam kullanılarak üretilen asfalt karışımların solar radyasyon etkisi altında ısı adası oluşturma potansiyellerinin %47 oranında azaldığını göstermiştir. Huang ve diğ. (2009) farklı oranlarda uçucu kül, atık cam ve geri kazanılmış asfalt kullanılarak üretilen binder ve bitümlü temel tabakalarının ürettiği CO₂ salınımlarını araştırmıştır. Bir diğer çalışmada, Chiu ve diğ. (2008) %10 atık cam ilavesinin asfalt karışımın 40 yıl süre ile oluşturduğu çevresel yüklerin geleneksel asfalt karışımına kıyasla belirgin olmadığını göstermiştir. Tushar ve diğ. (2023) agrega karışımında ince malzeme yerine %20 oranında atık cam kullanımının 10,4 milyar dolarlık bir kazanım sağlayabileceğini göstermiştir.

Bu çalışma kapsamında, atık cam katkılı asfalt karışımların ortaya çıkartacağı çevresel yükler; asfalt karışım için gerekli ham maddelerin temini (HM), asfalt üretimi (AU), kaplama inşaatı (KI) ve asfaltın servis ömrü sonunda kaldırılması (SS) aşamaları için yaşam döngüsü değerlendirmesi (YDD) ile analiz edilmiştir. Analizlerde referans kaplama olarak sıcak asfalt karışım (BSK) ve ince agrega yerine %25 (BSK-25WG), %50 (BSK-50WG), %75 (BSK-75WG) ve %100 (BSK-100WG) oranlarında atık cam tozu içeren asfalt karışımlar dikkate alınmıştır. Araştırmanın motivasyonunu oluşturan temel beklentiler;

- Atık camların asfalt kaplama uygulamalarında bertaraf edilmesinin oluşturacağı sera gazı emisyonlarının belirlenmesi, sunulan atık yönetim alternatifinin sağlayacağı potansiyel fayda-maliyetlerinin saptanması
- Atık cam katkılı asfalt karışımlarda oluşacak orta-nokta etkilerinin ve enerji, maliyet

giderlerinin incelenmesi ve geleneksel asfalt karışımları ile karşılaştırılması

- Cam atıkların asfalt uygulamalarında bertarafına yönelik yerel literatüre katkı sağlanması şeklindedir.

Makalenin devamında YDD metodolojisi, sistem sınırları ve envanter hakkında bilgiler paylaşılmış ve geleneksel ve atık cam içerikli asfalt karışımların YDD analizlerine ilişkin sonuçlar paylaşılmıştır.

2. Materyal ve Metot

2.1. YDD Metodolojisi

Çalışma kapsamında geleneksel ve atık cam katkı asfalt karışımların çevresel ve ekonomik etkileri YDD analizleri ile belirlenmiştir. Analizler ISO 10440:44 teknik standardı dikkate alınarak gerçekleştirilmiştir.

2.1.1. Sistem Sınırları ve Fonksiyonel Birim

Envanter verilerinin derleneceği sistem sınırları agregası, bitüm ve atık cam materyallerinin temini, asfalt karışım üretimi, kaplama inşaatı ve hizmet ömrü sonunda kaplamanın kaldırılması aşamalarını kapsamaktadır. Ayrıca, ham maddelerin, asfalt karışımların ve kaldırılan kaplamanın geri dönüşüm sahasına taşınması sırasında oluşan çevresel yükler ve maliyetler çalışma kapsamında dikkate alınmıştır. Asfalt kaplamanın kullanımı sırasında oluşan çevresel yükler ve bakım, onarım, işletme giderleri kapsam dışında bırakılmıştır. Araştırmada, fonksiyonel birim (functional unit, fu) olarak 1 km uzunluğunda, 10 metre genişliğinde ve 0,05 m kalınlığında BSK olarak dikkate alınmıştır. Çalışma kapsamında incelenen sistem sınırları ve envanter aşamaları Şekil 1'de gösterilmiştir.

2.1.2. YDD envanteri

Envanter araştırmasında daha önce de değinildiği üzere HM, AU ve SS aşamaları dikkate alınmıştır. YDD envanteri geçmiş dönem çalışmalarından ve endüstriden uzmanlar ile birebir görüşmelerden elde edilen veriler ile derlenmiştir. HM aşamasında asfalt karışımı oluşturan bileşenlerin ağırlıkça miktarları ve bu sırada çalışan iş makinalarının giderleri dikkate alınmıştır. Tablo 1'de ilgili ham malzemeler için gerekli yakıt giderleri sunulmuştur.

Bitümün rafine edilmesinde gerekli doğal gaz ve elektrik çıktıları (Cong ve diğ., 2020; Yang, 2014), agreganın taş ocağındaki maliyeti (Farina ve diğ., 2023; Marceau ve diğ., 2007) ve atık camın agregaya dönüştürülmesi prosesindeki yakıt giderleri (Blengini ve diğ., 2012; Demirel ve diğ., 2019) literatürden derlenmiştir.

Tablo 1. Kullanılan materyallere ilişkin yakıt giderleri

Materyal	Dizel (kg)	Elektrik (kWh)	Doğalgaz (m ³)
Atık cam (kg)	0,00043	0,0011	0,00028
Bitüm (kg)	-	0,0392	0,000015
Agrega (kg)	0,00058	0,00658	0,00013

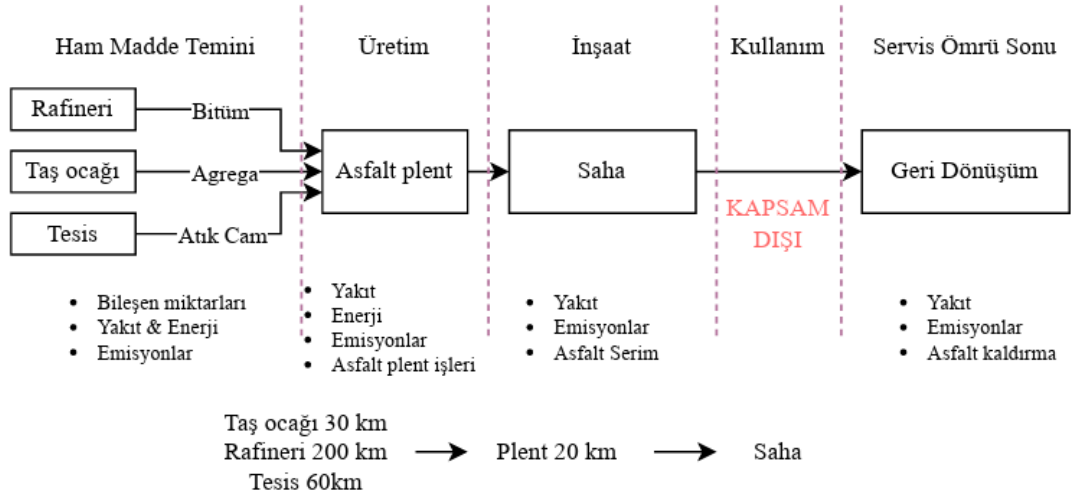
Tablo 2. Çalışmada incelenen karışım bileşenleri ve fonksiyonel birim için gerekli miktarlar

Materyal	Karışım	wt%	ton/m ³	Asfalt (m ³)	ton/fu
Agrega	BSK	95,5	2,57	2,454	1227,175
	BSK-25WG	71,625	2,57	1,841	920,381
	BSK-50WG	47,75	2,57	1,227	613,587
	BSK-75WG	23,875	2,57	0,614	306,794
	BSK-100WG	0	2,57	0	0
Bitüm	BSK	4,5	1,03	0,046	23,175
	BSK-25WG	4,5	1,03	0,046	23,175
	BSK-50WG	4,5	1,03	0,046	23,175
	BSK-75WG	4,5	1,03	0,046	23,175
	BSK-100WG	4,5	1,03	0,046	23,175
Atık cam	BSK	0	0,99	0	0
	BSK-25WG	23,875	0,99	0,236	118,181
	BSK-50WG	47,75	0,99	0,472	236,362
	BSK-75WG	71,625	0,99	0,709	354,544
	BSK-100WG	95,5	0,99	0,945	472,725

Tablo 2'de çalışmada asfalt karışım türüne göre hammadde miktarları ile ilgili detaylar yer almaktadır. Geleneksel asfalt karışım, %25, %50, %75 ve %100 oranlarında atık cam içerikli karışımların bileşen oranları 1 m³ asfalt karışım ve fonksiyonel birim için ton cinsinden verilmiştir.

AU aşamasında plent işlerinden kaynaklı yakıt ve enerji sarfiyatları, SS aşamasında ise asfalt kaplamanın

kaldırılması sırasında çalışan iş makinalarının giderleri dikkate alınmıştır. Asfalt üretim faaliyetlerinde Almusawi vd. (2022) çalışmasında yer alan plent dikkate alınmıştır. Kule tipi plente ait detaylar Tablo 3'te verilmiştir.



Şekil 1. Çalışma kapsamında dikkate alınan YDD sistem sınırları

Tablo 3. Dikkate alınan kule tipi plente ilişkin detaylar

Özellik	Değer
Kapasite (ton/h)	160
Elektrik (kWh)	3,24
Dizel (kg)	0,774
Doğal gaz (m3)	0,008

Asfalt karışımların inşaat sahasında serilmesi ve sıkıştırılması işlemlerinin 172 kg/km dizel tüketimine sahip serici, 105 kg/km dizel tüketimine sahip silindir ile gerçekleştirileceği varsayılmıştır (Wang ve diğ., 2021).

Ham maddelerin asfalt plentine taşınması, asfalt karışımının plentten inşaat sahasına taşınması ve kaldırılan asfalt karışımının geri dönüşüm sahasına taşınması aşamalarında 0,28 kg/km dizel yakıtlı, 24-ton taşıma kapasiteli, tek tip damperli kamyon kullanılacağı düşünülmüştür. Hizmet ömrünü tamamlamış asfalt kaplamanın kaldırılması operasyonunda 40 kg/s dizel yakıtlı ve 120 ton/s çalışma kapasiteli greyder, 400 ton/s kapasiteli ve 17,2 kg/s dizel tüketimine sahip yükleyici, 0,0240 s/m² asfalt kaldırma kapasiteli ve 16,4 kg/s dizel tüketimine sahip kırıcı-ekskavatör kullanılacağı dikkate alınmıştır (Moins ve diğ., 2023; Oner ve Yabaneri, 2023).

Analizlerde her YDD aşaması için gerekli yakıt tüketimi ve enerji sarfiyatı değerleri belirlenmiş ve

karbondioksit (CO₂), metan (CH₄), karbonmonoksit (CO), nitroz oksit (N₂O), nitrojendioksit (NO₂) ve kükürtdioksit (SO₂) emisyonları Tablo 4'te gösterilen dönüşümler kullanılarak hesaplanmıştır (Cong vd., 2020),(Agency, 2023).

Tablo 4. Kullanılan yakıtların enerji ve emisyon dönüşüm değerleri

Yakıt	Enerji (MJ)	Emisyonlar (kg)					
		CH ₄	SO ₂	N ₂ O	NO ₂	CO	CO ₂
Benzin (kg)	4,31E+1	3,07E+0	0,13E-3	0,3E-3	0,35E-3	0,3E-3	1,60E-3
Dizel (kg)	4,27E+1	0,13E-3	0,7E-3	0,3E-3	2,44E-3	0,35E-3	3,19E+0
Elektrik (kWh)	3,60E+0	9,30E-1	2,63E-3	1,42E-3	1,74E-3	3,17E-3	2,58E-3
Doğal gaz (m3)	3,96E+01	3,75E-02	-	3,75E-03	-	-	1,99E+0

2.2.3. YDD Orta Nokta Etki Kategorileri

Orta-nokta etkileri, YDD envanter aşamalarının her biri için fonksiyonel birim başına emisyon değerlerinin hesaplanması ve bu değerlerin ilgili katsayılar kullanılarak etki kategorilerine dönüştürülmesi ile belirlenmiştir. Tablo 5'te asfalt kaplama uygulamalarında aşama bazlı çevresel etki kategorileri ve teknik detaylar verilmiştir.

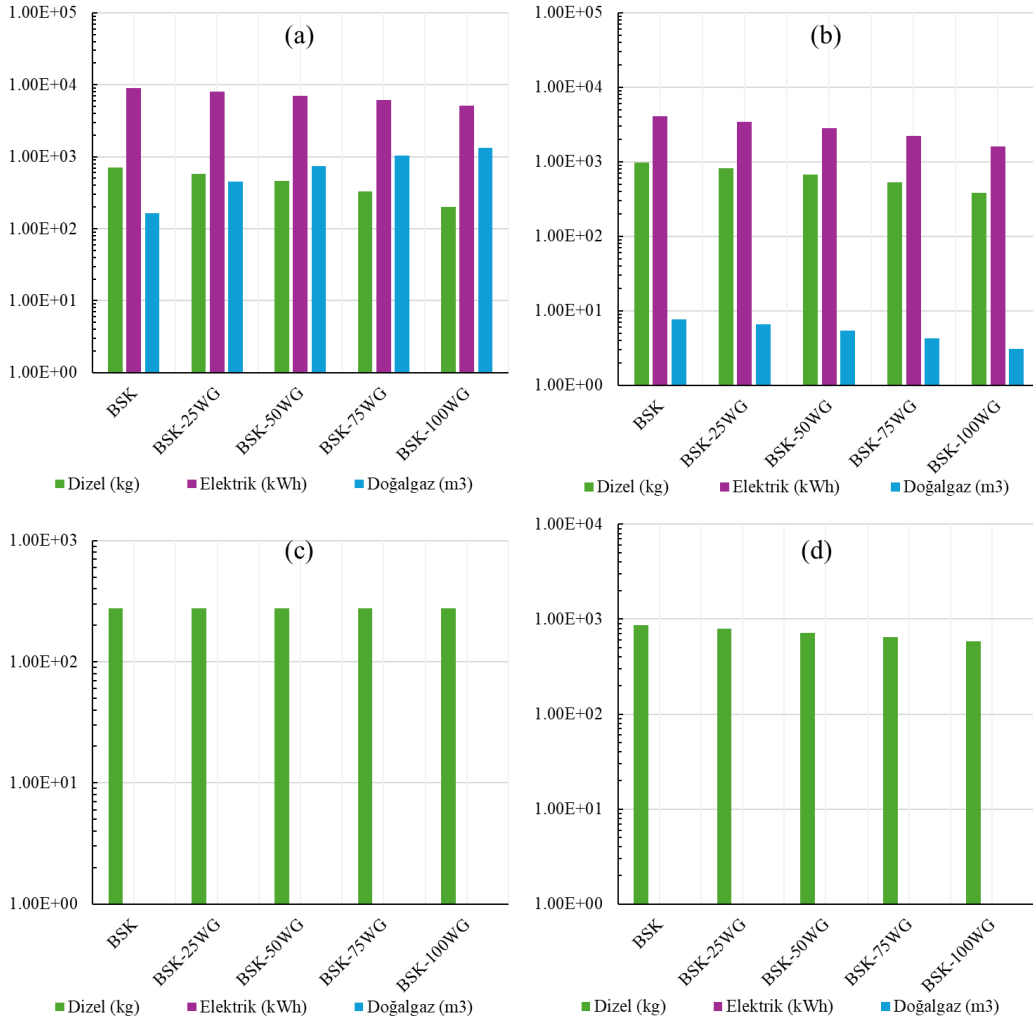
Tablo 5. Envanter aşamalarına göre çevresel etki faktörleri ve dönüşüm değerleri

Aşama	Etki alanı	Birim	Envanter yükü	Katsayı	
HM	Fosil yakıt tüketimi (CED)	GJ	Enerji (GJ)	1	
		kg	CO2	1	
	Küresel ısınma (GWP100)	CO2-eşd.	CH4	23	
		(100-yıl)	N2O	296	
		kg	SO2	1	
	Asidifikasyon (AP)	SO2-eşd.	NO2	0,7	
		SO2	0,048		
AU	Fotokimyasal ozon (FOP)	kg	NO2	0,028	
		C2H4-eşd.	CO	0,027	
			CH4	0,006	
	Toksosite (TP)	kg	SO2	0,096	
		1,4-DCB-eşd.	NO2	1,2	
			CO	2,4	
SS	Ötrofikasyon (EP)	kg	PO4-eşd.	N2O	0,13

3. Bulgular ve Tartışma

Envanter analizlerinde her bir YDD aşaması için gerekli yakıt değerleri belirlenmiş ve emisyonlar ile ilişkilendirilmiştir. YDD envanterin aşamalara göre analizleri ile elde edilen yakıt tüketimi değerleri Şekil 2'de yer almaktadır. Değerler incelendiğinde, asfalt karışımındaki ince agrega yerine ikame edilen atık cam oranının artışı ile Şekil 2a'da gösterilen HM aşaması için dizel ve benzin yakıt tüketim değerlerinin azaldığı, doğalgaz tüketim değerlerinin ise arttığı görülmektedir. Atık camın asfalt karışımında kullanılabilir forma dönüştürülmesinde gerekli enerji miktarının kırmataş agregaya göre daha yüksek olduğu bulguları literatürde yer almaktadır (Bianco ve diğ., 2021; Hossain ve diğ., 2016).

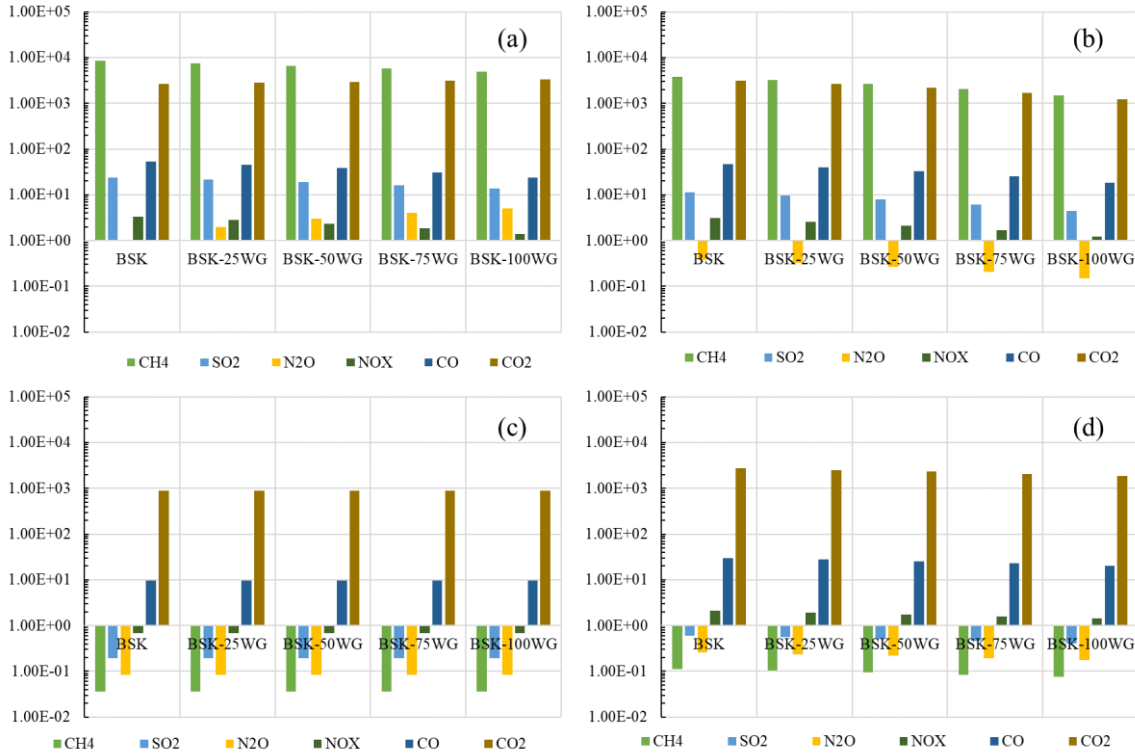
Şekil 2b ve Şekil 2d'de yer alan AU ve SS aşamalarında ise tüm yakıt tüketimlerinin atık cam miktarına bağlı azaldığı görülmektedir. Kırmataş agregaya göre çok daha düşük yoğunluğa sahip atık camın (Tablo 2) asfalt karışımındaki miktarının artması, karışım özgül ağırlığını düşürmüş dolayısı ile fonksiyonel birim için gerekli bileşen miktarı azalmıştır.



Şekil 2. Envanter aşamalarına göre yakıt tüketim değerleri (a) HM (b) AU (c) KI (d) SS

Şekil 2c'de yer alan grafikte KI aşamasındaki dizel yakıt tüketimlerinin tüm asfalt karışım türleri için eşit olduğu görülmektedir. Bu durum, KI aşamasında kullanılan tek tipte asfalt serim ve sıkıştırma ekipmanları ile ilişkilidir. YDD aşamaları için belirlenen

yakıt tüketim değerleri, yer alan emisyon dönüşüm değerleri (Tablo 4) ve bileşen oranları kullanılarak asfalt karışımların YDD sistem sınırları içerisinde ürettiği CH₄, CO₂, CO, N₂O, NO_x ve SO₂ emisyonları hesaplanmış ve Şekil 3'te sunulmuştur.



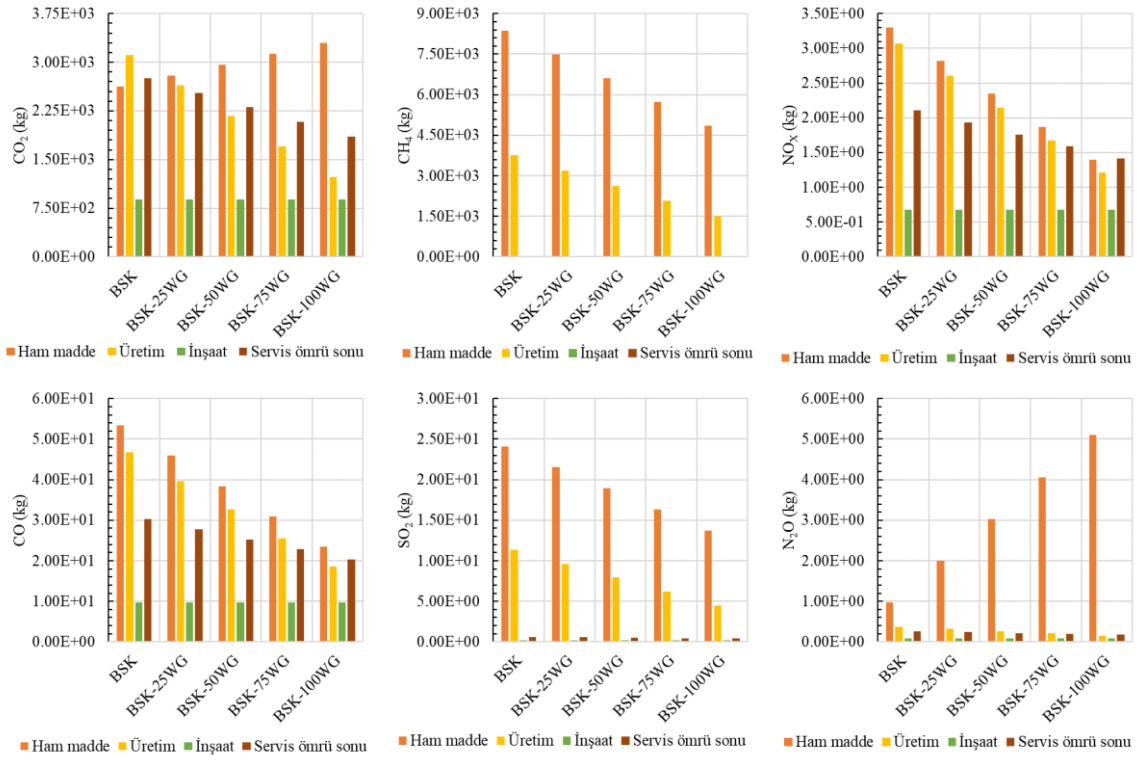
Şekil 3. Envanter aşamalarına göre emisyon değerleri (a) HM (b) AU (c) KI (d) SS

Şekil 3b'de yer alan AU aşamasındaki emisyon değerlerinin HM aşamasına benzer trendde sahip olduğu, N₂O ve CO₂ emisyonlarının AU aşamasında atık cam miktarına bağlı olarak azaldığı görülmüştür. İş makinesi çalışmalarının ve operasyonel faaliyetlerin dikkate alındığı KI ve SS (Şekil 3c ve Şekil 3d) aşamalarında ise CO ve CO₂ emisyonlarının belirgin etkisi göze çarpmaktadır. KI aşamasındaki emisyon değerleri tüm asfalt karışım türleri için eşit olarak elde edilirken, SS aşamasında %50 atık cam içeriğinde CO ve CO₂ emisyonlarının yaklaşık 1.2 kat azaldığı belirlenmiştir.

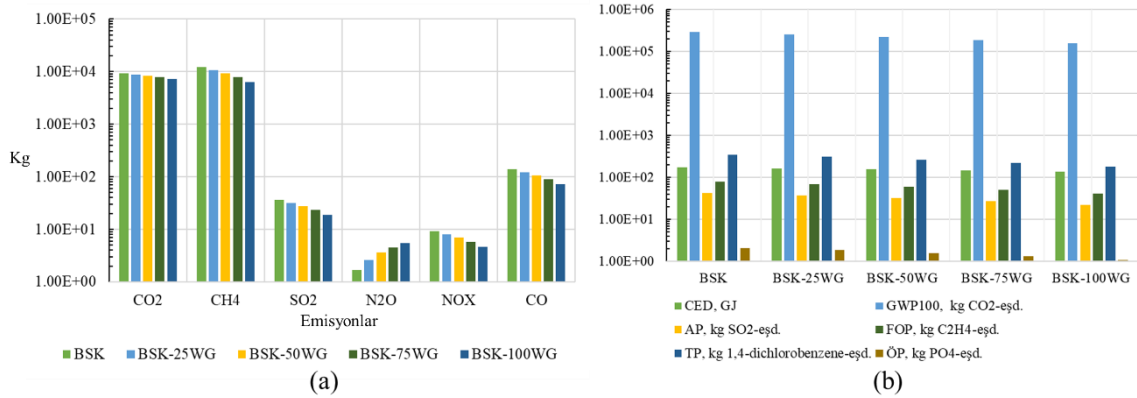
Asfalt karışımların emisyon oluşturma potansiyellerinin YDD aşamalarına göre değişimi Şekil 4'te yer almaktadır. Grafikler incelendiğinde, CO₂ emisyonu dışında tüm emisyonlar için en yüksek değerlerin HM aşamasında olduğu belirlenmiştir. CH₄ ve SO₂ emisyonlarında AU ve HM, N₂O emisyonu için ise HM aşamasının diğer YDD envanter bileşenlerine göre daha baskın olduğu görülmüştür. CO₂ emisyonu için AU aşamasının katkısı daha yüksek bulunmuştur. CO ve NO_x emisyonlarında %100 oranında atık cam

içerikli karışım türleri için SS aşamalarının etkisi AU ve HM aşamasına göre daha yüksek olarak bulunmuştur.

YDD envanter analizi sonuçları, asfalt karışımında farklı oranlarda atık cam ikamesinin dizel ve elektrik gereksinimlerinde azalmaya sebep olduğunu ve bu durumun emisyon salınımlarına olumlu olarak yansıdığını ortaya koymuştur. Öte yandan atık camın, agregaya göre daha yüksek doğal gaz tüketimi gereksinimleri özellikle HM aşamasındaki N₂O ve CO₂ emisyonları üzerinde etkili bulunmuştur. Atık cam ilavesi ile elde edilen geleneksel asfalta göre daha düşük emisyon çıktılarını literatürde paylaşmıştır (Huang vd., 2009). Çalışma kapsamında kullanım aşamasının dikkate alınmadığını belirtmekte fayda vardır. Nitekim, Chiu vd. (2008) atık cam takviyeli asfalt karışımında düşük durabilite değerlerine istinaden uygulanan sık bakım-onarım aktivitelerinin bir sonucu olarak 40 yıllık analiz süresinde yaklaşık %19 emisyon artışı ile sonuçlandığını raporlamıştır. YDD etki analizi araştırması, incelenen asfalt karışımların sistem sınırları boyunca ürettiği toplam emisyon değerlerinin kategorizasyon faktörleri (Tablo 5) aracılığı ile ekti kategorilerine dönüştürülmesi ile gerçekleştirilmiştir. Şekil 5'te YDD etki analizi sonuçları paylaşmıştır.



Şekil 4. Envanter aşamalarının emisyon oluşturma potansiyelleri

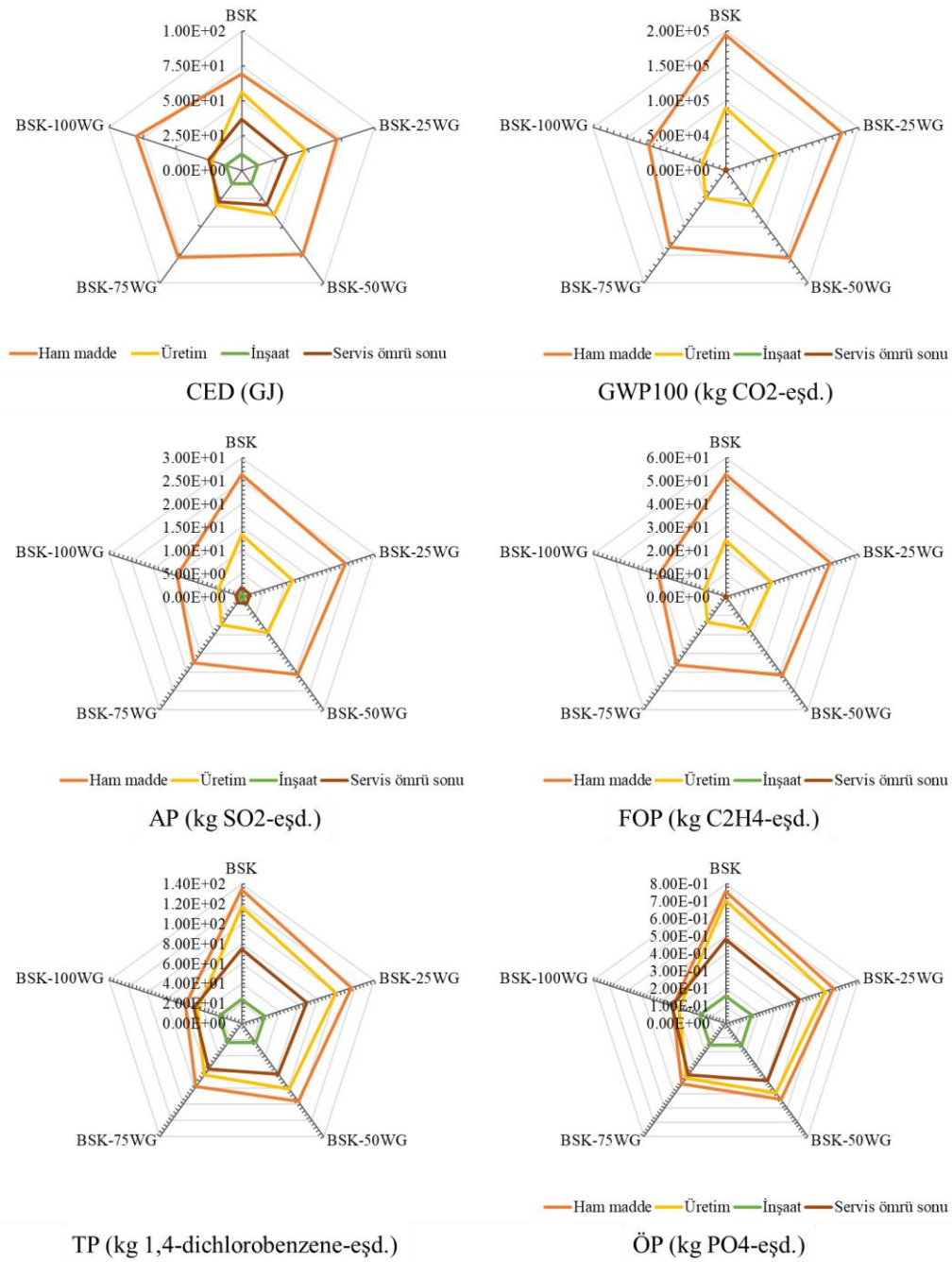


Şekil 5. İncelenen asfalt kaplamaların (a) toplam emisyon değerleri (b) çevresel etki faktörleri

Grafikler incelendiğinde, Şekil 5a'da yer alan N₂O haricindeki toplam emisyon değerlerinin karışım içerisindeki atık cam miktarına bağlı olarak azaldığı görülmektedir. Geleneksel asfalt kaplama ile karşılaştırıldığında %25 atık cam içeren asfalt karışımlarda SO₂, NO_x ve CO emisyonları sırası ile 1,137, 1,138 ve 1,138 kat daha düşük olarak elde edilmiştir. Atık cam içeriğinin CO₂ emisyonu üzerindeki etkisi ise %25 atık cam oranında %5,62 olarak kaydedilmiştir. CO₂ emisyonlarındaki bu belli-belirsiz etkiye geçmiş dönem çalışmalarında değinilmiştir (Huang vd., 2009).

N₂O emisyonu değerlendirildiğinde, karışımdaki atık cam miktarına bağlı kademeli olarak yükseldiği

belirlenmiştir. Bu bağlamda, %25 ve %100 atık cam içeriğinde geleneksel asfalta göre sırası ile 1,56 ve 3,27 kat daha fazla diazot monoksit salınımının gerçekleştiği tespit edilmiştir. N₂O emisyonlarının, stratosferik ozon tabakasında incelmeye ve iklim değişikliği gibi konulara olan etkisi literatürde tartışılmaktadır (Tian ve diğ., 2020). Bu bağlamda, atık cam ilavesinin N₂O salınımları üzerinde olumsuz etkiye sahip olacağını not etmek gerekir. Atık cam muhteva eden asfalt karışımların emisyon salınımlarında en yüksek değerler CH₄ sera gazında görülmüştür. Bu noktada incelenen emisyonların proses bazlı hesaplandığına ve malzemelerin yıllar içinde bozunumları sırasında ortaya çıkan emisyonların sistem sınırları dışında bırakıldığına dikkat çekilmelidir.



Şekil 6. Atık cam oranına bağlı çevresel yüklerin değişimi

Şekil 6'da incelenen asfalt karışımları için, çalışma kapsamında dikkate alınan çevresel indikatörlerin ve toplam enerji gereksiniminin YDD aşamalarına göre değişimi sunulmuştur. Asfalt karışımların YDD aşamalarına göre enerji gereksinimleri değerlendirildiğinde geleneksel asfalt karışımında (%100 kırmataş agrega içerikli) CED sarfiyatlarının ağırlıklı olarak HM ve AU aşamalarında kaydedildiği görülmüştür. Agregaların kırılması, plentte kurutulması, rafine bitümün elde edilmesi, uygun sıcaklıklarda ısıtılarak karıştırılması gibi parametreler

geçmiş dönem çalışmalarında bu aşamalar için yoğun enerji tüketimine ihtiyaç olduğuna işaret etmektedir (Dias ve diğ., 2022; Zhang ve diğ., 2019). Bununla beraber, karışım içerisindeki atık cam ilavesinin artışı ile CED indikatörünün HM ve AU aşamalarındaki değerleri azalmaktadır. Bulgular, kırmataş yerine tamamen atık cam kullanıldığı durumda HM, AU ve SS aşamaları için sırası ile 3,63, 2,52 ve 1,48 kat enerji tasarrufu sağlanabileceğini ortaya koymuştur.

GWP-100'ün aldığı değerlerin aşamalara bağlı değişimi incelendiğinde HM aşamasının en yüksek potansiyele

sahip olduğu görülmüştür. Atık cam oranının %25, %50 ve %75 olduğu durumlar için karışımların geleneksel asfalt karışıma göre GWP-100 indikatörüne etkileri HM aşamasında sırasıyla 1,26, 1,72 ve 2,70 olarak elde edilmiştir. İlgili değerler AU aşamasında 1,17, 1,43 ve 1,82 olarak kaydedilmiştir. Ek olarak, KI aşamasının GWP-100 indikatörüne etkisinin tüm karışımlarda eşit olduğunun belirtilmesi gerekir. Bu durum, daha önce de değinildiği üzere tek tip inşaat ekipmanı kullanımından kaynaklıdır. AP ve FOP çıktıları için de benzer yorumlar yapılabilir. Literatürde atık cam ilavesinin FOP ve ÖP üzerindeki etkilerine yönelik bulgular yer almaktadır (Khater ve diğ., 2021). Bununla beraber TP ve ÖP indikatörleri üzerinde, %75 ve %100 oranlarında atık cam içeren karışımlarda SS aşamasının belirgin etkisi gözlemlenmiştir. Bu bağlamda, %75 atık cam içerikli asfalt karışımında SS aşamasının toksisite üzerindeki etkileri, HM aşamasına ile eşit, %100 atık cam içerikli karışımında ise HM aşamasından 1,08 kat daha yüksek bulunmuştur.

4. Sonuçlar

Çalışma kapsamında geleneksel asfalt karışım ve %25 ila %100 aralığında atık cam ikame eden asfalt karışımların gerekli ham maddelerin temini & üretimi sürecinden, asfalt kaplamanın kaldırılmasına kadar yaşam döngüsü boyunca yakıt tüketimlerinin ve sera gazı emisyonlarının hesaplanması, buna bağlı çevresel etkilerinin karakterizasyonu gerçekleştirilmiştir. Araştırmadan çıkarılan temel sonuçlar ve genel değerlendirme aşağıda sunulmuştur.

- Araştırma sonuçları asfalt kaplama uygulamalarında kırmataş ince agregaya yerine belirli oranda atık cam kullanımı ile SO₂, NO_x, CO, CH₄ ve CO₂ emisyonlarında azalma sağlanabileceğini gösterdi.
- Atık camın kırmataş agregaya nazaran daha düşük dizel ve elektrik gereksinimi ve düşük özgül ağırlığa sahip atık camın dikkate alınan fonksiyonel birim (1 km uzunluk, 10 m genişlik, 0,05m kalınlık) için gerekli asfalt karışım miktarını (kg) azaltması durumları AU ve SS aşamalarındaki emisyon ve yakıt tüketimi değerlerinde kazanım sağladı.
- N₂O emisyonu atık cam oranına bağlı olarak kademeli arttı. HM aşamasındaki atık camın yüksek doğal gaz gereksinimi buna temel sebep olarak görüldü.
- Atık cam ilavesi ile tüm çevresel indikatörlerde kazanım sağlandı. En yüksek kazanımlar TP ve ÖP'de elde edildi. Düşük oranda (%25) atık cam içerikli kaplamalarda GWP-100 indikatöründeki kazanımlar belirginliğini yitirdi. Çevresel indikatörlere en yüksek katkıların HM aşamasında gerçekleştiği belirlendi.

Bu kazanımlara ek olarak araştırma bulguları, %25, %50, %75 ve %100 atık cam ikame eden karışımlarda incelenen fonksiyonel birim başına sırası ile 118, 236, 354 ve 472 ton atık camın düzenli depolanması yerine geri dönüştürülmesine imkân sağlanabileceğini ortaya koymuştur.

Atık camların düzenli depolanması halen yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir. Düzenli depolamanın getirdiği olumsuzluklar, cam atıklarının yönetilmesinde alternatif stratejilerin benimsenmesini gerekli kılmaktadır. Çalışmada cam atıklarının yönetiminde asfalt karışımların etkili olabileceğine yönelik bulgular sunulmuştur. Araştırmada HM, AU, KI ve SS aşamaları YDD sınırlarına dahil edilmiş kullanım, bakım-onarım faaliyetleri, yeniden inşaat gibi aşamalar ise veri güvenilirliğinden ve yetersizliğinden kaynaklı olarak sistem sınırları dışında bırakılmıştır.

YDD analizlerinde sistem sınırlarının ve metodolojinin analizlerin amacına göre beşikten-beşiğe, beşikten-mezara veya beşikten-kapıya şeklinde değişebileceği belirtilmelidir. Bununla beraber, yeterli veri ve kabul görmüş spesifikasyonların bulunmaması durumunda analizler bazı envanter aşamaları için senaryo bazlı gerçekleştirilebilir. Bu çalışmada, ince agregaya yerine belirli oranda atık cam ikame edilmesinin oluşturacağı potansiyel çevresel yüklerin değerlendirilmesi amaçlanmıştır. Bu kapsamda beşikten-kapıya bir YDD metodolojisi benimsenmiş ve kullanım, servis süresi, bakım & onarım gibi kaplamaların performans parametrelerinin de dikkate alınması gerektiği aşamalar analiz kapsamı dışında bırakılmıştır. Asfalt kaplamalarda agregaya yerine farklı oranlarda ve dane boyutlarında atık cam kullanımının karışımın mühendislik performansı üzerinde olumlu etki yaptığını dair bulgular geçmiş dönemde paylaşılmıştır. Öte yandan, performans analizlerinin asfalt YDD envanteri ile entegre edildiği ve senaryo bazlı karşılaştırmalara dayalı analizler gelecek çalışmalar için faydalı olacaktır.

Araştırmacıların Katkısı

Bu araştırmada; Burak Yiğit Katanalp, analizlerin gerçekleştirilmesi, verilerin derlenmesi, makalenin yazılması ve düzenlenmesi aşamalarında katkı sağlamıştır.

Çıkar Çatışması

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir.

Kaynaklar

Agency, U. S. E. P. (2023). *Emission Factors for Greenhouse Gas Inventories*. Retrieved from https://www.epa.gov/system/files/documents/2023-03/ghg_emission_factors_hub.pdf

- Aliyu, M. S., Ugochi, E. A., Ohagoro, O. C., Ahmad, U. H., ve Chibueze, A. (2021). A Review on Performance of Hybrid Asphalt Mix in Pavement Maintenance and Rehabilitation. *environment*, 3(8).
- Almusawi, A., Sengoz, B., Ozdemir, D. K., ve Topal, A. (2022). Economic and environmental impacts of utilizing lower production temperatures for different bitumen samples in a batch plant. *Case Studies in Construction Materials*, 16, e00987.
- Bianco, I., Tomos, B. A. D., ve Vinai, R. (2021). Analysis of the environmental impacts of alkali-activated concrete produced with waste glass-derived silicate activator—a LCA study. *Journal of Cleaner Production*, 316, 128383.
- Bilgen, G. (2020). Utilization of powdered glass as an additive in clayey soils. *Geotechnical and geological engineering*, 38(3), 3163-3173.
- Blayi, R. A., Sherwani, A. F. H., Ibrahim, H. H., Faraj, R. H., ve Daraei, A. (2020). Strength improvement of expansive soil by utilizing waste glass powder. *Case Studies in Construction Materials*, 13, e00427.
- Blengini, G. A., Busto, M., Fantoni, M., ve Fino, D. (2012). Eco-efficient waste glass recycling: Integrated waste management and green product development through LCA. *Waste management*, 32(5), 1000-1008.
- Canpolat, M., Beycioglu, A., Morova, N., Cetin, S., Cetin, H. M., ve Gündoğan, H. (2022). Atık olivin mineralinin asfalt betonunda filler olarak kullanımı. *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 10(2), 555-566.
- Cheng, M., Chen, M., Wu, S., Yang, T., Zhang, J., ve Zhao, Y. (2021). Effect of waste glass aggregate on performance of asphalt micro-surfacing. *Construction and Building Materials*, 307, 125133.
- Chiu, C.-T., Hsu, T.-H., ve Yang, W.-F. (2008). Life cycle assessment on using recycled materials for rehabilitating asphalt pavements. *Resources, Conservation and Recycling*, 52(3), 545-556.
- Choudhary, J., Kumar, B., ve Gupta, A. (2021). Utilization of waste glass powder and glass composite fillers in asphalt pavements. *Advances in Civil Engineering*, 2021, 1-17.
- Cong, L., Guo, G., Yu, M., Yang, F., ve Tan, L. (2020). The energy consumption and emission of polyurethane pavement construction based on life cycle assessment. *Journal of Cleaner Production*, 256, 120395.
- Demirel, S., Öz, H. Ö., Güneş, M., Çiner, F., ve Adın, S. (2019). Life-cycle assessment (LCA) aspects and strength characteristics of self-compacting mortars (SCMs) incorporating fly ash and waste glass PET. *The international journal of life cycle assessment*, 24, 1139-1153.
- Dias, A., Nezami, S., Silvestre, J., Kurda, R., Silva, R., Martins, I., ve de Brito, J. (2022). Environmental and economic comparison of natural and recycled aggregates using LCA. *Recycling*, 7(4), 43.
- Farina, A., Kutay, M. E., ve Anctil, A. (2023). Environmental assessment of asphalt mixtures modified with polymer coated rubber from scrap tires. *Journal of Cleaner Production*, 418, 138090.
- Gedik, A. (2021). An exploration into the utilization of recycled waste glass as a surrogate powder to crushed stone dust in asphalt pavement construction. *Construction and Building Materials*, 300, 123980.
- Guillot, J. D. (2023). *Waste management in the EU: infographic with facts and figures*. (20180328STO00751). European Parliament Retrieved from https://www.europarl.europa.eu/pdfs/news/expert/2018/4/story/20180328STO00751/20180328STO00751_en.pdf#:~:text=Every%20year%202.2%20billion%20tonnes%20of%20waste%20are,by%20municipalities%2C%20which%20is%20mainly%20generated%20by%20households.
- Günay, T., Katanalp, B. Y., Taştan, M., ve Ahmedzade, P. (2023). A posterior hybrid ML optimization to analyze the relationship between high temperature rheological factors of the Superpave PG and improved PG+ asphalt specifications. *Construction and Building Materials*, 401, 132803.
- Hamzah, M. O., Jamshidi, A., ve Shahadan, Z. (2010). Evaluation of the potential of Sasobit® to reduce required heat energy and CO2 emission in the asphalt industry. *Journal of Cleaner Production*, 18(18), 1859-1865.
- Hossain, M. U., Poon, C. S., Lo, I. M., ve Cheng, J. C. (2016). Comparative environmental evaluation of aggregate production from recycled waste materials and virgin sources by LCA. *Resources, Conservation and Recycling*, 109, 67-77.
- Huang, Y., Bird, R., ve Heidrich, O. (2009). Development of a life cycle assessment tool for construction and maintenance of asphalt pavements. *Journal of Cleaner Production*, 17(2), 283-296.
- Kalampokis, S., Kalama, D., Kesikidou, F., Stefanidou, M., ve Manthos, E. (2023). Assessment of waste glass

- incorporation in asphalt concrete for surface layer construction. *Materials*, 16(14), 4938.
- Katanalp, B. Y., ve Ahmedzade, P. (2023). Rheological Evaluation and Life Cycle Cost Analysis of the Geopolymer Produced from Waste Ferrochrome Electric Arc Furnace Fume as a Composite Component in Bitumen Modification. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 35(11), 04023401.
- Katanalp, B. Y., Tastan, M., ve Ahmedzade, P. (2024). Recycling the electric arc furnace waste after geopolymerization in bitumen: experimental analyses and LCA study. *Materials and Structures*, 57(5), 103.
- Katanalp, B. Y., Yildirim, Z. B., Karacasu, M., ve Ibrici, T. (2019). Atık Kömür Katkili Asfalt Betonunun Performans KARAKTERİSTİKLERİNİN Yapay SİNİR AĞLARI ve MERKEZİ KOMPOZİT Tasarım YÖNTEMLERİ Kullanılarak Karşılaştırılması. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 7(3), 680-688.
- Kazmi, D., Williams, D. J., ve Serati, M. (2020). Waste glass in civil engineering applications—A review. *International Journal of Applied Ceramic Technology*, 17(2), 529-554.
- Khater, A., Luo, D., Abdelsalam, M., Ma, J., ve Ghazy, M. (2021). Comparative life cycle assessment of asphalt mixtures using composite admixtures of lignin and glass fibers. *Materials*, 14(21), 6589.
- Mammeri, A., Vaillancourt, M., ve Shamsaei, M. (2023). Experimental and numerical investigation of using waste glass aggregates in asphalt pavement to mitigate urban heat islands. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 1-14.
- Marceau, M., Nisbet, M. A., ve Van Geem, M. G. (2007). *Life cycle inventory of portland cement concrete*: Portland Cement Association.
- Ming, N. C., Jaya, R. P., Awang, H., Ing, N. L. S., Hasan, M. R. M., ve Al-Saffar, Z. H. (2022). Performance of glass powder as bitumen modifier in hot mix asphalt. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 128, 103263.
- Mohajerani, A., Vajna, J., Cheung, T. H. H., Kurmus, H., Arulrajah, A., ve Horpibulsuk, S. (2017). Practical recycling applications of crushed waste glass in construction materials: A review. *Construction and Building Materials*, 156, 443-467.
- Moins, B., Beck, C., Hernando, D., ve Audenaert, A. (2023). An investigation on the use of lean asphalt as an alternative base material in asphalt pavements by means of laboratory testing, life cycle assessment, and life cycle cost analysis. *Resources, Conservation and Recycling*, 194, 106992.
- Movilla-Quesada, D., Lagos-Varas, M., Raposeiras, A. C., Muñoz-Cáceres, O., Andrés-Valeri, V. C., ve Aguilar-Vidal, C. (2021). Analysis of greenhouse gas emissions and the environmental impact of the production of asphalt mixes modified with recycled materials. *Sustainability*, 13(14), 8081.
- Oner, J., ve Yabaneri, Y. (2023). Carbon Footprint Detection of Asphalt Pavements. *Usak University Journal of Engineering Sciences*, 6(2), 83-89.
- Qin, D., Hu, Y., ve Li, X. (2021). Waste glass utilization in cement-based materials for sustainable construction: A review. *Crystals*, 11(6), 710.
- Shafabakhsh, G., ve Sajed, Y. (2014). Investigation of dynamic behavior of hot mix asphalt containing waste materials; case study: Glass cullet. *Case Studies in Construction Materials*, 1, 96-103.
- Simone, A., Mazzotta, F., Eskandarsefat, S., Sangiorgi, C., Vignali, V., Lantieri, C., ve Dondi, G. (2019). Experimental application of waste glass powder filler in recycled dense-graded asphalt mixtures. *Road Materials and Pavement Design*, 20(3), 592-607.
- Tahmoorian, F., Samali, B., Yeaman, J., ve Crabb, R. (2018). The use of glass to optimize bitumen absorption of hot mix asphalt containing recycled construction aggregates. *Materials*, 11(7), 1053.
- Tian, H., Xu, R., Canadell, J. G., Thompson, R. L., Winiwarter, W., Suntharalingam, P., . . . Janssens-Maenhout, G. (2020). A comprehensive quantification of global nitrous oxide sources and sinks. *Nature*, 586(7828), 248-256.
- Tushar, Q., Salehi, S., Santos, J., Zhang, G., Bhuiyan, M. A., Arashpour, M., ve Giustozzi, F. (2023). Application of recycled crushed glass in road pavements and pipeline bedding: An integrated environmental evaluation using LCA. *Science of the Total Environment*, 881, 163488.
- Varol, H. (2023). Atık Cam Tozunun Bitümlü Sıcak Karışımlarda Filler Olarak Değerlendirilmesi. *Teknik Bilimler Dergisi*, 13(1), 29-33.
- Wang, F., Hoff, I., Yang, F., Wu, S., Xie, J., Li, N., ve Zhang, L. (2021). Comparative assessments for environmental impacts from three advanced asphalt pavement construction cases. *Journal of Cleaner Production*, 297, 126659.

Yang, R. (2014). Development of a pavement life cycle assessment tool utilizing regional data and introducing an asphalt binder model.

Zarei, M., Rahmani, Z., Zahedi, M., ve Nasrollahi, M. (2020). Technical, economic, and environmental investigation of the effects of rubber powder additive on asphalt mixtures. *Journal of Transportation Engineering, Part B: Pavements*, 146(1), 04019039.

Zhang, Y., Luo, W., Wang, J., Wang, Y., Xu, Y., ve Xiao, J. (2019). A review of life cycle assessment of recycled aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, 209, 115-125.