



Araştırma Makalesi/ Research Article

Dolgu tesviyelerinde yerinde malzeme yönetimi ve sürdürülebilir çevresel etkiler

On-site material management and sustainable environmental impacts in embankment gradings

Meryem YILMAZ^{1,2}*, Zülal AKBAY ARAMA³

¹ İstanbul Üniversitesi- Cerrahpaşa, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, meryem.yilmaz@ogr.iuc.edu.tr

² Haliç Üniversitesi, Meslek Yüksekokulu, merymyilmaz@gmail.com, Orcid No: 0000-0001-8663-0406

³ İstanbul Üniversitesi- Cerrahpaşa, İnşaat Mühendisliği Bölümü, zakbay@iuc.edu.tr, Orcid No: 0000-0001-8185-7329

MAKALE BİLGİLERİ

Makale Geçmişi:

Geliş 10 Ekim 2025
Revizyon 10 Kasım 2025
Kabul 26 Kasım 2025
Online 24 Mart 2026

Anahtar Kelimeler:

Karayolu dolgusu, yerinde malzeme kullanımı, sürdürülebilirlik, karbon ayak izi, döngüsel ekonomi, parametrik analiz.

ÖZ

Bu çalışmada; karayolu altyapı projelerinde oluşturulan dolgu kesitlerinin tesviye edilmesinde, şantiye sahasında elde edilen kazı fazlası uygun nitelikli malzemelerin yerinde kullanımının çevresel etkilerine odaklanılmaktadır. Çalışma, geleneksel dışarıdan malzeme tedarikine dayalı yöntemlerle karşılaştırıldığında yerinde malzeme kullanımının sürdürülebilirlik ve karbon ayak izi azaltımı potansiyelini değerlendirmektedir. Bu bağlamda çalışma kapsamında, İstanbul İli Şile İlçesi Sahilköy-Kurna karayolunda 2024-2025 yılında gerçekleştirilen yol genişletme çalışmalarında uygulanan tesviye işlemleri göz önüne alınmıştır. İlgili güzergâh için uygulanan arazi karakterizasyonu çalışmalarının akabinde, sahada mevcut bulunan zeminlerin temel ve altyapı malzemesi olarak kullanımı sonucunda elde edilecek güvenlik ve deformasyon seviyeleri sonlu elemanlar yöntemi ile çalışan iki boyutlu ticari bir program olan Plaxis 2D’de farklı kesitler kullanımı ile yorumlanmıştır. Bu analizlerin değerlendirilmesiyle inşaa sürecinde kullanılması gereken malzeme miktarları, ekipman çeşidi ve sayısı belirlenerek nakliye kaynaklı fosil yakıt tüketimi ve sera gazı emisyonu, ocaklardan malzeme taşınım oranı ve arazi kullanım değişiklikleri Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı 2025 yılı İnşaat ve Tesisat Birim Fiyatları’ndan faydalanarak hesaplanmıştır. Bu yolla elde edilen karşılaştırmalı verilere göre nakliye kaynaklı fosil yakıt tüketimi ve sera gazı emisyonlarında belirgin düşüş sağlanmakta, yeni malzeme ocakları sahalalarının açılmasına bağlı arazi kullanım değişiklikleri önlenmektedir. Ayrıca, proje kaynaklı atık hacmi azaltılarak düzenli depolama sahaları üzerindeki yük hafifletilmekte ve yerel çevresel etkiler azaltılmaktadır. Elde edilen bulgular, yerinde malzeme kullanımının projenin yaşam döngüsü değerlendirmesi çerçevesinde toplam çevresel ayak izini optimize ettiğini ve döngüsel ekonomi prensiplerini desteklediğini göstermektedir. Yapılan hesaplamalara göre, yerinde malzeme kullanımı ile nakliyeyle bağlı sera gazı emisyonlarında belirgin bir düşüş sağlanmakta, yeni malzeme ocakları sahalalarının açılması önlenmekte ve proje kaynaklı atık hacmi azalmaktadır. Sonuç olarak, yerinde malzeme yönetimi, karayolu altyapı projelerinde sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşmada ve iklim değişikliğiyle mücadelede teknik ve çevresel açıdan avantajlı, etkin bir stratejidir.

ARTICLE INFO

Article history:

Received 10 October 2025
Received in revised form 10 November 2025
Accepted 26 November 2025
Available online 24 March 2026

Keywords:

Road embankment, on-site material usage, sustainability, carbon footprint, circular economy, parametric analysis.

ABSTRACT

This study focuses on the environmental impacts of using excavation surplus materials obtained on-site in the grading of fill sections created in highway infrastructure projects. The study evaluates the potential of on-site material use for sustainability and carbon footprint reduction compared to traditional methods based on external material supply. In this context, the grading operations implemented during the road widening works carried out on the Sahilköy-Kurna highway in Şile District, Istanbul Province, in 2024-2025 were considered within the scope of the study. Following the site characterization studies conducted for the relevant route, the safety and deformation levels that would be achieved by using the existing soils in the field as foundation and infrastructure materials were interpreted using different cross-sections in Plaxis 2D, a two-dimensional commercial program that works with the finite element method. By evaluating these analyses, the amount of material, type and number of equipment to be used in the construction process were determined, and fossil fuel consumption and greenhouse gas emissions from transportation, the rate of material transport from quarries, and changes in land use were calculated using the 2025 Construction and Installation Unit Prices of the Ministry of Environment, Urbanization and Climate Change. According to the comparative data obtained in this way, a significant reduction in fossil fuel consumption and greenhouse gas emissions from transportation is achieved. According to comparative data obtained through this method, there is a significant reduction in fossil fuel consumption and greenhouse gas emissions from transportation, and changes in land use associated with the opening of new material quarry sites are prevented. In addition, the volume of project-related waste is reduced, alleviating the burden on regular storage sites and reducing local environmental impacts. The findings show that on-site material use optimizes the total environmental footprint within the project's life cycle assessment and supports circular economy principles. According to the calculations, on-site material use significantly reduces transportation-related greenhouse gas emissions, prevents the opening of new material quarry sites, and reduces project-related waste volume. In conclusion, on-site material management is a technically and environmentally advantageous, effective strategy for achieving sustainability goals and combating climate change in road infrastructure projects.

Doi: 10.24012/dumf.1800589

* Sorumlu Yazar

Giriş

Karayolu altyapı projeleri, şehirleşmenin hız kazandığı günümüzde ulaşımın sürdürülebilir şekilde planlanmasında ve bölgesel kalkınmanın desteklenmesinde temel bir rol oynamaktadır. Bu altyapı projelerinde özellikle dolgu tesviyeleri gibi büyük hacimli toprak işleri, geleneksel olarak dışarıdan temin edilen malzemelere bağımlılık nedeniyle hem mühendislik açısından hem de çevresel açıdan kritik öneme sahiptir. Dolgu tesviye işlerinde uzun mesafeli nakliye kaynaklı lojistik maliyetlerinin yanı sıra ciddi oranda fosil yakıt tüketimi, sera gazı emisyonları, yeni malzeme ocaklarının açılmasına bağlı arazi bozulumu ve proje sahasında ortaya çıkan kazı fazlası malzemelerin bertarafından kaynaklanan atık yönetimi sorunları ortaya çıkmaktadır [1], [2]. Bu kapsamda, karbon ayak izi, bir proje veya faaliyetin yaşam döngüsü boyunca neden olduğu toplam sera gazı emisyonları olarak tanımlanmaktadır [3]. Başta karbondioksit (CO_2) olmak üzere bu gazlar, küresel ısınmaya ve iklim değişikliğine katkı sağlamaktadır. Karayolu altyapı projeleri gibi büyük ölçekli işlerde karbon ayak izi, özellikle malzeme temini ve arazi çalışmalarından kaynaklanmaktadır. Geleneksel yaklaşımda, ihtiyaç duyulan nitelikli dolgu malzemelerinin kilometrelerce uzaktaki taş ocaklarından getirilmesi, yoğun bir nakliye trafiği yaratmaktadır. Bu durumda hem bu uzun mesafeli nakliye süreci hem de şantiyedeki inşaat makinelerinin çalışması, büyük ölçüde fosil yakıtların yanmasıyla atmosfere yüksek miktarda emisyon salınmasına neden olmaktadır [4].

Sürdürülebilir kalkınma ilkeleri ve döngüsel ekonomi modelleri, inşaat sektöründe kaynak verimliliğini ve atık minimizasyonunu merkeze alan yaklaşımların benimsenmesini zorunlu kılmaktadır [5], [6], [7]. Bu bağlamda, şantiyede mevcut olan kazı fazlası malzemelerin veya sahada mevcut bulunan dolguların bünyesinden çıkarılan uygun nitelikli zeminlerin, yeni dolgu tesviyelerinde yerinde değerlendirilmesi ve yeniden kullanımı, çevresel sürdürülebilirliği artıracak önemli bir strateji olarak öne çıkmaktadır. Bu yaklaşım, döngüsel ekonomi ilkeleri doğrultusunda yeni doğal kaynak çıkarım ihtiyacının önlenmesini, proje kaynaklı inşaat atıklarının azaltılmasını, malzeme nakliyesinin ve buna bağlı fosil yakıt tüketiminin azaltılmasını sağlamaktadır [8]. Bununla birlikte malzeme yönetimi yalnızca temin ve taşıma süreçlerinden ibaret olmayıp; planlama, stoklama, lojistik, geri kazanım ve kullanım analizlerini de kapsayan bütünsel bir süreçtir. Bu nedenle malzemenin teknik uygunluğunun da göz ardı edilmemesi gerektiği ve bu bağlamda geoteknik analizlerin özellikle de sonlu elemanlar yöntemi vb. sayısal modelleme yaklaşımlarının önemli rol oynadığı vurgulanmaktadır [9].

Bu çalışma, İstanbul İli Şile İlçesi Sahilköy-Kurna karayolu üzerinde 2024-2025 yılları arasında gerçekleştirilen yol genişletme projesinde uygulanan dolgu tesviye işlemleri kapsamında, inşa sahasında mevcut bulunan malzemelerin kullanımının çevresel sürdürülebilirlik üzerindeki etkilerini değerlendirmektedir. Sahanın arazi karakterizasyonu sonucunda tanımlanan mevcut zeminlerin teknik gereklilikleri sağlama denetimi, Plaxis 2D yazılımı aracılığıyla analiz edilmiş; elde edilen veriler doğrultusunda, farklı senaryolar ışığı altında malzeme miktarları, nakliye mesafeleri, ekipman türleri ve sera gazı emisyonları

karşılaştırmalı olarak hesaplanmıştır. Böylece, geleneksel olarak uygulanan dışardan tedarik edilerek malzeme kullanımına kıyasla sahada mevcut bulunan malzemelerin yönetiminin sağladığı çevresel ve yapısal avantajlar ortaya konulmuştur.

Materyal ve Metot

Karayolu dolgu tesviyelerinde sahada mevcut bulunan malzemelerin yerinde kullanımının çevresel etkilerini değerlendirmek amacıyla İstanbul İl’inde 2024-2025 yıllarında yapılan yol genişletme çalışmaları Karayolları Genel Müdürlüğü internet sitesinden [10] araştırılarak hali hazırda devam etmekte olan İstanbul İli Şile İlçesi Sahilköy-Kurna karayolunda gerçekleştirilen yol genişletme projesi örnek vaka olarak ele alınmıştır. Proje ile ilgili geometrik bilgilerin elde edilmesinde Google Earth’den güzergâh boyunca yapılan ölçümlerden ve İstanbul Büyükşehir Belediyesi’nin derlemiş olduğu kısa videolardan faydalanılmıştır [11]. İlâveten, arazi karakterizasyonunun yapılabilmesi için İstanbul Valiliği Yatırım İzleme ve Koordinasyon Başkanlığı’ndan (YIKOB) projeye yakın sahalardan temin edilen veri ve geoteknik raporlarından faydalanılmıştır. Bu kapsamda edinilen bilgilerden öğrenildiği üzere, projenin toplam uygulama uzunluğu (Beykoz-Şile ana arter bağlantı yolu) 15.0 km olup etaplar halinde genişletme çalışmaları planlanmıştır. Birinci Etap Kurna-Karakiraz yolu için uygulanmış olup mevcut yol enkesiti 8.0 m genişliğinden 12.0 m genişliğe çıkarılmıştır. İkinci etap Kurna- Sahilköy yolu olup mevcut karayolu 6.0 m genişliğinden 12.0 m genişliğe çıkarılması planlanmıştır. Bu çalışma kapsamında hali hazırda sürdürülmekte olan ikinci etap çalışmaları referans alınarak genişletme uygulamaları için öngörülen değerlendirmelerin iki aşamadan oluşması durumu benimsenmiştir.

Aşama 1: Proje sahasında hali hazırda uygulanmakta olan genişletme çalışmalarında kullanıldığı düşünülen malzemeler (Çevre Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı 2025 yılı İnşaat ve Tesisat Birim Fiyatları uyarınca) için sonlu elemanlar metodu ile çalışan ticari bir program olan Plaxis 2D.V2025 ile inşa, konsolidasyon ve kullanım süreçlerini göz önüne alan analizler gerçekleştirilmiştir. Bu analizlerin sonucunda elde edilen deformasyon ve güvenlik seviyesi değerleri ile olası göçme mekanizmaları elde edilmiştir. Akabinde, sahada mevcut bulunan zeminlerin yol genişletme çalışmalarında kullanılması ile tekrarlanan aynı aşamalardan oluşan analiz sonuçları birbiri ile karşılaştırılmıştır. Karşılaştırmalar sonucunda deformasyonlar ve güvenlik seviyesi açısından tatminkâr eşleşmeler elde edildiğinde Aşama 2’ye geçilmiştir. Bu aşamada “tatminkâr eşleşmeler” elde edilmesi ile kastedilen, analizler sonucunda elde edilen deformasyonların sürüş konforu ve güvenliği açısından izin verilebilir sınırlarda olması [12] ve elde edilen güvenlik sayılarının [13], [14], [15] literatürde veya yönetmeliklerde öngörülenler ile orantılı olması durumudur. Bu kapsamda göz önüne alınan güvenlik sayısı değerleri statik durum için minimum 1.5 ve izin verilen deformasyon limiti olarak maksimum 1.0 cm olarak öngörülmüştür.

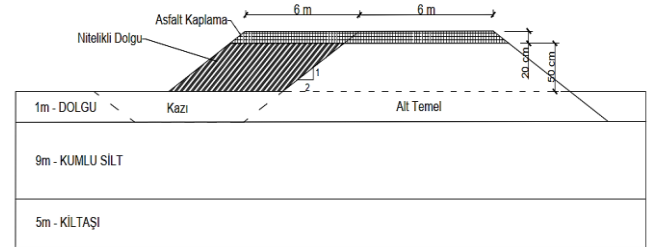
Aşama 2: Genişletme çalışmaları için iki farklı malzeme kullanım senaryoları yapılmıştır. Bu kapsamda birinci senaryo için Çevre Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı

2025 yılı İnşaat ve Tesisat Birim Fiyatları uyarınca önerilen nitelikli malzeme kullanımı ile (çalışma kapsamında “nitelikli malzeme” olarak tariflenecektir) ve ikinci senaryo için sahada mevcut olan zeminlerden faydalanılarak inşa ile öngörülen durumlar için kullanılan malzeme miktarları, ekipman ihtiyacı ve nakliye gereksinimleri hesaplanarak nakliye kaynaklı fosil yakıt tüketimi ve sera gazı emisyonları, Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı'nın 2025 yılı İnşaat ve Tesisat Birim Fiyatları [16] referans alınarak elde edilmiştir. Maliyet hesaplamalarında, Nitelikli Malzeme Tedariki kalemi için (1. Senaryo) ÇSB 15.125.1008 pozu (32 mm' ye kadar kırma taş temin edilerek, makine ile serme, sulama ve sıkıştırma yapılması) esas alınmıştır. Sahada mevcut olan zeminlerden faydalanarak genişletme dolgusu inşası için (2. Senaryo) ise, kazı fazlası malzemenin sahada mevcut olduğu kabul edildiğinden, bu kaleme karşılık gelen Silindirle Sıkıştırma (m^3) birim fiyatı, standart poz analizine dayalı olarak ayrıca hesaplanmıştır. Bu hesaplama, 15.125.1008 pozunun birim fiyat analiz cetvelinden ana malzeme bileşeni olan “32 mm kırmataş temini” bedelinin çıkartılmasıyla elde edilmiştir. Bu yaklaşım sayesinde, malzeme temini haricindeki serme, sulama ve sıkıştırma gibi yerinde imalat maliyetlerini temsil eden maliyet kalemi ayrıştırılarak maliyet analizine dahil edilmiştir. Ayrıca, malzeme taşınım oranları ve arazi kullanım değişiklikleri gibi çevresel parametreler de bu hesaplamalara dahil edilmiştir.

Bu bakış açısı ile geleneksel malzeme tedarik yöntemlerine kıyasla sürdürülebilirlik ve döngüsel ekonomi prensiplerine uygun bir strateji geliştirilmiş olduğu düşünülmektedir.

Model Geometrisi ve Geoteknik Parametreler

Sahada hali hazırda kullanılmakta olan mevcut karayolu dolgusunun platform genişliği 6.0 m olup genişletme çalışmalarının akabinde 12.0 m olması planlanmıştır. Dolgunun yüksekliği 0.50 m, asfalt yol kaplaması 0.20 m, genişletme taban kazısı 1.0 m ve şev eğimi 1:2'dir. Modele ait enkesit Şekil 1' de verilmiştir.



Şekil 1. Sahada mevcut bulunan karayolu kesitinde tek taraflı olarak uygulanan genişletme çalışmalarına ait enkesit

İstanbul Valiliği YIKOB'dan temin edilen veri ve geoteknik raporlarına göre idealize edilen zemin profilinde yüzeyden itibaren 1.0 m kalınlığında dolgu, 9.0 m kalınlığında kumlu silt ve sondaj derinliği sonuna kadar da kıltaşı birimlerine rastlanmıştır. Sahada yeraltı su seviyesi zemin yüzeyinde varsayılmıştır. Veri ve geoteknik raporlarında mevcut olan zemin tanımlama deneyleri (elek analizi, kıvam limitleri vb.) ve mukavemet deneyleri (serbest basınç ve kesme kutusu deneyleri) kullanılarak Tablo 1'de sunulan parametreler elde edilmiştir. Dolgu malzemesi olarak nitelikli malzeme (Çevre Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı uyarınca seçilen) ve sahada mevcut olan zeminler (kıltaşı, kumlu silt) olmak üzere 3 farklı malzeme türü kullanılmıştır.

Tablo Hata! Belgede belirtilen stilde metne rastlanmadı.1. Analizlerde kullanılan geoteknik parametreler

FAZLAR	c' kPa	γ_{unsat} kN/m ³	γ_{sat} kN/m ³	Φ o	E'_{ref} kPa	ν -
Asfalt Kaplama	-	24	-	-	25E+6	0.2
Kıltaşı	-	21	21	40	120000	0.3
Kumlu Silt	45	19	19	15	60000	0.3
Sahada Mevcut Bulunan Dolgunun Alt Temeli	2	20	21	35	75000	0.3
Sahada Mevcut Bulunan Dolgunun Üst Temeli	2	20	20	32	60000	0.3
Genişletme Dolgusunun Alt Temeli	-	21	21	-	75000	0.3
Genişletme Dolgusunun Üst Temeli	0	21	21	35	75000	0.3
Dolgu Tabakası	2	16	17	28	30000	0.35

Bu kapsamda, analizlerde kullanılan geoteknik parametreler; kohezyon (c' , kPa), doymamış birim hacim ağırlık (γ_{unsat} , kN/m³), doymuş birim hacim ağırlık (γ_{sat} , kN/m³), kayma mukavemeti açısı (Φ , °), Elastisite modülü (E'_{ref} , kPa) ve Poisson oranıdır (ν).

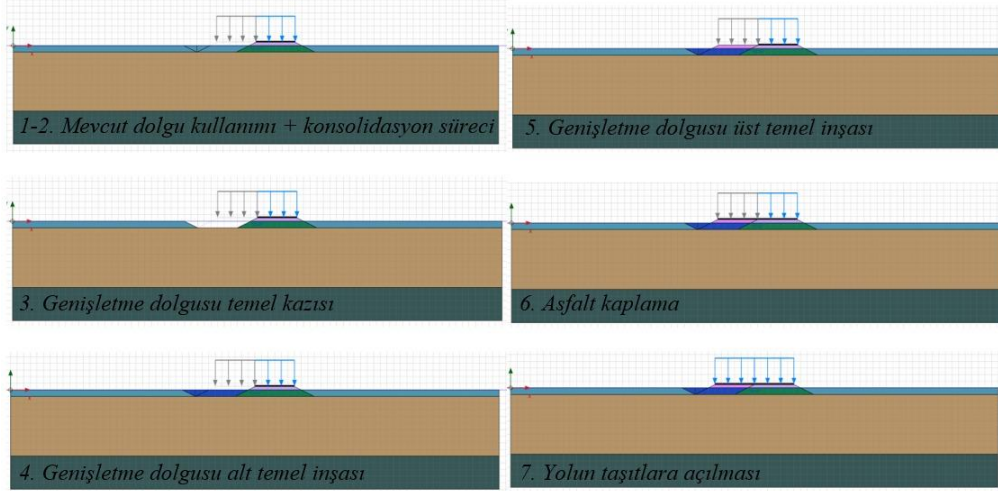
Parametrik Analizler

Sahada mevcut olan karayolu dolgusunun ve planlanan genişletme dolgusunun geoteknik davranışının değerlendirilmesi amacıyla, Plaxis 2D.V2025 yazılımı kullanılarak çoklu parametrik analizler gerçekleştirilmiştir. Bu çalışma kapsamında, sahada temel zemini formasyonunda mevcut bulunan malzemelerin dolgu, alt temel ve üst temel tabakalarında kullanılabilirliği incelenmiştir.

Yapılan analizlerin temel amacı, sahada mevcut bulunan zeminlerin geoteknik özelliklerini dikkate alarak deformasyon değerleri ve stabilite koşullarının öngörülen sınırlarda kalma durumunun denetlenmesidir. Bu doğrultuda geliştirilen tasarımlar, yol dolgusu projelerinde

sürdürülebilirliği artırmakta, CO₂ emisyonlarının azaltılmasına ve enerji verimliliğinin iyileştirilmesine katkı sağlamaktadır. Çalışmada, tek taraflı gerçekleştirilecek olan genişletme çalışmalarında inşa, konsolidasyon ve kullanım süreçlerini içeren toplamda 7 faz kullanılmış ve analizler üç farklı malzeme kullanılarak tekrarlanmıştır (Şekil 2).

Bu kapsamda Şekil 2’de tanımlanan birinci ve ikinci fazda sahada mevcut olan karayolu dolgusunun inşa ve kullanım sürecini betimlemek için plastik analiz ve konsolidasyon analizi (365 gün) süreçlerinden oluşan bir tanımlama yapılmış, üçüncü fazda genişletme dolgusu temelini inşası için 1.0 m kalınlığında temel kazıldığı düşünülmüş ve dördüncü, beşinci, altıncı fazlarında genişletme dolgusunun sırası ile alt temelini, üst temelini ve asfalt kaplamasının inşa edilişi (Şekil 1’de tanımlanan boyutlarda) modellenmiş ve son olarak yedinci fazda genişletilen kısım ile birlikte tüm yol platformunun trafiğe açıldığı durumun modellenmesi için 20 kPa değerindeki bir statik yayılı yük platform uzunluğu boyunca eklenmiştir.



Şekil 2.Sayısal analizlerde uygulanan fazlar

Plaxis 2D.2025 yazılımında düzlem deformasyon koşulları altında 15 noktalı elemanlar kullanılarak analiz gerçekleştirilmiş, toplam 523 zemin elemanı ve 4403 düğüm noktası tanımlanmıştır. Analizlerin tamamında Şekil 2’de verilen adımlarla 7 faz uygulanmış olup her bir fazın ardından eklenen güvenlik analizleri ile her faza ait güvenlik sayıları da elde edilmiştir. Sürdürülen analizler sonucunda her faz için

elde edilen güvenlik sayıları Tablo 2’de sunulmuştur. İlâveten, her faz akabinde gerçekleşen toplam deformasyonlar her 3 malzemenin kullanımında da 0-1 cm aralığında çıkmıştır. Elde edilen bu sonuçlar, malzeme seçiminin deformasyonlar ve güvenlik açısından tatmin edici olduğunu göstermiş ve tasarımın çevresel etkiler açısından optimize edilmesine olanak tanımıştır.

Tablo 2. Plaxis 2D.V2025 ile yapılan analizlerde farklı malzemelerin dolgularda kullanımı sonucu elde edilen güvenlik sayıları

FAZ	TANIMI	ANALİZ-1 (GS)	ANALİZ-2 (GS)	ANALİZ-3 (GS)
		Nitelikli Malzeme Kullanımı ile Genişletme Dolgusu İnşası	Mevcut Kumlu Silt Zemin ile Genişletme Dolgusu İnşası	Mevcut Kilitli Zemin ile Genişletme Dolgusu İnşası
1	Sahada mevcut olan yolun işler durumda olması	2.789	2.789	2.789
2	Sahada mevcut olan dolgunun Konsolidasyonu ($u = 1$ kPa)	2.789	2.789	2.789

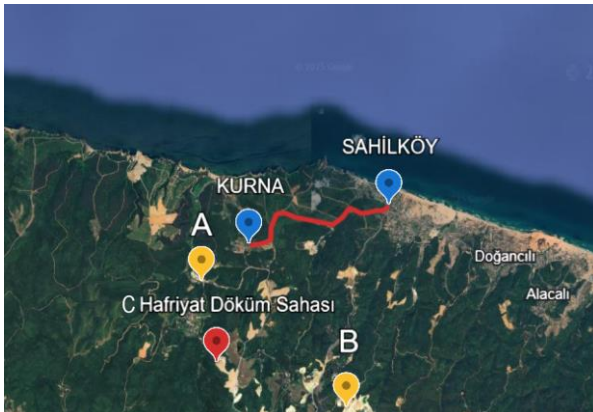
3	Genişletme dolgu alt temel kazısı	2.363	2.363	2.363
4	Genişletme dolgu alt temelinin inşası	2.810	2.822	2.812
5	Genişletme dolgusunun üst temelinin inşası	1.618	2.745	1.912
6	Asfalt kaplama yapılması	1.721	2.298	1.909
7	Taşıt yükünün uygulanması (Yolun Açılması)	1.717	2.525	1.905

Çevresel Etki ve Ekonomik Değerlendirme

Bu araştırmanın uygulama senaryosunu oluşturan Kurna-Sahilköy karayolu hattı, İstanbul İli Beykoz-Şile ana arter bağlantısının yolunun stratejik bir parçasıdır. 15.0 km olan ana arter bağlantı yolunun genişletme çalışmaları, teknik ve operasyonel gereksinimler doğrultusunda iki etap halinde planlanmış ve yürütölmektedir.

Birinci etapta, 10880.0 m uzunluğundaki Kurna-Karakiraz güzergahında 34785.0 m³ hafriyat çıkarılmış, 21730.0 m³ dolgu malzemesi serilmiş ve 112.0 metre uzunluğunda yağmur suyu drenaj kanalı inşa edilmiştir. Üstyapı kapsamında ise 13315.0 ton asfalt kaplama tamamlanmıştır. İkinci etap çalışmalarının da tamamlanması ile proje genelinde toplam 230000.0 ton kapasitede asfalt kaplama yapılması planlanmaktadır [11].

Bu araştırmanın odak noktasını teşkil eden ikinci aşama Kurna-Sahilköy karayolu (Şekil 3) genişletme projesinde, sahada mevcut bulunan 6.0 m platform genişliğindeki yol kesitinin 12.0 metre genişliğe çıkarılması öngörülmektedir. Söz konusu karayolu güzergahının genişletilmesi kapsamında gerçekteştirilen hesaplamalar neticesinde 13173.0 m³ hafriyat malzemesinin çıkarılması gerektiği ve buna paralel olarak genişletme çalışmaları için 8230.0 m³ hacminde dolgu malzemesi ihtiyacının bulunduğu hesaplanmıştır. Bu malzeme hacmi değerleri, 4120.0 m uzunluğundaki proje güzergahı (Şekil 3) boyunca ortalama dolgu yüksekliği parametresi referans alınarak, topografik koşullar ve mevcut yol geometrisi kriterleri dikkate alınarak hesaplanmıştır.



Şekil 3. Kurna-Sahilköy yol güzergahı

Genişletme dolgu inşası için dışarıdan malzeme tedarikinde nitelikli dolgu malzemesinin sağlanması sürecinde birincil olarak en yakın taş ocağından faydalanılması öngörülmüştür. Sahada mevcut bulunan zeminlerin genişletme dolgusunun inşasında kullanımında ise sahada bulunan kazı fazlası kumlu silt ve kilaşa değerlendirilecektir. Bölgede bulunan taş ocakları ve hafriyat döküm sahaları değerlendirildiğinde iki adet taş ocağının ve bir adet döküm sahasının kullanılabilir nitelikte olduğu görölmüştür (Şekil 3). Bu kapsamda, Kurna-Sahilköy güzergahında tanımlanan A taş ocağı 2.5 km, B taş ocağı 7.0 km ve C hafriyat döküm sahası 4.5 km mesafede bulunmaktadır.

Tablo 3'te nitelikli dolgu malzemesi kullanılması durumunda ve sahada mevcut bulunan zeminlerin kullanılması durumunda ait sera gazı emisyonu ve fosil yakıt tüketimi hesapları sunulmuştur. Hesaplamada sunulan nakliye mesafeleri (gidiş-dönüş) belirtilen (ocak ve döküm sahası) ana tesislere olan mesafeler ile proje güzergahı içindeki ortalama taşıma mesafesinin birleştirilmesiyle elde edilmiştir. Projedeki yol genişletmesi yapılacak güzergahın 4120.0 m olması nedeniyle, kazı veya dolgu malzemesinin alındığı ve döküldüğü noktanın güzergah boyunca değiştiği kabul edilmiştir. Bu nedenle, Tablo 3'te yer alan kazı hafriyat dökümü (gidiş-dönüş) mesafesi (12.0 km), döküm sahasının 4.5 km'lik ana mesafesine ek olarak güzergah içi ortalama nakliye payını da içeren toplam gidiş-dönüş (tek yön 6.0 km) mesafesini ifade etmektedir. Benzer şekilde, A taş ocağı (gidiş-dönüş) mesafesi (10.0 km), 2.5 km'lik ana mesafeye güzergah içi ortalama taşıma mesafesinin eklenmesiyle bulunan toplam gidiş-dönüş (tek yön 5.0 km) değerini ifade etmektedir.

Nitelikli malzeme temininin çevresel etkisi, nakliye kaynaklı fosil yakıt tüketimi ve sera gazı emisyonlarıdır. Sahada mevcut bulunan zeminlerin genişletme inşasında kullanımı, taşıma mesafelerini azaltarak bu çevresel etkilerde belirgin bir azalma sağlamaktadır. Bu kapsamda uzun mesafeli nakliyelerde 13.0 m³ hacimli tır ve kısa mesafeli nakliyelerde 5.0 m³ hacimli yükleyiciler (loader) dikkate alınarak yapılan hesaplamalar Tablo 3'te sunulmuştur. Şile Sahilköy-Kurna karayolu projesi analizlerinde, sahada mevcut bulunan zeminlerin genişletme inşasında kullanımının standart nitelikli malzemeler ile genişletme inşası uygulanan yöntemlere kıyasla nakliye kaynaklı emisyonları azalttığı ve projenin karbon ayak izini optimize ettiği tespit edilmiştir.

Her iki tedarik yöntemi için nakliye kaynaklı sera gazı emisyonu ve fosil yakıt tüketimi değerleri hesaplanmış (Tablo 3) olup toplam karbon ayak izi belirlenmiştir. Nakliye

araçlarının dizel yakıt kaynaklı CO₂ salınımının hesaplanmasında, literatürde yer alan dizel yakıt emisyon faktörlerinden yararlanılmıştır [17].

Tablo 3. Sera gazı emisyonu hesap detayları

	Tedarik Edilen Nitelikli Malzeme ile genişletme dolgusu inşası		Sahada mevcut bulunan malzeme ile genişletme dolgusu inşası		
	A Taş Ocağı (Gidiş-Dönüş)	Kazı Hafriyat Dökümü (Gidiş-Dönüş)	Dolgu Malzemesi (Depolama) (Gidiş-Dönüş)	Dolgu Malzemesi (Doldurma) (Gidiş-Dönüş)	Dolgu Fazlası Hafriyat Dökümü (Gidiş-Dönüş)
Nakliye Mesafesi (km)	10	12	0.05	0.05	12
Yakıt Tüketimi (l/km) Dizel	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65
CO₂ Emisyon Faktörü (Dizel-kg.CO₂/l)	2.64	2.64	2.64	2.64	2.64
Kamyon Adet	633	1014	1014	633	381
Sera Gazı Emisyonu(kg.CO₂)	10862.28	20880.29	87.00	54.31	7726.68

Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı 2025 yılı İnşaat Birim Fiyatları ve 2025 yılı Karayolları Genel Müdürlüğü tarife verileri kullanılarak maliyet analizi gerçekleştirilmiş olup Tablo 4'te sunulmuştur. Serbest kazı malzemesi, sahada mevcut olan zeminlerin genişletme inşasında kullanımı senaryosunda 25.0 m mesafeye kadar depolanacak şekilde maliyet analizlerinde değerlendirilmiştir. Sahada mevcut olan zeminlerin genişletme inşasında kullanımı senaryosunda dolguda yeniden kullanımdan artan malzeme ile nitelikli malzeme kullanımı senaryosunda serbest kazıdan çıkarılan malzemenin tamamının dış döküm sahasına gönderilmesine yönelik hesaplamalar gerçekleştirilmiştir. Dış döküm sahası nakliye birim fiyatı resmi kurumlara ait ilgili pozların birleşiminden oluşmaktadır. Bu değerlendirmede, Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığının ilgili pozundan (15.120.1005) kazı birim fiyatı, Karayolları Genel Müdürlüğü'nün nakliye formüllerinden (1) tek yönde 5.0 km mesafenin nakliye birim fiyatı ve İstanbul Çevre Koruma ve Atık Maddeleri Değerlendirme Sanayi ve Ticaret A.Ş.'ye (İSTAÇ) ait döküm sahalarının hafriyat atığı 2025 yılı döküm ücretleri üzerinden hesaplamalar yapılmıştır. Karayolları Genel Müdürlüğü malzeme nakliye bedeli hesaplama formülü aşağıda verilmiştir.

$$F = Kx(0.00046x\sqrt{M} - 0.0046) (\text{₺/m}^3) \quad (1)$$

F: Taşıma Birim Fiyatı (₺/m³)

K: Güncel maliyetlere (özellikle akaryakıt fiyatlarına) göre her yıl güncellenen veya ihale şartnamesinde belirtilen fiyat katsayısı. (2025 yılı için 1750.0 ₺)

M: Taşıma mesafesini (m) ifade etmektedir.

Bu birim fiyatın hesaplanmasında; ilk olarak Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı'nın ilgili kazı birim fiyatı (Poz 15.120.1005 (105.44 TL/m³) temel maliyet olarak alınmıştır. Ardından, bu temel fiyata Karayolları Genel Müdürlüğü'nün tek yön 5.0 km'lik (toplamda git-gel mesafe 10.0 km) (1) mesafe için belirlediği %25 kar dahil nakliye ücreti (90.56 TL/m³) eklenmiştir. Son olarak, İSTAÇ'a ait döküm sahalarının hafriyat atığı döküm ücreti, analizlerde Tır nakliye araçları üzerinden değerlendirilerek, m³ bazında birim fiyata ilave edilmiştir. Tır nakliye aracının taşıma hacmi 13.0 m³ olarak kabul edilmiş, taşınan hafriyat atığının kazı pozuna esas proje üzeri hesaplamalardan %20 kabarma oranında fazla şekilde nakliye araçlarına yüklendiği varsayılarak hafriyat atığı döküm ücreti (292,30 TL/m³) hesaplanmıştır. Nihai birim fiyat söz edilen üç bedelin toplamından oluşmaktadır.

Çalışmada sunulan karşılaştırmalı maliyet analizlerinin (Tablo 4) temelini oluşturan metrajlar, arazi verilerinden elde edilen hacimsel hesaplamalara girdi teşkil eden çalışma sahasına ait proje ve güzergâhın geometrik bilgileri, Google Earth üzerinden yapılan ölçümlerden ve İstanbul Büyükşehir Belediyesi'nin derlemiş olduğu kısa videolardan faydalanılarak elde edilmiştir [11]. Bu verilere dayanarak, güzergâh boyunca toplam serbest kazı hafriyat hacmi 13173.0 m³ olarak belirlenmiş olup toplam kazının 8230.0 m³'lük kısmının analizler sonucunda yerinde malzeme sıkıştırmasında yeniden kullanılmaya elverişli nitelikte olduğu saptanmıştır. Bu nedenle, sahada mevcut bulunan zeminlerin kullanımı senaryosunda silindire sıkıştırma ve yerinde depodan malzeme kullanımı iş kalemleri için bu 8230.0 m³'lük hacim esas alınmıştır. Bu senaryoda, toplam kazıdan (13173.0 m³) uygun hacim (8230.0 m³) düşüldüğünde elde kalan 4943.0 m³'lük malzeme ise hafriyat döküm sahasına aktarılacak metrajı oluşturmaktadır.

Karşılaştırmalı analiznin nitelikli malzeme tedariki senaryosunda ise, dolgu için gereken 8230.0 m³ malzemenin tamamının dışarıdan (taş ocağı) tedarik edildiği ve sahadan çıkan 13173.0 m³'lük toplam kazının tamamının döküm

sahasına gönderildiği varsayılmaktadır. Tablo 4'te sunulan iki senaryonun maliyet karşılaştırması bu temel hacimsel kabuller üzerinden gerçekleştirilmektedir. Tablo 4 ve Tablo 5'te yapılan hesaplamalara KDV dahil edilmemiştir.

Tablo 4. Maliyet hesabı

	İş Kalemi	İş Kalemi Tanımı	Kaynak	Birim Fiyat	Metraj (m ³)	Maliyet (₺)
Sahada mevcut olan zeminlerin Kullanımı	Serbest Kazı (m ³) (Depo) (l<25 m)	Makine ile patlayıcı madde kullanmadan yumuşak kaya kazılması	ÇŞB 15.120.1005	105.43 TL	13173	1,388,829.39
	Serbest Kazı (m ³) (Dış Döküm Sahası)	Makine ile patlayıcı madde kullanmadan yumuşak kaya kazılması	ÇŞB 15.120.1005 pozuna + KGM Nakliye Formülü (5 km) + İSTAÇ Şile Döküm Ücreti (₺/m ³)	488.29 TL	4943	2,413,617.47
	Silindirle Sıkıştırma (m ³)	Depodan alınan dolgu malzemesinin sıkıştırılması.	ÇŞB 15.125.1008 pozundan 32 mm kırmataş temini çıkarılmış hali.	66.69 TL	8230	548,858.70
	Serbest Kazı (m ³) (Yerinde Depodan Malzeme Kullanımı) (l<25 m)	Makine ile patlayıcı madde kullanmadan yumuşak kaya kazılması	ÇŞB 15.120.1005	105.43 TL	8230	867,688.90
Nitelikli Malzeme Kullanımı	Nitelikli Malzeme Tedariği (m ³)	32 mm'ye kadar kırmataş temin edilerek, makine ile serme, sulama ve sıkıştırma yapılması	ÇŞB 15.125.1008	529.19 TL	8230	4,355,233.70
	Kazı Döküm Nakliye (m ³)	Makine ile patlayıcı madde kullanmadan yumuşak kaya kazılması	ÇŞB 15.120.1005 pozuna + KGM Nakliye Formülü (5 km) + İSTAÇ Şile Döküm Ücreti (₺/m ³)	488.29 TL	13173	6,432,244.17

Tablo 5. ÇŞB 15.125.1008 pozuna ait birim fiyat analizi

Poz Bileşeni	Birim	Miktar	Birim Fiyat (TL)	Tutar (TL)
32 mm Kırmataş Temini	m ³	1	370.00	370.00
Su	m ³	0.1	38.50	3.85
Greyder (Serme)	Saat	0.01	2016.98	20.17
Arazöz (Sulama)	Saat	0.013	694.01	9.02
Silindir (Sıkıştırma)	Saat	0.017	1194.64	20.31
Genel Giderler ve Yüklenici Karı	%	25	-	105.84
Poz 15.125.1008 Toplamı	m ³	-	-	529.19
Yerinde Sıkıştırma Fiyatı (Malzeme Hariç Maliyet)	m ³	-	-	66.69

Yerinde malzeme sıkıştırma birim fiyatının (Tablo 4) hesaplanmasında, Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı'nın 15.125.1008 numaralı "32 mm'ye kadar kırmataş temin edilerek, makine ile serme, sulama ve sıkıştırma yapılması" pozu referans alınmıştır. Bu pozun 2025 yılı birim fiyat analizi (Tablo 5) incelenmiş olup pozun toplam maliyetinden (529.19 TL/m³) yalnızca malzeme ana

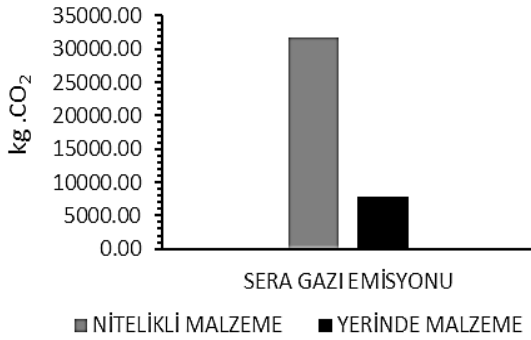
bileşeni olan "32 mm kırmataş temini" bedeli (370.00 TL/m³) düşülmüştür.

Kalan tutar; serme, sulama, sıkıştırma için kullanılan makine, işçilik ve genel giderleri kapsamakta olup, "Silindirle Sıkıştırma" iş kalemi için malzeme hariç birim fiyat olarak (66.69 TL/m³) belirlenmiştir. Bu hesaplamanın ayrıntıları Tablo 5'te sunulmuştur.

Bulgular

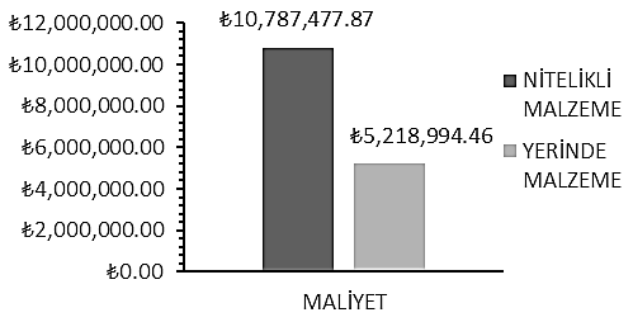
Çalışma kapsamında öngörülen birinci aşamanın değerlendirilmesi için Tablo 2'de sunulan güvenlik sayıları göz önüne alındığında, her üç malzeme alternatifi için de kabul edilebilir güvenlik seviyelerinin elde edildiği görülmektedir. Sahada mevcut bulunan kumlu silt malzemesinin, geoteknik açıdan nitelikli malzemeden daha iyi performans gösterdiğini ortaya koymaktadır. Bu durum, sahada mevcut bulunan zeminlerin genişletme inşasında kullanımının sadece çevresel değil, aynı zamanda teknik açıdan da avantajlı olduğunu göstermektedir.

Çalışma kapsamında öngörülen ikinci aşamanın değerlendirilmesi için uygulanan sera gazı emisyonu hesaplamaları (Tablo 3), yerinde malzeme kullanımının çevresel sürdürülebilirlik açısından %75.2 oranında emisyon azalımı sağladığını göstermektedir. Nitelikli malzeme tedariki ile sahada mevcut bulunan zeminlerin genişletme inşasında kullanımında nakliyeyle bağlı toplam sera gazı emisyonları hesaplanmış olup karbon ayak izine bağlı karşılaştırma Şekil 4'te gösterilmiştir.



Şekil 4. Nitelikli malzeme tedariki ve sahada mevcut bulunan zeminlerin kullanımı durumları için karbon ayak izi değerleri

Nitelikli malzeme tedariki ile sahada mevcut bulunan zeminlerin yerinde kullanımına ilişkin nakliye maliyetlerinin karşılaştırması Şekil 5'te sunulmuştur. Hesaplamalar yerinde malzeme kullanımının %51.7 oranında maliyet tasarrufu sağladığını göstermektedir. Bu ekonomik avantaj, projenin mali sürdürülebilirliğini artırmakta ve kaynakların daha verimli kullanılmasına olanak tanımaktadır.



Şekil 5. Nakliye kaynaklı maliyet analizi karşılaştırması

Bu bulgular, yerinde malzeme yönetiminin karayolu altyapı projelerinde sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşmada ve iklim değişikliğiyle mücadelede teknik, çevresel ve ekonomik açıdan avantajlı, etkin bir strateji olduğunu göstermektedir.

Sonuçlar ve Tartışma

Bu çalışma, karayolu dolgu tesviyelerinde sahada bulunan zeminlerin inşaat çalışmalarında kullanımının sürdürülebilirlik kapsamındaki değerlendirmelerini ve çevresel etkilerini incelemekte; geleneksel yöntemlere kıyasla karbon ayak izi, atık yönetimi ve arazi kullanımı üzerindeki olumlu katkılarını sonlu elemanlar yöntemi ile uygulanan analizler ve yaşam döngüsü değerlendirmesi ile ortaya koymaktadır. Bu çalışma kapsamında yapılan vaka senaryoları göz önünde bulundurularak sahada mevcut bulunan zeminlerin yol genişletme inşasında kullanımı, dışarıdan nitelikli malzeme tedarikine kıyasla nakliye kaynaklı sera gazı emisyonlarında 23881.27 kg.CO₂ azalma sağlayarak %75.2 oranında emisyon azalımı gerçekleştirmekte ve bu durum fosil yakıt tüketiminin azaltılması ile çevresel sürdürülebilirliği desteklemektedir.

Bu kapsamda analizlerin sonuçlarındaki önem, döngüsel ekonomi prensiplerini altyapı projelerine entegre ederek, kazı fazlası gibi atık olarak nitelendirilebilecek bir materyali değerli bir yapı malzemesine dönüştürme potansiyelini göstermesinde yatmaktadır. Bu strateji, atık hacmini düşürerek depolama sahaları üzerindeki baskıyı hafifletecek niteliktedir. Ayrıca, yapılan geoteknik analizler, sahada mevcut olan zeminlerin standart olarak öngörülen güvenlik ve performans koşullarına uygun olduğunu kanıtlamıştır. Bu durum, sürdürülebilir uygulamaların mühendislik kalitesinden ödün vermediğini, aksine onu optimize edebileceğini göstermektedir.

Maliyet analizleri ise çevresel ve teknik avantajların maliyet etkinliği ile desteklendiğini göstermektedir; nakliye kalemlerinde %51.7'lik bir tasarruf sağlanması, bu yöntemin sadece ekolojik bir tercih değil, aynı zamanda rasyonel bir finansal strateji olduğunu da ortaya koymaktadır. Dolayısıyla, yerinde malzeme yönetimi, karayolu mühendisliğinde kaynak verimliliği ve ekonomik sürdürülebilirlik hedeflerini eş zamanlı olarak karşılayabilen, teknik açıdan doğrulanmış, bütüncül ve etkin bir model sunmaktadır.

Sonuç olarak, yerinde malzeme yönetimi hem çevresel hedeflere ulaşmada hem de maliyet verimliliğini artırmada etkili ve güvenilir bir yöntemdir.

Etik Kurul Onayı ve Çıkar Çatışması Beyanı

Hazırlanan makalede herhangi bir kişi/kurum ile çıkar çatışması bulunmamakta olup etik kurul izni alınmasına gerek yoktur.

Teşekkür

Yazarlar, veri ve geoteknik rapor temini sağladıkları için İstanbul Valiliği YIKOB'a teşekkürlerini sunar.

Kaynaklar

- [1] Akbulut, H., & Gürer, C. (2003, December). The environmental effects of waste marble and possibilities

- of utilization and waste minimization by using in the road layers. In Proceeding of the fourth national marble symposium, Afyonkarahisar (pp. 371-8).
- [2] Yılmaz, A. (2020). Sürdürülebilirlik Açısından Mermer Atıklarının Karayolu İnşaatında Değerlendirilmesi: Ekonomik Analiz Örneği. Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 24(2), 402-410.
- [3] Soeder, D. J. (2020). Fossil fuels and climate change. In Fracking and the Environment: A scientific assessment of the environmental risks from hydraulic fracturing and fossil fuels (pp. 155-185). Cham: Springer International Publishing.
- [4] Kabir, N., Ali, M. R., Islam, M. A., Mathin, T. T., Sarker, M., Ahmed, M. and Sayeed, M. A. (2024). Necessity of green construction for building sustainable environment. World Journal of Advanced Engineering Technology and Sciences, 2024, 13(02), 372–382
- [5] Connolly, L., Sheils, E., Lamb, M., O'Connor, A., OBrien, E., Viner, H. and Varveri, K. (2023). Circular economy in road construction and maintenance. Transportation Research Procedia, 72, 3458-3465.
- [6] Huovila, P. and Westerholm, N. (2022). Circularity and sustainability in the construction value chain. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 1078. 012004. 10.1088/1755-1315/1078/1/012004.
- [7] Şen, B. N., & Eren, Z. (2021). Döngüsel Ekonomi Modeli Kapsamında Erzurum İli Hafriyat Toprağı, İnşaat ve Yıkıntı Atıklarının Yol Yapımında Kullanılabilirliğinin İncelenmesi. Sürdürülebilir Çevre Dergisi, 1(2), 41-52.
- [8] Hasan, U., Whyte, A., & Al Jassmi, H. (2019). Critical review and methodological issues in integrated life-cycle analysis on road networks. Journal of Cleaner Production, 206, 541-558.
- [9] Albarazi, R. (2020). Evaluation of Roadway Embankment Under Repetitive Axial Loading Using Finite Element Analysis.
- [10] KGM (2025), <https://www.kgm.gov.tr/Sayfalar/KGM/SiteTr/YolDanimisma/CalismaYapilanYollar.aspx>
- [11] Youtube (2025), <https://www.youtube.com/watch?v=6vZbO5jo-jY>
- [12] Karayolları Teknik Şartnamesi, (2023).
- [13] T.C. Ulaştırma Bakanlığı Demiryollar, Limanlar, Havameydanları İnşaatı Genel Müdürlüğü Geoteknik Tasarım Esasları (2007)
- [14] TS 8853, Yamaç ve Şevlerin Dengesi ve Hesap Metotları.
- [15] Kazı Destek Yapıları Hakkında Yönetmelik, (2022).
- [16] ÇŞB (2025), İnşaat ve Tesisat Birim Fiyatları, <https://webdosya.csb.gov.tr/db/yfk/icerikler/2025-yili-b-r-m-f-yatlari-20250117121853.pdf>
- [17] Impargo (2025), Calculate Truck CO2 Emissions, <https://impargo.de/en/docs/calculate-co2-emissions>