

ROADEO modeli ile Karayolu İnşaatı Karbon Ayak İzinin Tahmini: Karaman – Mersin Yol Yapım Örneği

Estimation of Road Construction Carbon Footprint with ROADEO: The Case Study of Karaman – Mersin Road Construction

Gizem AYTAÇ^{1*} , Zeynep EREN¹ 

ORCID 0009-0006-4893-2626

ORCID 0000-0003-1633-2547

¹ Karaman – Mersin Yol Yapım Şantiyesi, Karaman, Türkiye

² Atatürk Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, Erzurum, Türkiye.

Öne Çıkanlar / Highlights

- | | |
|---------------------|------------------------|
| ▪ İklim değişikliği | ▪ Climate change |
| ▪ Karbon ayak izi | ▪ Carbon footprint |
| ▪ Karayolu inşaatı | ▪ Highway construction |
| ▪ Sera gazı | ▪ Greenhouse gas |



Makale Bilgisi / Article Info

Gönderim / Received:

23/06/2024

Kabul / Accepted:

16/12/2024

Anahtar Kelimeler

İklim değişikliği, karbon ayakizi, karayolu inşaatı, GHG, ROADEO Modeli

Keywords

Climate change, carbon footprint, road construction, greenhouse gas, ROADEO Model

Özet

Bu çalışmada; yol yapım, onarım ve iyileştirme işlerinden kaynaklanan emisyonları en aza indirecek çözümler belirlemek için özellikle gelişmekte olan ülkeler için yol inşaatlarının karbon ayakizi tahminini sağlayan ROADEO modeli kullanılarak Karaman-Mersin arasında 3.3 km'si Sertavul Tünel inşaatı olmak üzere toplam 10 km'lik karayolu inşaatının GHG emisyonları (Greenhouse Gas, GHG) hesaplanmıştır. ROADEO, yol inşaatı GHG emisyonlarının değerlendirilmesi ve azaltılmasına yönelik olarak "Yol Emisyonları Optimizasyonu: Yol İnşaatı ve Rehabilitasyonunda GHG Emisyonlarının Azaltılmasına Yönelik Bir Araç Seti" ismi ile hazırlanmış ampirik bir GHG hesaplama rehber aracıdır. ROADEO modeli kullanılarak Karaman-Mersin yol yapım inşasından elde edilen GHG emisyonları 1 km'lik yol inşasından sırasıyla; yol yapısı için 1,810 tCO₂eq, hafriyat işlemlerinden 973 tCO₂eq, yol aksesuarlarından 148 tCO₂eq, arazi kullanım değişikliğinden 150 tCO₂eq, drenajdan 38 tCO₂eq ve yol üstyapı işlemlerinden 2 tCO₂eq olarak tahmin edilmiştir. Elde edilen tahmin sonuçlarına göre GHG emisyonlarının %59'u yol inşaatı için gerekli malzeme kullanımından, %35'i bu malzemelerin sahaya taşınması aşamasından ve son olarak %6'sı ise yol inşaatında kullanılan araç-gereç, makine-teçhizat gibi ekipmanlardan kaynaklanmaktadır.

Abstract

In this study, GHG (Greenhouse Gas) emissions of a total of 10 km of road construction between Karaman and Mersin, including 3.3 km of Sertavul Tunnel construction were calculated using the ROADEO Model, which provides carbon footprint estimation of road

construction especially for developing countries in order to identify solutions to minimize emissions from road construction, repair and improvement works. ROADEO is an empirical GHG planning tool prepared under the name “Road Emissions Optimization: A Toolkit for Reducing Greenhouse Gas Emissions in Road Construction and Rehabilitation” for the accumulation and reduction of road construction GHG emissions. GHG emissions were estimated as 1,810 tCO₂eq for road structure, 973 tCO₂eq from earth moving operations, 148 tCO₂eq from road accessories, 150 tCO₂eq from land use change, 38 tCO₂eq from drainage, and tCO₂eq from roadside pavement and median treatments of 1 km of Karaman-Mersin Road construction using ROADEO Model. According to the model results, 59% of GHG emissions sourced by the use of materials required for road construction, 35% from the transportation of these materials to the site, and finally 6% from equipment such as machinery and equipment used in road construction.

1. GİRİŞ/INTRODUCTION

Dünya üzerindeki tüm küresel yüzey hava ve deniz sıcaklıklarında, buzullarda, hidrolojik döngüde gözlemlenen hızlı değişiklikler, son 50 yılda hızlanmış ve sanayi devriminden beri insan faaliyetlerinden kaynaklanan başta karbondioksit (CO₂) olmak üzere GHG'nin artışı küresel sıcaklıkların yaklaşık 1 °C artmasına sebep olmuştur (IPCC 2021). 1960'larda, atmosferdeki CO₂'in küresel büyüme oranı yılda yaklaşık 0.8±0.1 ppm iken son 50 yılda yıllık büyüme oranı üç katına çıkarak 2.4 ppm'e ulaşmıştır NOAA 2024). Bu nedenle mevcut küresel ısınma hızının, jeolojik devirler boyunca bilinen en hızlı ve doğal iklim değişiminin görüldüğü çağ olan buzul çağının bitişindeki ısınma hızından on kat daha fazla olduğu belirtilmektedir (NASA 2020). Nisan 2024 küresel sıcaklık ölçümleri sanayi öncesi referans dönemi olan 1850-1900 dönemine göre 1.58 °C daha sıcak olarak kaydedilmiştir (Copernicus 2024). İklimin ortalama durumundaki veya değişkenliğindeki istatistiksel olarak anlamlı değişikliklere, genellikle onlarca yıl veya daha uzun süre devam eden değişikliklere “iklim değişikliği” adı verilmektedir (IPCC 2018a). Küresel ölçekteki fosil yakıt kullanımı, arazinin parçalanması, orman alanların yok edilmesi, atık sorunu, tarımsal gübreler, pestisitler, endüstriyel tarım ve hayvancılık faaliyetleri GHG artışının temel sebepleri olarak gösterilmektedir. Bu gazların atmosferdeki hızlı artışına bağlı olarak, şehirleşmenin de etkisiyle doğal sera etkisinin kuvvetlenmesi sonucunda yeryüzünde ve atmosferin alt katmanlarında sıcaklık artmaktadır (Türkeş 2001; Türkeş 2008). Atmosferdeki moleküllerin yaklaşık %0.43'üne karşılık gelen bu gazlar yer yüzeyinden yansıyan kızılötesi radyasyonu absorbe ederek yer kürenin ısınmasına önemli ölçüde katkıda bulunurlar. Bu gazlar sırasıyla CO₂, metan (CH₄) ve diazot oksit (N₂O) olup doğal GHG olarak adlandırılır. Atmosferde ayrıca sülfür heksaflorür (SF₆), azot tri florürler (NF₃), hidroflorokarbonlar (HFC) gibi florlü gazlar ile ozon (O₃) gibi GHG da yer almaktadır (Kadıoğlu ve Çakır 2015). Hükümetlerarası İklim Değişikliği Paneli'nin (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC) 1990 yılında yayımlanan ilk değerlendirme raporunda (FAR 1990), insan faaliyetlerinden kaynaklanan GHG emisyonları olan CO₂, CH₄, CFC ve N₂O atmosferik konsantrasyonlarının önemli ölçüde arttığı belirtilmiştir. IPCC son değerlendirme raporunda (AR6, 2022) ise; 1.5 °C küresel ısınmanın gerçekleşmesi halinde sıcak hava dalgalarının artacağını, sıcak mevsimlerin uzayacağını ve soğuk mevsimler kısılacacağını belirtmektedir. Küresel sıcaklıkların 2 °C olması durumunda ise aşırı sıcaklıkların tarım ve sağlık açısından kritik tolerans eşiklerine daha sık ulaşacağını göstermektedir.

Küresel GHG emisyonlarının enerji ile ilgili olan kısımlarının yaklaşık %75'i kentlerden kaynaklanmaktadır. 21. yy'ın ortasına kadar Dünya nüfusunun üçte ikisinin kentsel alanlarda yaşaması beklendiğinden bu değerlerin artacağı öngörülmektedir. Bu nedenle kentsel GHG emisyon envanterlerinin belirlenmesi küresel iklim değişikliği ile mücadelede önemli bir adımdır. Bu amaçla Topluluk Ölçekli GHG Envanterleri Küresel Protokolü (The Global Protocol for Community-Scale Greenhouse Gas Emission Inventories, GPC), şehirlere ve yerel yönetimlere şehir GHG emisyonlarını tutarlı bir şekilde belirlemek, hesaplamak ve raporlamak için sağlam, şeffaf ve küresel olarak kabul edilen bir çerçeve sunmaktadır. 2014 yılından beri küresel ölçekte şehirler tarafından emisyonları hesaplamak ve raporlamak için kullanılan GPC, Ulusal GHG Envanterlerine ilişkin 2006 IPCC Kılavuzlarının 2019 versiyonu ile uyumlu hale getirilmek üzere revize edilmiştir. GPC protokolüne göre; şehir sınırları içerisinde yer alan kaynaklardan meydana gelen GHG emisyonları (Kapsam 1), şehir sınırları içerisinde kullanılan elektrik, ısı, buhar ve soğutma kullanımı sonucu ortaya çıkan GHG

emisyonları (Kapsam 2) ve şehir sınırları içinde gerçekleştirilen faaliyetler sonucunda şehir sınırları dışında meydana gelen diğer tüm GHG emisyonları (Kapsam 3) üç farklı emisyon envanteri çıkarılabilmektedir. Bu GPC kapsamına göre ulaşım emisyonları; hem şehir içi hem de şehir içinde başlayıp şehir dışında sonlanan ulaşım emisyonlarını içermektedir. Ulaşım, şehirlerarası ve uluslararası seyahatler de dahil olmak üzere, karayolu, demiryolu, deniz ve hava yoluyla yapılan tüm yolculukları kapsamaktadır. Ulaşımına ait olan GHG emisyonları doğrudan yakıtın yakılmasıyla veya doğrudan şebekeden sağlanan elektriğin kullanımı ile meydana gelmektedir. Ancak bu ulaşım emisyon hesabı karayolu inşasından meydana gelen emisyonları kapsamamaktadır (GPC, 2020). Sektörel GHG emisyonları içerisinde ulaşım sektörü önemli bir yer tutmaktadır. Ulaşım sektörüne ait GHG envanteri birçok hesaplama metodu kullanılarak belirlenmektedir. Bunlar arasında en kabul gören yaklaşım IPCC Tier 1 yaklaşımıdır. Bu metod ile ulaştırma sektöründeki araçların kullandıkları yakıtın türüne bağlı olarak oluşturacakları GHG emisyonları hesaplanabilmekte, Tier 2 ve 3 yaklaşımı da dahil edildiğinde araç türü, araç sayısı, yol mesafesi vb. parametreler de hesaplama dahil edilerek CO₂ eşdeğeri cinsinden emisyon envanteri çıkarılabilmektedir (Pekin, 2006). Ancak bir karayolunun inşaat aşamasından başlamak üzere, işletmeye alınma ve kullanım ömrü dahil olmak üzere çevreye salım yaptığı GHG emisyonlarının CO₂ eşdeğeri cinsinden envanterinin belirlenmesi o yol inşasına ait karbon ayak izinin hesaplanmasını gerektirir. Bu konuda literatürde çok fazla çalışma olmamasına rağmen; yol inşaatı GHG emisyonları, iklim değişikliğine olan önemli katkıları nedeniyle uzun bir süredir önemli bir endişe kaynağı haline gelmiştir. Çünkü karayolu projelerinin yaşam döngüsü boyunca, GHG emisyonlarının çoğunluğu inşaat aşamasına aittir. Son yıllarda başta gelişmekte olan ülkeler olmak üzere tüm dünyada büyük miktarlarda yol inşa edilmiş olup, 2050 yılına kadar 25 milyon kilometreden fazla yeni yol inşa edileceği tahmin edilmektedir. Karayolu inşaatlarının, malzemelerin çıkarılması ve üretimi, sahaya nakliye ve inşaat makineleri kullanımı gibi faaliyetleri inşaat aşamasında karayolu taşımacılığında kaynaklanan toplam emisyonların %5 ile %25'ine karşılık GHG emisyonları üretmektedir. Son yıllarda karayolu inşaatı aşamasında sıcak karışım asfalt teknolojisi, yeşil beton teknolojisi, atık geri dönüşüm teknolojisi, fotovoltaiik kaplama teknolojisi vb. gibi birçok enerji tasarrufu ve emisyon azaltıcı önlem alınmasına rağmen bu yöntemlerin küresel ölçekte yaygınlaşmaması önemli çevresel etkiler ve GHG emisyonları ile karayollarının hala tartışma konusu olmasına sebep olmaktadır. Bu nedenle karayolu inşaatlarının karbon ayakizi hesaplamaları önem kazanmaktadır (Yu vd., 2022).

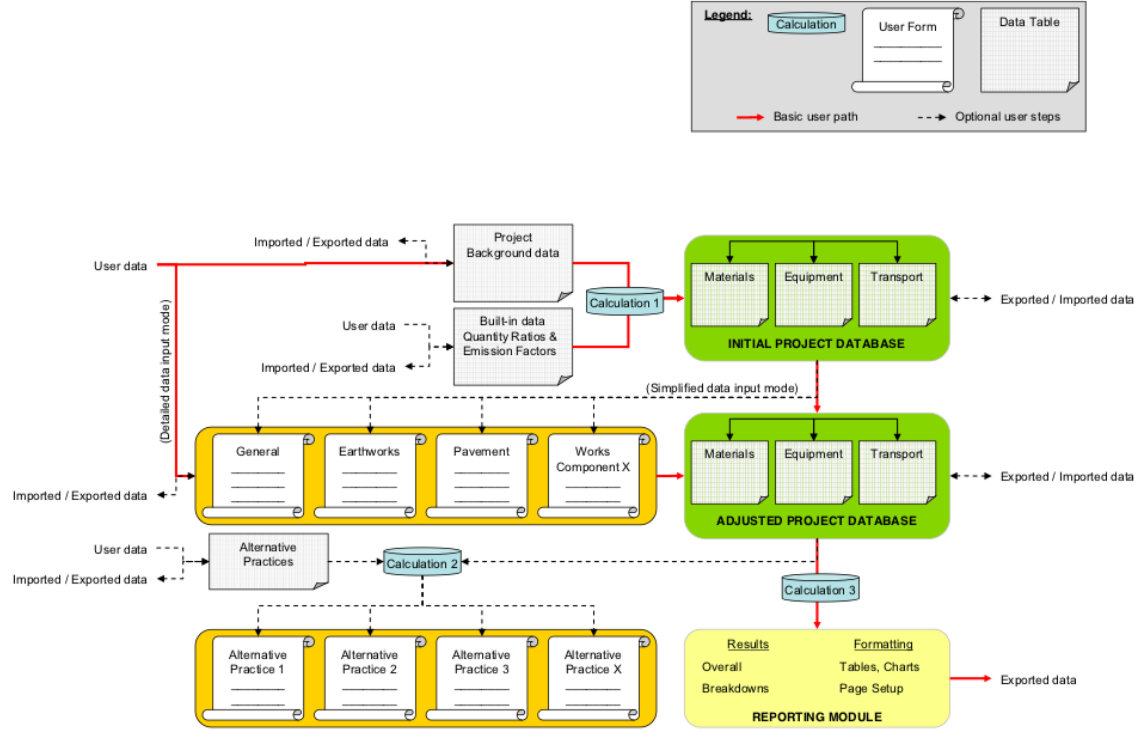
Bu amaçla bu çalışmada yol yapım ve iyileştirmelerinden kaynaklanan emisyonları en aza indirecek çözümler belirlemek için özellikle gelişmekte olan ülkeler için yol inşaatlarının karbon ayak izi tahminini sağlayan ROADEO modeli kullanılarak Karaman-Mersin arasında 3.3 km'si Sertavul Tünel inşaatı olmak üzere toplam 10 km'lik karayolu inşaatının GHG emisyonları hesaplanmıştır. Program yol inşaatı için gerekli zeminin hazırlanması, yol malzemesi temini, malzemenin taşınması ve inşaat esnasında kullanılan araç-gereç, makine-teçhizat vb. gibi ekipmanlar, yol aksesuarları ile yolun ulaşım amaçlı kullanımı esnasında meydana gelecek GHG emisyonları hesabını esas almaktadır.

2. MATERYAL VE METOT /MATERIALS AND METHODS

2.1. ROADEO Modeli

ROADEO, yol inşaatı GHG emisyonlarının değerlendirilmesi ve azaltılmasına yönelik olarak "Yol Emisyonları Optimizasyonu: Yol İnşaatı ve Rehabilitasyonunda GHG Emisyonlarının Azaltılmasına Yönelik Bir Araç Seti" ismi ile hazırlanmış ampirik bir GHG hesaplama rehber aracıdır. Asya Sürdürülebilir ve Alternatif Enerji Programı (ASTAE) tarafından finanse edilmiş ve Dünya Bankası (WB) Doğu Asya Sürdürülebilir Kalkınma Altyapı Birimi yönlendirmesiyle gelişmekte olan ülkeler için hazırlanmıştır (URL-1, 2011). Modelin her uygulama sahası için net sonuçlar vermesi beklenmez ancak bilgi eksikliği durumlarında ve örneğin planlama ve erken fizibilite çalışması aşamaları gibi özellikle projelerin erken aşamalarında model belirli tahminler elde edilmesine yardımcı olur. Şekil 1'de ROADEO modelinin yol yapım emisyonlarını hesaplamada kullandığı akış şeması görülmektedir. Model ilk aşamada yol çalışması öğelerinin miktarlarını hesaplamaya yardımcı olur. İkinci aşamada ise, yol çalışmaları miktarlarına ve projenin genel özelliklerine bağlı olarak her bir GHG kaynağı için emisyon envanterini hesaplar. Model dili İngilizce olduğu için çalışmada sunulan tüm tablo ve şekillere ait ekran görüntüleri de İngilizcedir. Programa göre yol yapım işinden kaynaklı GHG emisyonlarının

üretimine ve salımına katkıda bulunan süreçler; sahanın temizlenmesi, alt zeminin hazırlanması, inşaat malzemelerinin üretimi (granüler alt temel, temel tabakası, yüzey kaplama), saha teslimatı, inşaat işleri ile denetim, bakım faaliyetleri vb. gibi devam eden çalışmalardan oluşmaktadır. Her proje veya alt projeye ilişkin toplam GHG emisyonları, kullanılan ekipmana, yerel koşullara ve standart inşaat ve bakım uygulamalarına dayalı olarak hesaplanmaktadır. Dolayısı ile elde edilen sonuçlar belirtilen sınırlar çerçevesinde bir tahmine dayanmaktadır (URL-2, 2010).



Şekil 1. ROADEO modelinin genel akış şeması.

Kullanıcılar için program bazı durumlarda çelişki yaratabilir. Örneğin; kullanıcıların GHG emisyon hesaplamalarını etkileyen parametrelerin çoğunu ayarlayabilmesi ve kendi özel proje koşullarını değerlendirmelere ve hesaplamalara entegre edebilmesi için mümkün olduğu kadar açık veriye ihtiyaç vardır. Hesaplama parametreleri için değerlerin seçiminde kullanıcıların verdiği kararlar, sonuçlar üzerinde büyük bir etkiye sahip olabilmektedir. ROADEO'dan elde edilen mühendislik veya ampirik sonuçlar, kullanıcının projesinin özel durumunu temsil etmeyebilir ve varsayılan değerleri kullanmadan önce dikkatli bir şekilde değerlendirilmelidir. Bir projenin her aşamasında kullanılacak ve karar almaya bilgi sağlayacak açık, şeffaf, esnek bir hesaplama yöntemi geliştirilmelidir.

ROADEO modeli kullanılarak bir yol projesinin ürettiği GHG emisyonları; planlama/fizibilite çalışmaları, ayrıntılı tasarım ve projenin uygulanması/tamamlanması aşamaları olmak üzere üç aşamada değerlendirilir. Programın yol yapım aşamasında oluşması muhtemel olarak belirlediği GHG emisyon kaynakları; arazi kullanımı, hafriyat işlemleri, drenaj, yol üstyapısı, yol altyapısı, trafik işaretleri gibi yol aksesuarları, peyzaj, kamu hizmetleri ve trafik yönetimi olarak belirlenmiştir. Bu nedenle tüm bu bilgiler programın gerektirdiği şekli ile hesaplama dahil edilmiştir.

Çalışma Sahası Bilgileri

Karaman-Mersin arasında yapılan toplam 10 km uzunlukta ve 3.3 km Sertavul Tünelini de içeren yol inşaatı yapım sahası ve tünel yapımına ait çalışma sahası görüntüsü Şekil 2'de gösterilmiştir.



Şekil 2. Karaman-Mersin yol çalışması görüntüsü.

3. BULGULAR VE TARTIŞMA/ RESULTS AND DISCUSSION

Karaman-Mersin arasında inşa edilen 10 km'lik, 3.3 km'si tünel olan karayoluna ait; yol uzunluğu, şerit sayısı, şerit genişliği, yol üstyapısı genişliği-türü, mevcut yolun genişliği, genel yol altyapısı kesit profili ile yol proje uzunluğunun yüzdesi olarak; dağlık arazide yol uzunluğu, kentsel alanlarda yol uzunluğu, mevcut boyuna drenajın uzunluğu, mevcut çapraz drenajın uzunluğunun gerekli olan yüzdesi, kesme ve doldurma yüzdesi arasındaki dengeyi belirten parametre ve toprak hacminin yüzdesi olarak kayalık toprağın hacmi (%) bilgileri gibi genel proje bilgileri temin edilerek modelin ilk girdi ara yüzüne (INPUT DATA) kaydedilmiştir. Bu verilerin model girdisi olarak kullanıldığı model ara yüzüne ait bir ekran görüntüsü ise Şekil 3'te gösterilmiştir.

Start	Designation	Unit	Quantity / Value	Toggle Default Values
Country		list	General	<input type="checkbox"/>
Project Name			Default	
Work Type		list	New alignment	
Road type		list	National road	
Alignment length		m	10,000	
Number of lanes		u	2	
Lane width		m	3.50	
Median width		m	3.00	
Median type		list	Unpaved	
Shoulder width		m	2.50	
Shoulder type		list	Paved	
Existing cross section width		m	4.00	
General longitudinal profile		%	80.00%	
Length of road in mountainous terrain as a percentage of road project length		%	70.00%	
Length of road in urban areas as a percentage of road project length		%	15.00%	
Length of existing longitudinal drainage as a percentage of road project length		%	80.00%	
Length of existing cross drainage as a percentage of requirement		%	30.00%	
Parameter reflecting the balance between cut and fill		%	35.00%	
Volume of rocky soil as a percentage of volume of soil (in %)		%	25.00%	
Area where subgrade has to be treated with hydraulic binders		%	0.00%	
Volume of embankment to be treated as a percentage of the volume of cut reused		%	20.00%	
Number of bridges to be widened as a percentage of number of bridges		%	0.00%	
Subgrade strength class		list	Standard Soil [5%-8%]	
Expected traffic volumes		list	Very low traffic [<0.3 Million ESA]	
Pavement structure type		list	Bituminous pavement on granular materials	
Overlay structure type		list	0.00	
Type of barrier material		list	Steel	
Type of structure (standard bridges)		list		
Type of structure (major bridges)		list		
Type of structure (wall)		list	Reinforced concrete	
Length of tunnel		m	3,300	
Temperate Mountain System (>20 years)		%	50%	
Temperate Mountain System (>20 years)		%	20%	

Şekil 3. Çalışmada kullanılan yol verilerinin model ara yüzündeki gösterimi.

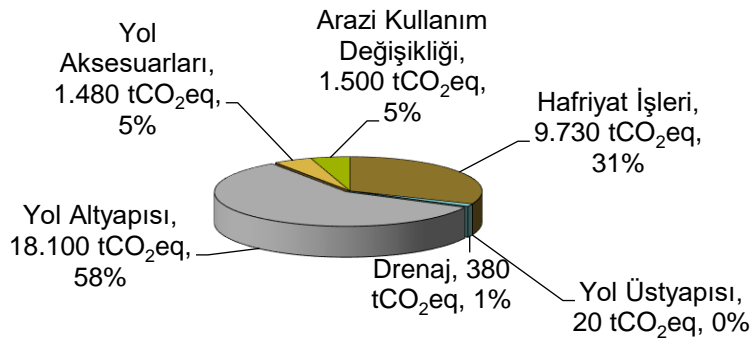
Çalışmada ilk önce Karaman-Mersin arasındaki yol inşaatına ait sahadan temin edilen verilerin ROADEO modeli işlenmesiyle (Şekil 3), programın yol inşaatına ait kendi hesapladığı veriler karşılaştırılmıştır (Tablo 1).

Tablo 1. Gerçek Proje Verileri ile ROADEO Model Verilerinin Karşılaştırılması.

Karayolu inşaat bilgileri	Proje Verileri	ROADEO Program Verileri
Temizleme ve kazıma alanı	200,000 m ²	134,670 m ²
Alt zemin hazırlama alanı	147,000 m ²	73,700 m ²
Yeni kesit	15 m	15 m
Ortalama kesme ve doldurma yüksekliği	5 m	9 m
Kesim hacmi	800,000 m ³	114,470 m ³
Tahliye edilen toprağın hacmi	450,000 m ³	55,804 m ³
Dolgu olarak yeniden kullanılan toprağın hacmi	200,000 m ³	30,048 m ³
Tahliye edilen sert kaya hacmi	200,000 m ³	
Kaplama katmanı olarak yeniden kullanılan sert kaya hacmi	100,000 m ³	28,617 m ³
Dolgu olarak yeniden kullanılan sert kaya hacmi	200,000 m ³	
Doldurma hacmi	400,000 m ³	1,030,226 m ³
Malzeme ocağından gelen dolgu hacmi	-	1,000,177 m ³
Dolgu iyileştirme hacmi	-	6,010 m ³
Alt zemin arıtma hacmi	44,100 m ³	22,110 m ³

Tablo 1'e göre Karaman-Mersin arasında yapılan 10 km'lik yol yapım çalışmasına ait kazı alanı 200,000 m² olarak elde edilmişken ROADEO modeli bunu 134,670 m² olarak tahmin etmiştir. Genel olarak model tahminleri, bölgenin ve iklimin şartlarındaki değişkenlikler de göz önüne alındığında projeden elde edilen verilere yakın niteliktedir. Bu nedenle ROADEO modelinin mevcut saha çalışmasına uyarlanabileceği düşünülmüştür. Ayrıca projede bulunmayan ancak göz önüne alınması gereken malzeme ocağından gelen dolgu hacmi, dolgu iyileştirme hacmi vb. bilgilerin de model tarafından sağlandığı görülmektedir. Bu nedenle GHG emisyon hesaplama aşamasına geçilmiştir. Program Hafriyat işleri, Drenaj, Yol altyapısı, Yol kaplaması, Yol aksesuarları ve arazi kullanım değişikliklerinden kaynaklı olmak üzere toplamda 6 ana GHG kaynağına ait emisyonları hesaplanarak sonuçlar Şekil 4'te gösterilmiştir. Pasta grafikler Programın ürettiği şekli ile kullanılmıştır. Buna göre Karaman-Mersin arasında yapılan ve 3.3 km'si tünel olan toplam 31,210 tCO₂eq olarak tahmin edilmiştir. Programa göre bu GHG emisyonlarının en yüksek kaynağı %58 ile yol altyapı inşası ve ardından %31'lik pay ile hafriyat işleridir. Yol altyapı inşasının en yüksek GHG emisyonlarına sahip olduğu görülmektedir. Bu emisyonları takiben arazi kullanım değişiklikleri ve yol aksesuarları %5'lik pay ile 3. sıradaki GHG emisyonları arasında yer almaktadır. Drenaj çalışmaları %1'lik emisyon payına sahip olurken, 20 tCO₂eq GHG emisyonu ile yol üstyapısından kaynaklanan GHG emisyonları %1'in altında kalmıştır.

St



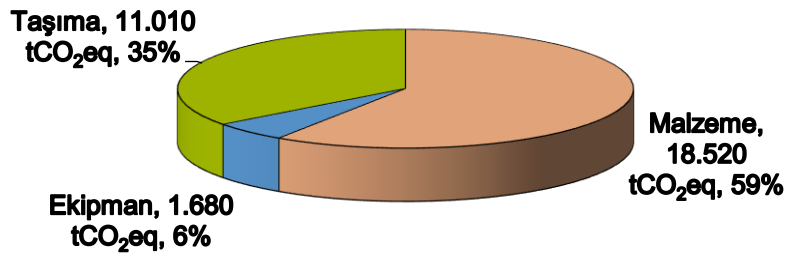
Şekil 4. Karaman-Mersin Yol Yapım İnşaat İşine Ait ROADEO modeli ile Hesaplanan Toplam GHG Emisyonlarının Kaynağı ve Dağılımı (tCO₂eq).

1 km'lik bir yol inşaat projesinden kaynaklanan toplam GHG emisyonları Çin ve Endonezya'daki saha çalışmalarından 700-1.700 tCO₂eq arasında hesaplanmıştır. ROADEO modeli kullanılarak Vietnam'daki 1 km'lik bir yol bakım/iyileştirme projesinden kaynaklanan toplam GHG emisyonları 300-500 tCO₂eq arasında hesaplanmıştır. Bu çalışmada ise 1 km yol inşaatından kaynaklanan toplam GHG emisyonları 3,121 tCO₂eq olarak hesaplanmıştır (Albuquerque vd. 2020).

Literatür çalışmalarına göre hafriyat faaliyetlerinin yol inşaatı aşamasında üretilen emisyonların %60-85'ini oluşturduğu belirlenmiştir. Hafriyat faaliyetlerini ise inşaat malzemeleriyle ilgili emisyonlar ve çevresel sistemlerdeki bozulmalar takip etmektedir. Taşıma sırasındaki emisyonların da yol inşaatı esnasında oluşan emisyonlara çok az katkısı olduğu belirlenmiştir. Literatür sonuçları bu çalışmada elde edilen sonuçlar ile paralellik göstermektedir ve hafriyat için meydana gelen GHG emisyonları %59 olarak hesaplanmıştır. Ayrıca literatür çalışmaları inşaat malzemelerinin imalatı ve çıkarılmasının GHGna katkıda bulunan ana faktörler olduğunu göstermektedir. Agreg ve temel malzemeler, çimento, bitüm ve çelik aksamın yol yapım işinde en fazla kullanılan inşaat malzemeleri olduğu tespit edilmiştir (Albuquerque vd. 2020).

ROADEO modeline göre bu toplam GHG emisyonları programın üç temel bileşenini oluşturan; inşaat işinin türü (Materials), kullanılan ekipman (Equipments) ve bu malzemelerin taşınması (Transport) aşamalarından meydana gelen gelmektedir. Bu nedenle Karaman-Mersin yol yapım inşaatından kaynaklı bu üç temel GHG emisyon oluşturuçuların dağılımı da hesaplanmıştır ve sonuçlar Şekil 5'te gösterilmiştir. Buna göre Karaman-Mersin yol inşaatının GHG emisyonlarının %59'u malzeme kullanımından kaynaklanmaktadır. Yol yapımının ikinci önemli GHG kaynağı %35'lik bir pay ile bu malzemelerin taşınmasını oluştururken, son GHG kaynağı olarak %6'lık bir pay ile yol inşaatında kullanılan araç-gereç, makine-teçhizat gibi ekipmanlar yer almaktadır.

St



Şekil 5. Karaman-Mersin Yol Yapım İnşaatının ROADEO modeli ile Hesaplanan Temel GHG Emisyon Oluşturucularının Dağılımı (tCO₂eq).

Şekil 5'e göre karayolu inşaatında en yüksek GHG emisyon oluşturuçuy kaynağ %59'luk pay ile malzeme kullanımına aittir. Literatürde yapılmış bir çalışmada dört şeritli, 1 km uzunluğundaki bir otoyol için toplam emisyonların %57'sinin inşaat malzemelerinin üretim aşamasında meydana geldiği tahmin edilmiştir (Albuquerque vd., 2020). Diğer araştırmalar, hafriyat faaliyetlerinin yol inşaatı aşamasında

üretilem emisyonların %60-%85'ini oluşturduğunu göstermektedir (EAPA 2004). Ayrıca Angelopoulou vd., (2009) yaptıkları çalışmada; yol ekipmanlarının (çelik ve beton gibi yol kenarı bariyerlerinin) GHG emisyonlarının %5'ine katkıda bulunduğunu ortaya koymuşlardır.

Singh vd. (2023) yılında yaptıkları çalışmada esnek ve sert zemin yapımında kullanılan genel malzeme yerine geri dönüştürülmüş malzeme kullanımıyla GHG emisyonunu %14,6 ve %3,6 oranında azaltılabildiğini tespit etmiştir (Singh vd., 2023). Çalışmanın bir diğere aşamasında ise ROADEO modeli ile Karaman-Mersin yol yapım inşaat işlerine ait malzeme, ekipman ve taşımadan kaynaklanan GHG emisyon oluşturucuların dağılımı hesaplanmıştır. Sonuçlar Tablo 2'de gösterilmiştir.

Tablo 2. Karaman-Mersin Yol Yapım İnşaat İşine Ait ROADEO modeli ile Hesaplanan Temel GHG Emisyon Oluşturucularının Dağılımı (tCO₂eq).

GHG, tCO ₂ eq	Malzeme, %	Ekipman, %	Taşıma, %
Hafriyat Çalışmaları	1	6	93
Yol Üstyapısı	0	0	100
Drenaj	87	3	10
Yol Altyapısı	84	6	10
Yol Aksesuarları	95	2	3

Bu çalışmadan elde edilen sonuçlara göre; 1 km'lik yol inşasından sırasıyla; yol altyapısı için 1810 tCO₂eq, hafriyat işlemlerinden 973 tCO₂eq, yol aksesuarlarından 148 tCO₂eq, arazi kullanım değişikliğinden 150 tCO₂eq, drenajdan 38 tCO₂eq ve yol üstyapı işlerinden 2 tCO₂eq GHG emisyonları meydana gelmektedir. Karayolları Genel Müdürlüğünün resmi verilerine göre ülkemizde 2023 yılında 387 km yol inşa edildiği (KGM, 2023) düşünüldüğünde bu emisyonların önemi ortaya çıkmaktadır. Çin'de 2008-2020 yılları arasında inşa edilen toplam yol projelerinden 300 milyon tCO₂eq fazla GHG emisyonu oluştuğu belirtilmiştir. Ülkemizde de 2003-2023 yılları arasında 23,272 km yol yapıldığı göz önüne alınırsa, ROADEO modeli kullanılarak bu çalışmadan elde edilen sonuçlar göz önüne alındığında yaklaşık 70 milyon tCO₂eq GHG emisyonu oluştuğu tahmin edilebilir.

4. SONUÇ VE ÖNERİLER/CONCLUSIONS AND SUGGESTIONS

Uluslararası Enerji Ajansı'nın 2005 yılında yaptığı bir araştırmaya göre karayolu araçları, trenler, gemiler ve uçaklar dahil ulaştırma sektörünün GHG emisyonlarının ikinci büyük üreticisi olduğunu ortaya koymuştur. Karayolu taşımacılığı ise ulaştırma sektörü GHG emisyonlarının yaklaşık yüzde 90 ila 95'ini oluşturmaktadır (URL-1, 2011). Bu duruma yol yapım inşaatlarının yaşam döngüsü boyunca ürettiği karbon ayakizi de eklendiği zaman, karayolları oldukça büyük emisyon üreticisi durumuna gelmektedir. Özellikle gelişmekte olan ülkelerdeki yol yapım, onarım, bakım ve yenileme süreçleri eklendiğinde antropojenik GHG emisyonlarının yüzde kırkıdan fazlasını oluşturmaktadır. Ancak yine de karayolu inşaatına ait GHG emisyonlarının tahmin edildiği çalışmalar yeterli seviyede değildir. Bu amaçla bu çalışmanın literatürdeki karayolu inşaatı ayakizine ait az sayıdaki çalışmaya bir katkı sunması amaçlanmıştır.

ROADEO modelinden çıkan sonuçlara göre; yol yapım inşaatında kullanılan malzemelerden çimento, asfalt ve çelik gibi malzemelerin CO₂ emisyonunun yüksek olduğu görülmektedir. Bu nedenle düşük karbonlu teknolojilerin seçilmesi ve yüksek karbonlu veya karbon yoğun malzemelerin düşük karbonlu malzemelerle değiştirilmesi ile düşük GHG emisyon değerleri sağlanabilir. İnşaat ve malzeme ile ilgili emisyon azaltma teknolojilerine örnek olarak; çimento yerine uçucu kül ve cürufaların kullanılması, çelik tesislerinde CO₂ içermeyen çelik üretim teknolojileri, kırma tesislerinde dizel yakıt yerine elektrik kullanılması, biyo-bazlı bitüm üretimi, kauçuk asfalt kullanımı, yerinde kireç stabilizasyonu, çimento üretiminde biyo-bazlı yakıt kullanımı verilebilir. Ayrıca geri dönüştürülmüş çelik kullanımı, geri dönüştürülmüş asfalt kullanımı ile şantiye sahasındaki iş makineleri için düşük karbonlu yakıtlar ile elektrikli uygulamalar gibi sürdürülebilir yaklaşımlar benimsenebilir (Liu vd., 2022). Karayolu ulaşımına açıldığında optimum bakım stratejisi, kaplama pürüzlülüğünün kontrol edilmesi gibi uygulamalar da albedo iyileştirmesi açısından iyi birer örnek teşkil edebilir. Ulaşım esnasında meydana gelecek GHG emisyonları azaltmak için ise; araçların akışının standart bir şekilde olması, yoldaki

aydınlatmaların verimli ve tasarruflu bir şekilde planlanıp yerleştirilmesi, karayolu ulaşımı esnasında tonajı yüksek kamyonlar yerine daha yeni araçların veya filoların kullanılması, bu araçların yakıtlarının dizel olması gibi uygulamalar gerçekleştirilebilir. GHG emisyonlarının malzemelerin taşınması aşamasındaki artışını önlemek için en önemli nokta malzemenin en yakın kaynak alanından getirilmesi olarak değerlendirilebilir.

4. TEŞEKKÜR/ACKNOWLEDGEMENT

Bu makale “Yol Yapım Şantiyesi Karbon Ayak İzinin Tahmini: Karaman – Mersin Yol Yapım Örneği” isimli yüksek lisans tez çalışmasından üretilmiştir. Çalışma için her türlü bilgi ve veri akışını sağlayan Bergiz Holding’e teşekkür ederiz.

5. KAYNAKÇA/REFERENCES

- Albuquerque, F. D., Maraqa, M. A., Chowdhury, R., Mauga, T., & Alzard, M. (2020). Greenhouse gas emissions associated with road transport projects: current status, benchmarking, and assessment tools. *Transportation Research Procedia*, 48, 2018-2030.
- Angelopoulou, G.I., Koroneos, C.J., Loizidou, M., 2009. Environmental impacts from the construction and maintenance of a motorway in Greece, 1st International Exergy, Life Cycle Assessment, and Sustainability Workshop & Symposium.
- AR6, 2022. IPCC’s Sixth Assessment Report (AR6)- The Working Group I Report, <https://www.ipcc.ch>, Erişim Tarihi: 27.02.2024.
- Copernicus, 2024. Copernicus: Global temperature record streak continues – April 2024 was the hottest on record, <https://climate.copernicus.eu/>, 17.07.2024.
- EAPA, 2004. European Asphalt Pavement Association. Environmental Impacts and Fuel Efficiency of Road Pavements, <https://eapa.org>, Erişim Tarihi: 24.11.2024
- FAR, 1990. IPCC’s First Assessment Report (FAR)- The Working Group I Report, <https://www.ipcc.ch>, Erişim Tarihi: 07.02.2024
- GPC, 2020. Global Protocol for Community-Scale Greenhouse Gas Inventories, <https://ghgprotocol.org/ghg-protocol-cities>, Erişim Tarihi: 08.12.2023.
- IPCC, 2007a. Climate Change 2007: Working Group I: The Physical Science Basis, What is the Greenhouse Effect?
- IPCC, 2018a. The Climate System: an Overview. Weather and climate, TAR, <https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/TAR-01.pdf>, Erişim Tarihi: 17.07.2024.
- IPCC, 2021. AR6 Climate Change 2021: The Physical Science Basis, <https://www.ipcc.ch/>, Erişim Tarihi: 08.12.2023.
- IPCC, 2022. Climate Change 2022 Mitigation of Climate Change Working Group III Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.
- Kadioğlu, M., Çakır, S., 2015. *Meteoroloji-Atmosferimizi Anlamak*, Nobel Akademik Yayıncılık.
- Liu, N., Wang, Y., Bai, Q., Liu, Y., Wang, P. S., Xue, S., ... & Li, Q. (2022). Road life-cycle carbon dioxide emissions and emission reduction technologies: A review. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, 9(4), 532-555.
- NOAA, 2024. Climate Change: Atmospheric Carbon Dioxide, <https://www.climate.gov/>, Erişim Tarihi: 24.11.2024.
- NASA, 2020. Evidence, <https://science.nasa.gov/climate-change/evidence/>, Erişim Tarihi: 11.09.2023
- NASA, 2022. Global temperatures, NASA Earth Observatory, <https://earthobservatory.nasa.gov/>, Erişim Tarihi: 11.09.2023.
- Pekin, M. A. (2006). Ulaştırma sektöründen kaynaklanan GHG emisyonları, Fen Bilimleri Enstitüsü, İTÜ.
- Singh, A., Srivastava, V., & Tiwari, A. K. (2023). Carbon Footprint Estimation of Highway Construction Materials. *J. Environ. Nanotechnol*, 12(4), 22-34.
- Türkeş, M. (2001). Küresel iklimin korunması, iklim değişikliği çerçeve sözleşmesi ve Türkiye. *Tesisat Mühendisliği*, TMMOB Makina Mühendisleri Odası, Süreli Teknik Yayın, 61, 14-29.

- Türkçes, M. (2012). Türkiye’de gözlenen ve öngörölen iklim değışikliği, kuraklık ve çölleşme. Ankara Üniversitesi Çevrebilimleri Dergisi, 4(2), 1-32.
- URL-1, 2011. Transport - Greenhouse gas emissions mitigation in road construction and rehabilitation: A toolkit for developing countries (English), <https://documents1.worldbank.org/>, 21.04.2024
- URL-2, 2010. Energy Sector Assessment Program, <https://www.esmap.org/>, Access Date: 18.04.2024.
- Yu, C., Wu, L., Liu, Y., Ye, K., & Liang, G. (2022). Estimating Greenhouse Gas Emissions from Road Construction by Considering the Regional Differences in Carbon Emission Factors of Cement: The Case of China. *Buildings*, 12(9), 1341.